

MEMORIA DE INVESTIGACIÓN

2021-2022



Centro Nacional de Aceleradores

Memoria de Investigación 2021-2022

Research Report 2021-2022



Índice general

1. Estructura y Personal/ Structure and Staff. Bienio 2021-2022	6
1.1. Dirección del Centro/ Centre Management.	6
1.2. Junta Rectora/ Governing Board.	7
1.3. Comité Científico/ Scientific Committee.	7
1.4. Personal del Centro/ Centre Staff.*	7
1.4.1. Unidad Técnica y de Servicios / Administration and Technical Unit	7
1.4.2. Unidad de Investigación de Técnicas de Análisis y Modificación de Materiales con Haces de Iones / Ion Beam Analysis and Modification of Materials Research Unit.	8
1.4.3. Unidad de Irradiación Fotónica y de Partículas / Photonic and Particle Irradiation Unit.	8
1.4.4. Unidad de Investigación en Física Nuclear Básica / Basic Nuclear Physic Research Unit.	8
1.4.5. Unidad de Investigación Radiofarmacia e Imagen Médica/ Radiopharmacy and medical Image.	9
1.4.6. Unidad de Investigación en Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS) / Accelerator Mass Spectrometry (AMS) Research Unit.	9
1.4.7. Unidad de Cultura Científica y de la Innovación (UCC+i) / Outreach Unit (UCC+i).	9
1.5. Datos del Centro/ Centre Information.	9
2. Infraestructuras/ Facilities.	12
2.1. Acelerador Tándem de 3MV/ 3MV Tandem Accelerator.	13
2.1.1. Líneas de haz/ Beam lines	14
2.1.2. Otras líneas/Other lines	16
2.1.3. Técnicas disponibles en el Acelerador Tándem 3 MV/ Available techniques at 3 MV Tandem Accelerator	19
2.1.4. Laboratorios asociados al Acelerador Tándem de 3 MV/ 3 MV Tandem Accelerator Laboratories	21
2.2. Ciclotrón/ Cyclotron.	24
2.2.1. Línea de Haz de Experimentación/ Experimental Beam Line	26
2.2.2. Laboratorios asociados al ciclotrón/ Cyclotron Laboratories	29
2.2.3. Radiofarmacia e Imagen Molecular/ Radiopharmacy and Molecular Imaging .	32
2.2.4. Tomógrafo PET y TAC para pequeños animales/ Small animal PET and CT .	35
2.2.5. Procesamiento de imágenes médicas clínicas y preclínicas/ Clinical and preclinical medical image processing	36
2.3. Tomógrafo PET/TAC para humanos/ PET/CT human scanner.	37
2.4. Acelerador Tandetrón de 1 MV con Espectrómetro de Masas(AMS)/ 1MV Tandetron Accelerator with Mass Spectrometer (AMS)	38
2.4.1. Laboratorio asociado al Acelerador Tandetrón de 1MV con Espectrómetro de Masas / AMS Laboratory	41
2.5. Acelerador MiCaDaS/ MiCaDaS Accelerator.	43

2.5.1. Servicio de Datación por Radiocarbono/ Radiocarbon Dating Service	44
2.5.2. Laboratorio de grafitización del Centro Nacional de Aceleradores(AGE)/ Au-tomated Graphitisation Equipment(AGE)	46
2.6. Laboratorio de Radiación Gamma/ Gamma Radiation Laboratory.	47
3. Investigación/ Research.	53
3.1. Unidad de Investigacion de Técnicas de Análisis y Modificación de Materiales con Haces de Iones/ Ion Beam Analysis and Modification os Materials Research Strand.	53
3.1.1. Ciencia de Materiales/ Materials Science	53
3.1.2. Patrimonio Cultural/ Cultural Heritage	60
3.2. Centro para ensayos de Irradiación/Irradiation Testing Facility	62
3.3. Unidad de Investigación en Física Nuclear Básica/ Basic Nuclear Physic Research Strand.	76
3.3.1. Estudio y caracterización de materiales.	76
3.3.2. Física experimental de neutrones/ Experimental neutron physics	78
3.4. Unidad de Investigación Ciclotrón/ Cyclotron Research Strand.	81
3.4.1. Irradiación de células con protones y estudios radiobiológicos en la línea externa del ciclotrón / Irradiation of cells with protons and radiobiological studies on the external line of the cyclotron.	81
3.4.2. Radiofarmacia	84
3.4.3. Imagen molecular/ Molecular imaging	86
3.4.4. Criopreservación	90
3.5. Unidad de Investigación en Espectrometría de Masas (AMS)/ Accelerator Mass Spec-trometry (AMS) Research Strand	92
3.5.1. Determinación de actínidos por AMS / Actinides determination by AMS	93
3.5.2. Determinación de ¹²⁹ I / ¹²⁹ I Measurement	95
3.5.3. Medida de ¹⁴ C/ ¹⁴ C measurements	100
4. CNA y Sociedad/ CNA and Society.	104
4.1. El CNA y la Salud/ CNA and Health.	104
4.2. El CNA y el Medio Ambiente/ CNA and Enviroment.	104
4.3. El CNA y el Patrimonio Cultural/ CNA and Cultural Heritage.	105
4.4. El CNA y la Empresa/ CNA and Business.	106
5. Cultura Científica/ Outreach.	110
5.1. Presentación/ Presentation.	110
5.2. Actividades/ Activities.	111
5.3. Impacto de Actividades/ Antivities Impact.	113
5.3.1. Visitantes de las instalaciones por año/ Annual visitants	113
5.3.2. Procedencia de los centros visitantes/ Origin of visitant centers	113
5.3.3. Visitantes a exposiciones y ferias / Visitants of exhibitions	114
6. Producción Científica/ Scientific Production.	117
6.1. Participación en Proyectos, Convenios y Contratos/ Research Projects, Agreements and Contracts.	117
6.1.1. Proyectos Internacionales	117
6.1.2. Proyectos Nacionales y Autonómicos	118
6.2. Artículos publicados/ Published Articles.	122
6.2.1. Artículos ISI	122
6.2.2. Artículos No ISI	130
6.3. Participación en Congresos/ Congress Participations	131
6.3.1. Congresos Internacionales	131
6.3.2. Congresos Nacionales	137

6.4.	Tesis Doctorales y Trabajo Fin de Máster/ Thesis and Final Master Projects	137
6.4.1.	Tesis	137
6.5.	Otros Méritos / Other Merits	138
7.	Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios/ Accelerators Analytics and users.	141
7.1.	Estadísticas de uso de las instalaciones del CNA/ CNA Facilities use Analytics.	141
7.2.	Usuarios de las Instalaciones del CNA/ CNA Facilities users.	144
8.	Calidad/ Quality.	149
8.1.	Componentes de la Unidad de Calidad/ Quality Unit Members.	151

Introducción/Introduction

Introducción/Introduction.

Estimado lector,

El ejemplar que tiene en sus manos se corresponde con la memoria bianual que el Centro Nacional de Aceleradores (CNA) viene generando desde su fundación.

El Centro Nacional de Aceleradores es un centro mixto de la universidad de Sevilla, La Junta de Andalucía y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), que tiene como misión el desarrollo de investigación en aceleradores de partículas y sus múltiples aplicaciones, El Centro está reconocido como una Instalación Científico-Técnica Singular (ICTS), siendo por ello un centro abierto a la comunidad científica nacional e internacional.

El bienio cubierto por este memoria es el de los años 2021 y 2022, años muy diferentes pues mientras que en primero todavía el centro sufrió variadas repercusiones debido a la pandemia COVID, el año 2022 fue ya un año a pleno rendimiento.

Durante la primera mitad del año 2021, la dirección del centro recomendó a sus investigadores que teletrabajaran aquellos días que no tenían que realizar experimentos o mantenimiento de sus equipo, recayendo en el personal técnico el día a día del funcionamiento del Centro. En el año 2021, también muchos de los usuarios del centro tuvieron limitaciones para poder trasladarse a realizar experimentos en nuestro centro, aunque ello se trató de paliar gracias al trabajo de los técnicos del centro con conexiones y realización de experimentos en remoto. Durante el año 2021, como ocurrió en el año anterior el peso del centro gravitó en gran parte sobre el personal técnico y de administración que realizaron una labor encomiable que merece ser destacada.

En el año 2022, se recuperó la normalidad del centro, alcanzó éste un pleno rendimiento ya sin limitaciones por la epidemia. El número de usuarios externos que accedieron a las instalaciones y equipos del CNA alcanzó valores máximos, y los grupos de investigación asociados al centro continuaron su labor con especial dedicación a la mejora de los sistemas experimentales para que estos alcancen un rendimiento máximo. En los años 2021 y sobre todo 2022 se culminaron diversos proyectos para la mejora de infraestructuras financiados por la Subdirección General de Grandes Infraestructuras Científico-Técnicas del Ministerio de Ciencia e Innovación y por la Junta de Andalucía por un montante total de dos millones de Euros.

La situación económica del Centro en el bienio 2021-2022 se puede considerar como consolidada y bastante estable. A las aportaciones en infraestructuras antes citadas hay que unir las aportaciones de los patronos del centro que permanecen estables y una serie de convenios firmados con diversas empresas o instituciones. El Centro tiene convenios específicos con el Servicio Andaluz de Salud, la empresa de producción y comercialización de radiofármacos, CURIUM, la empresa del sector aeroespacial ALTER y la Empresa Nacional de Residuos radiactivos ENRESA que proporcionan una proporción importante de la financiación del CNA, superior incluso a la proporcionada por los patronos.

A pesar de la pandemia, los grupos de investigación asociados al CNA continuaron con una alta productividad científica y cada vez más abriendo su investigación a nivel internacional. Las tres grandes grupos de investigación del centro poseen financiación continuada del Ministerio de Ciencia a través de proyectos de I+D, a la vez que han ido incrementado notablemente su participación en un elevado numero de proyectos financiados por la Unión Europea. Simplemente como ejemplo, citaremos que en este bienio la línea experimental para Física de Neutrones ha experimentado su total consolidación, con un papel muy relevante a nivel nacional, mientras que la línea de irradiación bien con fotones o bien con partículas ha experimentado una gran expansión en el número de usuarios externos y en su dimensión internacional. Otras líneas de investigación como las dedicadas a la espectrometría de masas con aceleradores, a la física nuclear básica, a la datación por ^{14}C , a la caracterización y diseño de detectores usando aceleradores de partículas, y a estudios del patrimonio histórico entre otras, ya consolidadas, han continuado produciendo y avanzando en sus investigaciones.

En enero del 2022 el CNA renovó su consideración como ICTS, pero debido a la entrada en el mapa de las ICTS del Centro de microanálisis de Madrid (CMAM) se constituyó una ICTS distribuida llamada IABA (Infraestructuras de Aplicaciones Basadas en Aceleradores). Dada la peculiaridad del CMAM, este cambio de status afecta únicamente a una de nuestras instalaciones, el acelerador Tandem de 3 MV, siendo necesario ya en el año 2024 ofrecer una oferta conjunta plenamente competitiva para esta infraestructura y la similar del CMAM, de tal forma que el usuario externo cuando solicite el uso de una instalación, conozca y elija libremente entre las instalaciones de la ICTS distribuida. Todas las demás infraestructuras seguirán trabajando de forma idéntica a años anteriores por no existir una similar en el CMAM.

El CNA tiene como ICTS las puertas abiertas a usuarios externos que deseen utilizar sus instalaciones, siempre que presenten un programa de investigación de calidad, avalado por el comité científico del Centro. Este acceso puede realizarse a través de los diversos servicios prestados por el Centro. El CNA mantiene un alto nivel de calidad en el uso de las instalaciones como prestadoras de servicio. Realizamos por ejemplo medidas por técnicas IBA, datación por radiocarbono, irradiación de componentes tecnológicos, caracterización de detectores, imagen TAC de objetos de interés arqueológico y medidas por AMS de las trazas de elementos radiactivos en muestras naturales. A ello hay que añadir la determinación de radiocarbono en marfiles como técnica forense, la medida por AMS de radionúclidos de vida larga en material procedente del desmantelamiento de centrales nucleares y las diversas aplicaciones de HISPANOS, nuestra fuente de neutrones. Investigadores, empresas, o particulares pueden enviar sus muestras al centro y obtener informes por procedimientos avalados por certificaciones de calidad. O pueden acceder al CNA y llevar a cabo sus experimentos bajo la guía y/o colaboración científica de Investigadores y Técnicos del Centro.

En el intervalo de tiempo cubierto por esta memoria la situación de inestabilidad de una parte del personal ha mejorado pero no en la magnitud que sería deseable. Se ha creado y cubierto una plaza de ayudante del CSIC, se ha cubierto a través de concurso oposición una plaza de técnico de grado II de la Universidad de Sevilla, no cubierta con anterioridad, y las dos bolsas de trabajo creadas el año 2019 se consolidaron a finales de 2023. Por otra parte un investigador del centro no estable, ha encontrado ya acomodo como PDI de la Universidad de Sevilla, con un plan de estabilización bien definido. El objetivo planteado desde mi toma de posesión de una mejora en la estabilidad debe continuar pues vigente, y existen perspectivas para que esta estabilidad aumente en este próximo bienio.

EL CNA, como centro de investigación de carácter público, ha dado por otra aparte una enorme importancia a que la sociedad conozca y valore la investigación científica realizada en el Centro. Por ello mantenemos un programa de divulgación muy activo.

Este plan de divulgación incluye visitas al Centro todos los viernes lectivos del año, principalmente alumnos de secundaria y bachillerato y participación en Ferias y semanas de la Ciencia. Adicionalmente cada vez más realizamos divulgación de los principales hitos científicos obtenidos en el Centro a través de diferentes redes sociales.

El próximo bienio va a caracterizarse por un hecho importante: el Centro cumplirá 25 años de existencia. Se celebrará algún acto oficial para conmemorar este hito. Y ello permitirá mostrar con la ayuda de todo el personal del centro, su madurez y consolidación. Y sobre todo permitirá mostrar como durante sus 25 años de existencia ha sido un centro abierto a la comunidad científica nacional e internacional para realizar investigaciones basadas en el uso de aceleradores de partículas.

Seguiremos trabajando para que ese objetivo se siga cumpliendo en su totalidad.

Rafael García-Tenorio
Director del CNA

Estructura y Personal/ Structure and Staff

Capítulo 1

Estructura y Personal/ Structure and Staff. Bienio 2021-2022

El CNA surge del acuerdo entre la Universidad de Sevilla, la Junta de Andalucía y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Una Junta Rectora del Centro, formada por representantes de las tres instituciones, marca las líneas generales del gobierno del Centro que ejecuta su Director. Existe, además, un Comité Científico, formado por científicos de prestigio nombrados a propuesta de las tres instituciones, que asesora al Director del CNA en la política científica del mismo y distribuye y ordena el uso de las infraestructuras del Centro.

El personal científico del Centro se distribuye en Unidades de Investigación, formadas por personal de distintas instituciones, y que se crean alrededor de las distintas infraestructuras y capacidades científicas del Centro. El citado personal desarrolla toda o buena parte de su actividad investigadora en el CNA. Además, existe una Unidad Técnica y de Servicios en la que se integra el personal de administración del Centro y el personal técnico de apoyo a los usuarios externos del CNA. Se describe a continuación el personal vinculado al centro en el bienio 2021-2022

The CNA was originated from an agreement among the Universidad de Sevilla, the Junta de Andalucía and the CSIC. The Governing Board of the Centre, constituted by spokesmen of the three institutions, indicates the general strategy and policy issues of the Centre, which are carried out by the CNA Director. There is also a Scientific Committee, with scientists proposed by the three institutions, which advices the Director on the scientific strategy and regulates the use of CNA facilities.

The scientific personnel of the Centre are distributed in Research Units, which have professionals from diverse institutions. These units are organized around the different infrastructures and capabilities of the Centre and the personnel carry out all or most of the research activity at CNA. Besides that, there is an Administration and Technical Unit which provides administrative and technical support to the Centre and to the external CNA users.

1.1. Dirección del Centro/ Centre Management.

Director: Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda

Vicedirector: Dr. José María López Gutiérrez

Gerente: Dr. Jerónimo Castilla Guerra

Subdirector Área Técnica: Dr. Celestino Ignacio Sánchez Angulo

Coordinador del Acelerador Tándem de 3 MV: Dr. Francisco Javier García López

Coordinador del Acelerador Tandetrón de 1 MV: Dr. José María López Gutiérrez

1.2. Junta Rectora/ Governing Board.

Dr. Carlos Juan Closa Montero, Vicepresidencia de Organización y Relaciones Institucionales(Consejo Superior de Investigaciones Científicas)
Dr. Julián Martínez Fernández, Vicerrector de Investigación (Universidad de Sevilla)
Dr. Manuel Felipe Rosa Iglesias, Vicerrector de Transferencia del Conocimiento (Universidad de Sevilla)
Dña. Rosa María Rios Sánchez, Secretaria General de Universidades, Investigación y Tecnología (Junta de Andalucía)
Dra. Teresa Serrano Gotarredona, Directora General de Investigación y Transferencia del Conocimiento (Junta de Andalucía)
Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda, Director del CNA
Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Gerente

1.3. Comité Científico/ Scientific Committee.

Dr. Miguel Ángel Aguirre Echanove, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
Dra. Dolores Cortina Gil, Departamento de Física de Partículas, Universidad de Santiago de Compostela.
Dra. Josefa Capel Martínez, Departamento de Prehistoria y Arqueología, Universidad de Granada.
Dr. Sebastián Cerdán García de Esteller, Instituto de Investigaciones Biomédicas “Alberto Sols”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
Dr. José Gonzalo de los Reyes, Instituto de Óptica “Daza de Valdés”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
Dr. Jordi Fraxedas Calduch, Centro de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
Dr. Daniel Cano Ott, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda, Director del CNA.
Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Gerente.

1.4. Personal del Centro/ Centre Staff.*

1.4.1. Unidad Técnica y de Servicios / Administration and Technical Unit

Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Gerente, Director de Servicio, Universidad de Sevilla.
Dr. Celestino Ignacio Sánchez Angulo, Titulado Superior, Director Técnico, Universidad de Sevilla.
D. Miguel Calderón Reyes, Gestor, Universidad de Sevilla.
D. Antonio Manuel Casado Sola, Técnico Auxiliar de Laboratorio, Universidad de Sevilla.
D. Ángel Jesús Romero Serrano, Titulado Grado medio para Aceleradores, Interino, Universidad de Sevilla.
D. Juan Alcalde García, Titulado de Grado medio para Aceleradores, Contrato CNA.
D. Francisco Calle Blanco, Titulado de Grado Medio para Informática, Contrato CNA.
D. Miguel Ángel Seller López, Titulado de Grado Medio para Aceleradores, Universidad de Sevilla
Dª. Patricia Zúñiga Ariza, Titulada Superior para Apoyo a la Administración, Contrato CNA.
Dª Mª Paz Guerrero Escalante, Gestora, Universidad de Sevilla.

Dª Rocío Rodríguez Rodríguez, Auxiliar Administrativo, Universidad de Sevilla.
D. David Pascual Álvarez, Titulado para aceleradores. Contrato CNA

1.4.2. Unidad de Investigación de Técnicas de Análisis y Modificación de Materiales con Haces de Iones / Ion Beam Analysis and Modification of Materials Research Unit.

Dr. Miguel Ángel Respaldiza Galisteo, Catedrático, Universidad de Sevilla.
Dr. Francisco Javier García López, Catedrático, Universidad de Sevilla.
Dr. Francisco José Ager Vázquez, Profesor Titular, Universidad de Sevilla.
Dra. Blanca María Gómez Tubio, Profesora Titular, Universidad de Sevilla.
Dra. Yolanda Morilla García, Titulada Superior para Investigación, Universidad de Sevilla.
Dr. Manuel García Muñoz, Investigador, Profesor Titular, Universidad de Sevilla.
Dra. Eleonora Viezzer, Investigadora, Profesora Titular, Universidad de Sevilla.
Dra. Inés Ortega Feliú, Investigadora, Programa Acceso Plan Propio Universidad de Sevilla.
Dr. Francisco Javier Ferrer Fernández, Titulado Superior para Investigación, Contrato CNA.
Dra. María del Carmen Jiménez Ramos, Contrato de acceso PDI, Universidad de Sevilla.
Dr. Juan Manuel Ayllón Guerola, Titulado Superior para Investigación, Proyecto Europeo.
D. Adrián García Osuna, Doctor.

1.4.3. Unidad de Irradiación Fotónica y de Partículas / Photonic and Particle Irradiation Unit.

Dra. Yolanda Morilla García, Titulada Superior para Investigación, Universidad de Sevilla.
D. Pedro Martín Holgado, Titulado para Investigación, Contrato CNA.
Dr. Francisco Javier García López, Profesor Titular, Universidad de Sevilla.
Dra. María del Carmen Jiménez Ramos, Contrato de acceso PDI, Universidad de Sevilla
Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda, Catedrático, Universidad de Sevilla.
Dª Amor Romero Maestre, Titulada para Investigación, Contrato CNA.

1.4.4. Unidad de Investigación en Física Nuclear Básica / Basic Nuclear Physic Research Unit.

Dr. Joaquín Gómez Camacho, Catedrático, Universidad de Sevilla.
Dr. José Manuel Espino Navas, Profesor Titular, Universidad de Sevilla.
Dra. Begoña Fernández Martínez, Titulada Superior para Investigación, Proyecto Emergente (IP).
Dr. Carlos Guerrero Sánchez, Profesor Titular, Universidad de Sevilla.
Dr. Juan Pablo Fernández García, Profesor Titular, Universidad de Sevilla.
D. Miguel Macías Martínez, Investigador
Dª. Ana Lucila Baratto Roldán, Investigadora Postdoctoral, Proyecto Europeo.
Dª. Teresa Rodríguez González, Investigadora Predoctoral.
Dª. M. Ángeles Millán Callado, Investigadora Predoctoral.

1.4.5. Unidad de Investigación Radiofarmacia e Imagen Médica/ Radiopharmacy and medical Image.

Dr. Ramón Risco Delgado, Profesor Titular, Universidad de Sevilla.
Dr. Marcin Balcerzyk, Titulado Superior para Investigación, Contrato CNA.
Dra. María del Carmen Jiménez Ramos, Contrato de acceso PDI, Universidad de Sevilla
D. Ángel Luis Parrado Gallego, Técnico de Laboratorio, Contrato CNA.
D. Alvaro Erhard García, Radiofarmaceutico, Contrato CNA.

1.4.6. Unidad de Investigación en Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS) / Accelerator Mass Spectrometry (AMS) Research Unit.

Dr. Manuel García León, Catedrático, Universidad de Sevilla.
Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda, Catedrático, Universidad de Sevilla.
Dr. José María López Gutiérrez, Catedrático, Universidad de Sevilla.
Dr. Guillermo Manjón Collado, Catedrático, Universidad de Sevilla.
Dr. José Luis Mas Balbuena, Profesor Titular, Universidad de Sevilla.
Dr. Francisco Javier Santos Arévalo, Titulado Superior para Investigación, CSIC.
Dra. Elena Chamizo Calvo, Titulado Superior para Investigación, Universidad de Sevilla.
Dª. Isabel Gómez Martínez, Titulado de Grado Medio para Investigación, Universidad de Sevilla.
D. Juan Ignacio Peruchena Fernández, Titulado Superior para Investigación, Contrato CNA.
D. Juan Alcalde García, Titulado Superior para Aceleradores, Contrato CNA.
Dª. Mercedes López Lora, Investigadora Predoctoral.
Dª. Victoria Lérida Toro, Titulado grado medio, Contrato CNA.
D. José Antonio Galván Moreno, Titulado para Investigación, Contrato CNA.
Dª. María Villa Alfajeme, Catedrático, Universidad de Sevilla.

1.4.7. Unidad de Cultura Científica y de la Innovación (UCC+i) / Outreach Unit (UCC+i).

Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Coordinador de la Unidad de Divulgación Científica.
D. Ramón Miguel De Soto Merchán, Titulado Divulgación Científica y Comunicación, Contrato CNA.
Dr. José Antonio Galván Moreno, Titulado Divulgación Científica, Contrato CNA.

1.5. Datos del Centro/ Centre Information.

Nombre/ Name	Centro Nacional de Aceleradores (CNA)
Dirección/ Address	Av. Thomas Alva Edison, nº7
Ubicación/ Location	Parque Científico y Tecnológico Cartuja/ Cartuja Science and Technology Park
Ciudad/City	Sevilla/ Seville
País/Country	España/ Spain
Código Postal/Postal Code	E-41092
Teléfono/ Phone	(+34)954.460.553
E-mail	cna@us.es
Web	www.cna.us.es
Tarifas por prestaciones de Servicios/ Prices of the Services offered by CNA	http://bit.do/tarifasCNA / http://bit.do/cnarates

Infraestructuras/ Facilities.

Capítulo 2

Infraestructuras/ Facilities.

El CNA es un Centro pionero de España en la instalación y puesta a disposición de la comunidad científica de aceleradores de partículas para investigación. El primer acelerador instalado data de 1998. Reafirmando su actividad pionera, desde ese momento y hasta ahora se han instalado tres nuevos aceleradores junto con las técnicas asociadas a los mismos, así como otras dos nuevas instalaciones. Actualmente, el CNA dispone de cuatro aceleradores para cumplir sus objetivos: un Acelerador de tipo Tándem van de Graaff de 3 MV, un Ciclotrón que proporciona protones de 18 MeV y deuterones de 9 MeV, un Acelerador de tipo Tándem Cockcroft-Walton de 1 MV, que trabaja como un espectrómetro de masas, y un Acelerador ultracompacto MiCaDaS (Mini Radiocarbon Dating System) aplicado para datación por ^{14}C . Las otras infraestructuras incorporadas al CNA han sido un escáner PET/TAC para humanos y un irradiador de ^{60}Co .

Con estos aceleradores se ponen a disposición de la comunidad investigadora herramientas de investigación únicas: técnicas IBA (Ion Beam Analysis) para la caracterización de materiales, técnicas de modificación e irradiación de materiales, irradiación con fotones, producción de radionucleidos PET (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F) y Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS) de la que deriva un servicio de datación por ^{14}C mediante AMS. El desarrollo de las técnicas que ponemos a disposición de la comunidad investigadora se facilita por la existencia de laboratorios de investigación asociados para la preparación de muestras dotados con material suficiente para llevar a cabo la mayoría de las preparaciones necesarias.

The CNA is a pioneering centre in Spain in the field of particle accelerators for research purposes. The first accelerator was installed at CNA in 1998 and nowadays three other accelerators and techniques associated to them are available and also two other facilities. Therefore, the CNA has 4 particle accelerators: a 3 MV van de Graaff Tandem Accelerator, a Cyclotron which supplies 18 MeV protons and 9 MeV deuterons, a 1 MV Cockcroft-Walton Tandem Accelerator used to mass spectrometry and a MiCaDaS (a small accelerator used to radiocarbon dating). The other facilities which have arrived at CNA are a Human Scanner PET/CT and a ^{60}Co Irradiator.

These accelerators provide a series of unique research tools to the scientific community: Ion Beam Analysis (IBA) for material characterization, modification and irradiation of materials, irradiation with photons, production of radionuclides (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F) for Positron Emission Tomography (PET) and the Accelerator Mass Spectrometer (AMS) that includes a ^{14}C dating service using AMS. At CNA, there are also research laboratories for sample preparation that facilitate the application of the presented techniques.

2.1. Acelerador Tándem de 3MV/ 3MV Tandem Accelerator.

En 1998 llegó al CNA el primer acelerador de iones instalado en España. Se trata de un acelerador Tándem de tipo Pelletron (Figura 3.1), modelo 9SDH-2, de la compañía National Electrostatics Corporation (NEC), que permite trabajar con voltajes de terminal entre 200 kV y 3 MV. El acelerador está conectado a 3 fuentes de iones negativos y es capaz de producir haces de prácticamente cualquier ion estable, tanto en modo continuo como pulsado, en un amplio rango de energías y corrientes hasta varios A. Esto lo convierte en una herramienta muy versátil, en la cual se realiza una investigación muy variada, que abarca desde la caracterización y modificación de materiales mediante el uso de técnicas con haces de iones e implantación iónica, la producción de neutrones mediante reacciones nucleares, ensayos controlados de irradiación en componentes electrónicos y estudio y desarrollo de instrumentación nuclear, fundamentalmente detectores de radiación.

Los iones se obtienen de tres fuentes. La Alphatross, basada en el uso de radiofrecuencias a partir de gases (H, He, N,...), produce iones negativos mediante un canal de intercambio de carga de Rb. La fuente SNICS se basa en el bombardeo de blancos sólidos con iones de CS y es capaz de crear haces de gran parte de los elementos de la Tabla periódica, desde H hasta Au. Finalmente disponemos de una fuente tipo Duoplasmatron, basada en la ionización de un gas mediante un arco de descarga, la cual proporciona un haz de mayor brillo que las anteriores. Las fuentes están conectadas al acelerador mediante un deflector magnético que selecciona la masa deseada.

En un tanque de aceleración, mediante transporte mecánico de carga con pellets, se aceleran los iones seleccionados previamente, siendo el voltaje máximo en el terminal de 3 MV. Con el conjunto de herramientas necesarias (deflectores magnéticos y electrostáticos, cuadropolos, monitores de perfil de haz y jaulas de Faraday), el haz de iones se dirige, focaliza y se monitoriza tras su paso por el acelerador. Tras atravesar por un imán analizador de 90°, el haz puede pasar directamente a la línea de 0° o puede ser desviado por otro electroimán hacia una de las otras cinco líneas de trabajo disponibles.

Para la detección de iones, fotones y neutrones se cuenta con detectores de Si de implantación iónica, un espectrómetro de alta resolución que funciona en el rango visible, detectores SiLi y LEGe para rayos X, un centelleador de NaI(Tl) y diversos Ge hiper puros para rayos gamma y detectores de tipo Li-glass y EJ-301 para neutrones térmicos y rápidos, respectivamente.

In 1998 the first ion accelerator installed in Spain arrived at the CNA. It is a Pelletron-type tandem accelerator (Figure 3.1), model 9SDH-2, from the National Electrostatics Corporation (NEC), which allows working with terminal voltages between 200 kV and 3 MV. The accelerator is connected to 3 negative ion sources and is capable of producing beams of virtually any stable ion, both in continuous and pulsed mode, over a wide range of energies and currents up to several A. This makes it a very versatile tool, in which a wide variety of research is carried out, ranging from the characterization and modification of materials using ion beam and ion implantation techniques, the production of neutrons through nuclear reactions, controlled irradiation tests on electronic components, and the study and development of nuclear instrumentation, mainly radiation detectors.

Ions are obtained from three sources. The Alphatross, based on the use of radio frequencies from gases (H, He, N, ...), produces negative ions by means of a Rb charge exchange channel. The SNICS source is based on the bombardment of solid targets with CS ions and is capable of creating beams of most of the elements of the Periodic Table, from H to Au. Finally, we have a Duoplasmatron type source, based on the ionization of a gas by means of an arc discharge, which provides a brighter beam than the previous ones. The sources are connected to the accelerator by means of a magnetic deflector that selects the desired mass. In an acceleration tank, by means of mechanical charge transport with

pellets, the previously selected ions are accelerated, the maximum terminal voltage being 3 MV. With the necessary set of tools (magnetic and electrostatic deflectors, quadrupoles, beam profile monitors and Faraday cages), the ion beam is directed, focused and monitored after passing through the accelerator. After passing through a 90° analyzer magnet, the beam can be sent directly to the 0° line or can be diverted by another electromagnet to one of the other five available working lines

For ion, photon and neutron detection there are ion implantation Si detectors, a high resolution spectrometer operating in the visible range, SiLi and LEGe detectors for X-rays, a NaI(Tl) scintillator and various High Purity Ge for gamma rays, and Li-glass and EJ-301 type detectors for thermal and fast neutrons, respectively.



Figura 2.1: Acelerador Tándem de 3 MV / 3 MV Tandem Accelerator

2.1.1. Líneas de haz/ Beam lines

Actualmente, el acelerador Tándem dispone de seis líneas de haz disponibles para caracterizar y modificar materiales, así como para realizar investigaciones en Física Nuclear Básica.

A continuación, se da una breve descripción de las diferentes líneas (Figura 2.2):

Línea de -30°: Línea de Física Nuclear Básica. En esta línea se desarrollan y se prueban elementos de instrumentación nuclear (detectores, electrónica, etc.) que posteriormente se utilizarán en instalaciones internacionales de Física Nuclear.

Línea de -15°: Microsonda Nuclear. El sistema de focalización está fabricado por Oxford Microbeam Ltd. Con este sistema es posible incidir sobre la muestra con un haz de pocas micras. El modo de barrido permite obtener mapas elementales que dan a conocer la distribución espacial de concentraciones en la muestra. Las bobinas del sistema de barrido permiten un área máxima de barrido de $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ para protones de 3 MeV.

Línea de 0°: Cámara multipropósito. Esta cámara ha sido diseñada para realizar simultáneamente experimentos mediante RBS, PIXE, NRA y PIGE. Un conjunto de detectores de fotones y de partículas se usan para combinar todas estas técnicas IBA.

Línea de 0°: Cámara de ionoluminiscencia. Conectada a la cámara multipropósito, esta cámara de vacío está equipada con paredes revestidas de negro, un sistema calefactor, un monitor de control de temperaturas y un sistema de diagnóstico fotónico que permite realizar principalmente estudios de ionoluminiscencia. Además, varios puertos de acceso permiten la ubicación de detectores para realizar experimentos IBA con temperaturas hasta 500 °C.

Línea de +15°: Cámara de irradiación. Esta cámara diseñada en el CNA tiene como objetivo la irradiación de grandes superficies ($16 \times 20 \text{ cm}^2$) barridas por el haz mediante un deflector magnético.

Línea de +30°: Cámara de canalización. Esta línea está principalmente dedicada al estudio mediante canalización iónica de muestras cristalinas. Mediante un sistema telescopico formado por un sistema de dos rendijas se consigue un haz paralelo muy bien definido. Cada una de las rendijas tiene cuatro componentes de tántalo. El portamuestras está montado con un goniómetro de precisión que permite movimientos en los cuatro ejes, direcciones X e Y y dos ángulos de giro.

Línea de +45°: Haz externo. Los estudios de Arte y Arqueometría son el objetivo principal de esta línea. Debido a la heterogeneidad natural de este tipo de objetos, es obvio que el uso de un haz externo combinado con una buena resolución presenta grandes ventajas en el análisis. Para obtener una buena resolución espacial (60 μm), se han adquirido un conjunto de elementos fabricados por Oxford Microbeams, incluida una abertura que se define con cuatro slits de precisión y una nariz de salida con un ajuste micrométrico

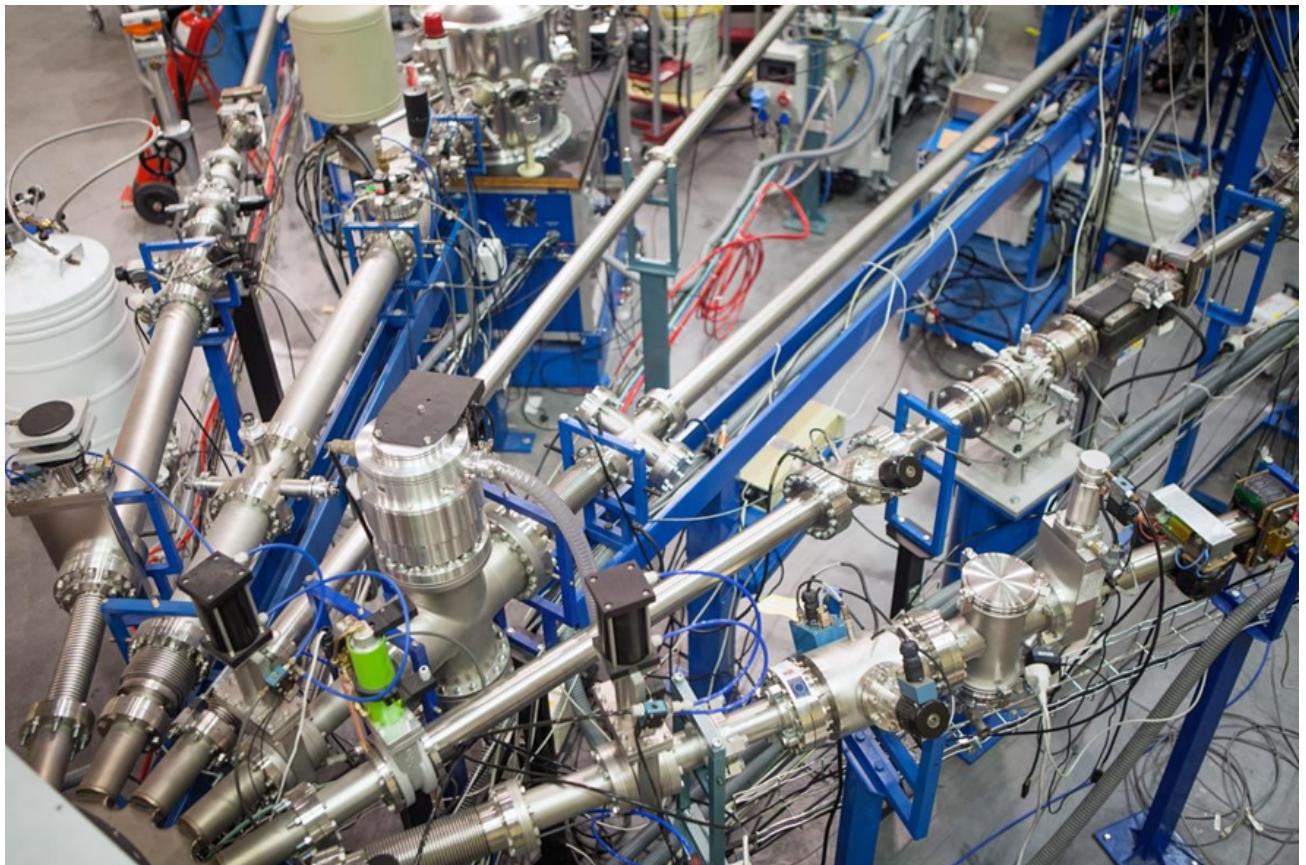


Figura 2.2: Líneas de haz/ Beam lines

Currently, the Tandem accelerator has six beamlines to characterize and modify materials, as well as to perform research in Basic Nuclear Physics.

A brief description of the different lines is given below (Figure):

-30° Beam Line: Nuclear Physics Beam Line. This line develops and tests nuclear instrumentation elements (detectors, electronics, etc.) that will later be used in international nuclear physics facilities.

-15° Beam Line: Microbeam Chamber. The microprobe focusing system was manufactured by Oxford Microbeam Ltd. It is possible to form a spot of a few microns on the specimen with this system. Elemental maps that provide the spatial distribution concentration in the samples are obtained with the scanning mode. The scanning coils allow a maximum scanning area of $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ for 3 MeV protons. Nowadays, this line is in an upgrade process.

0° Beam Line: Multipurpose IBA Chamber. This chamber has been designed to simultaneously perform experiments using RBS, PIXE, NRA and PIGE. A set of photon and particle detectors are used to combine all these IBA techniques.

0° Beam Line: Ionoluminescence Chamber. Connected to the multipurpose chamber, this vacuum chamber is equipped with black coated walls, a heating system, a temperature control monitor and a photonic diagnostic system that allows mainly ionoluminescence studies to be performed. In addition, several access ports allow the location of detectors for IBA experiments with temperatures up to 500 °C

+15° Beam Line: Ion irradiation Chamber. This chamber designed at CNA allows the irradiation of large surfaces ($16 \times 20 \text{ cm}^2$) swept by the beam by means of a magnetic deflector.

+30° Beam Line: Channeling Chamber. This line is mainly dedicated to the study by ion channeling of crystalline samples. By means of a telescopic system formed by a system of two slits, a very well defined parallel beam is obtained. Each slit has four tantalum components. The sample holder is mounted with a precision goniometer that allows movements in all four axes, X and Y directions and two rotation angles

+45° Beam Line: External Beam. Art and Archaeometry studies are the main focus of this line. Due to the natural heterogeneity of this type of objects, it is obvious that the use of an external beam combined with a good resolution presents great advantages in the analysis. To obtain a good spatial resolution ($\gtrsim 60 \mu\text{m}$), a set of elements manufactured by Oxford Microbeams has been acquired, including a system of magnetic quadrupoles, an aperture that is defined by four precision slits and an exit nose with a micrometric adjustment.

2.1.2. Otras líneas/Other lines

Línea de baja energía. La línea de baja energía o cámara de baja energía es una nueva cámara de vacío que se ha instalado en CNA. Se encuentra ubicada a la salida de las fuentes de iones, justo después del imán inyector, y antes del tanque de aceleración. La línea está equipada con un manipulador lineal de transferencia para controlar la posición y la orientación de las muestras. Un conjunto de dos colimadores situados a la entrada de la cámara permiten obtener un tamaño de haz de 1 y 10 mm de diámetro, respectivamente.

Esta línea emplea iones de energía mucho menor de la que se puede obtener con el acelerador Tándem, aprovechando directamente la energía de inyección de las fuentes de iones, típicamente entre 30 y 80 keV, y se utiliza en experimentos de implantación iónica o en el análisis de materiales centelleadores mediante la técnica de ionoluminiscencia utilizados en experimentos de fusión.

Low energy beamline. The low energy line or low energy chamber is a new vacuum chamber that has been installed at CNA. It is located at the output of the ion sources, just after the injection magnet and before the acceleration tank. The line is equipped with a linear transfer manipulator to control the position and orientation of the samples. A set of two collimators allows obtaining an ion beam size of 1 and 10 mm of diameter, respectively.

This beamline will employ ions with energies between 30 and 80 keV, used for ion implantation experiments and for the analysis of scintillators materials used in fusion experiments, by the ionoluminescence technique at low energies.

Línea HISPAÑoS: Es la primera instalación de neutrones generados por acelerador en España. En los últimos años se ha instalado en la línea experimental de Física Nuclear Básica (FNB) la primera fuente de neutrones basada en haces de iones en España: HISPAÑOS (HISPAlis Neutron Source).

En HISPAÑOS se emplean haces de protones o deuterio de baja energía para producir neutrones mediante reacciones nucleares. Es un método muy bien conocido, y de este modo, en HISPAÑOS, se producen:

- neutrones epítérmicos (decenas de keV) a través de la reacción $^7\text{Li}(\text{p},\text{n})$
- Neutrones rápidos (3-8 MeV) utilizando la reacción de fusión D(d,n)
- Neutrones térmicos (termalizando/moderando cualquiera de los anteriores).

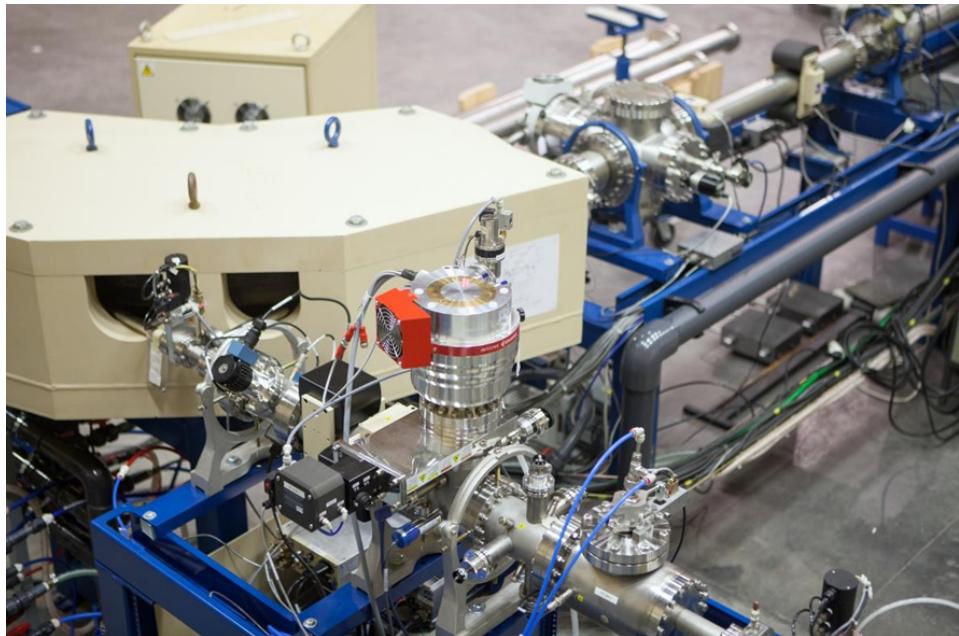


Figura 2.3: HISPAÑOS (HISPAlis Neutron Source)

Los neutrones epítérmicos tienen un gran interés en astrofísica para la medida de secciones eficaces de las reacciones implicadas en los procesos de la nucleosíntesis estelar y para la validación de datos nucleares para diferentes aplicaciones.

En cuanto a la fuente de neutrones rápidos, presenta un interés tanto en tecnología nuclear, como para caracterización de detectores e irradiación de componentes para tecnología aeroespacial.

Adicionalmente, debido al potencial mostrado y al interés de la comunidad científico y tecnológica por el uso de HISPAÑOS, el CNA propuso y consiguió fondos para el proyecto “Línea de neutrones en

el CNA” en una Convocatoria de Infraestructura Científico-Tecnológica del Ministerio de Economía y Competitividad. El proyecto consistió en la actualización del acelerador tandem para poder tener el primer y único haz pulsado de neutrones en España. Esto implicó la instalación de un sistema de pulsado (chopper) y compresión (buncher) del haz de iones, además de la instalación de una nueva línea experimental dedicada a la investigación con haces pulsados de neutrones mediante la técnica de tiempo-de-vuelo, la nueva Línea de Neutrones (LN).

Los haces pulsados cubren una amplia variedad de campos dentro de la física nuclear. La pulsación añade información temporal a otras como son la precisión en la energía, en la dirección o en la posición. En particular, en el caso de la física de neutrones, la información del tiempo (time-of flight: TOF) transcurrido entre la producción de los neutrones y el momento en que uno de ellos induce una determinada reacción (sea sobre un blanco o sobre un detector) da información sobre la velocidad del neutrón y por tanto permite determinar su energía cinética.

La actualización del acelerador por parte de la empresa NEC (National Electrostatics Corp) finalizó durante 2018 con la completa instalación de la nueva línea experimental de neutrones situada a 0° respecto al tanque de aceleración del acelerador y el sistema de pulsado y compresión del haz y desde entonces está completamente operativa. Las principales características de los haces de neutrones pulsados de HISPAÑOS se pueden resumir en:

- Anchura temporal del pulso de protones, 1-3 ns
- Frecuencia del pulso variable: 2MHz, 1MHz, 750kHz, 500kHz, 250kHz, y otros.
- Distancia de tiempo de vuelo de los neutrones: desde 30 a 200 cm.
- Rangos energéticos, sin termalizar, desde 100 eV a varios MeV.

HISPAÑoS: the first accelerator-based neutron facility in Spain. Few years ago the Spanish National Accelerator Lab (CNA) developed the first accelerator-based neutron facility in Spain, HiSPANoS (Hispalis Neutron Source).

Low energy proton or deuterium ion beams are used at HISPAÑoS to produce neutrons by nuclear reactions. It is a very well-known method, and thus, is possible to deliver:

- Epithermal neutrons (tens of keV) by means of the $[^7\text{Li}(\text{p},\text{n})]$ reaction
- Fast neutrons with energy less than 9 MeV produced by $\text{D}(\text{d},\text{n})$ fusion reaction
- Thermal neutrons (thermalizing any of the above).

Epithermal neutrons have a great interest in astrophysics for the cross section measurements of the reactions involved in the stellar nucleosynthesis processes and for the validation of nuclear data for different applications.

On the other hand, fast neutrons have interest in nuclear technology, as well as characterization of detectors and irradiation of components for aerospace technology.

Due to the interest of the international scientific and technological community to use HISPAÑoS, CNA got research funds for the project “Neutron Line at CNA”. The project consisted of the tandem accelerator update to have the first pulsed neutron beam in Spain. This update includes the installation of the buncher and chopper system and a new experimental line (LN) dedicated to the pulsed neutron beams research through the time-of-flight technique.

The pulse adds temporal information to others such as the precision in the energy, in the direction or in the position. In particular, in the case of neutron physics, the information of the time

(time-of-flight: TOF) between the production of the neutrons and the moment in which one of them induces an adequate reaction (in a target or in a detector) gives information about the speed of the neutron and therefore allows to determine its kinetic energy.

The accelerator update by the NEC (National Electrostatics Corp) company has been finished during 2018 with the installation of the new experimental neutron line located at 0° respect to the acceleration tank and the buncher and chopper system and since then, it is fully operative. The main characteristics of the pulsed neutron beams of HISPANOS can be summarized as follows:

- Protons pulse width, 1-3 ns
- Variable pulse frequency: 2 MHz, 1 MHz, 500 kHz, 250 kHz and others
- Neutron time of flight distance: from 30 cm to 200 cm
- Energy range (without thermalizing) from 100 eV to several MeV

2.1.3. Técnicas disponibles en el Acelerador Tándem 3 MV / Available techniques at 3 MV Tandem Accelerator

IBA es un término genérico que engloba un conjunto de técnicas específicas, de las cuales las principales son:

- Espectrometría de Retrodispersión Rutherford (RBS).
- Análisis por Detección de Retrocesos Elásticos (ERDA).
- Análisis por Reacciones Nucleares (NRA).
- Emisión de Rayos- γ Inducidos por Partículas (PIGE).
- Emisión de Rayos-X Inducidos por Partículas (PIXE).

Cuando una muestra se expone a un haz de iones, se inducen diferentes procesos atómicos y nucleares. Como fruto de estos procesos se generan varios productos, y cada producto aporta información sobre las propiedades del material (composición, estructura, etc.)

Las aplicaciones fundamentales de las técnicas IBA son:

Espectrometría de Retrodispersión Rutherford (RBS). La técnica de análisis RBS es multielemental y no-destructiva. Mediante RBS es posible conocer la composición elemental (estequiometría) sin estándar y obtener los perfiles elementales de concentración en profundidad. También pueden conocerse las impurezas superficiales y la distribución de impurezas en profundidad. Se pueden medir espesores de láminas delgadas y de interfasas. Mediante el uso de Canalización-RBS se pueden determinar la localización de impurezas en la red de un monocrystal, así como la distribución de defectos en profundidad en el mismo.

Análisis por detección de retrocesos elásticos (ERDA). Esta técnica se basa en los fundamentos físicos de la dispersión elástica. En ella se utilizan haces de iones pesados para recoger los núcleos ligeros en retroceso que salen de la muestra. ERDA es una técnica eficiente para obtener perfiles en profundidad con alta resolución.

Análisis por Reacciones Nucleares (NRA)/Emisión de Rayos- γ Inducidos por Partículas (PIGE). Con el análisis mediante reacciones nucleares (NRA) se obtienen los perfiles en profundidad de elementos ligeros de forma no destructiva, y elementos como el H, D, Li, B, C, O y el F pueden ser

analizados. Es una técnica complementaria al RBS, pero el análisis por reacciones nucleares es isotópicamente sensible. Entre los productos de una reacción nuclear puede aparecer radiación gamma, y entonces es posible realizar PIGE. PIGE se usa normalmente para medir Na, Mg, Al, Si y P.

Emisión de Rayos-X Inducidos por Partículas (PIXE). La técnica PIXE es no destructiva y se emplea para obtener información multielemental tanto de elementos mayoritarios como de elementos traza. Se combina con RBS para obtener de forma más precisa la caracterización de elementos con una Z intermedia hasta elementos pesados, y se combina con NRA y PIGE para estudiar elementos de Z < 12.

En estos últimos años hemos desarrollado dos nuevas técnicas de análisis no disponibles hasta ahora en el CNA, la Ionoluminiscencia (IL) y la Carga Inducida mediante Haz de Iones (IBIC). La IL consiste en el análisis de la luz emitida por un material bombardeado con un haz de iones y la IBIC permite estudiar propiedades de transporte en detectores semiconductores.

Además de estas técnicas de análisis, se dispone de capacidad para la modificación de materiales. Esto ofrece posibilidades de trabajo muy atractivas. Hay que resaltar que la implantación iónica ha supuesto una revolución en campos como la microelectrónica, la metalurgia o la fabricación de implantes biológicos. La mayoría del trabajo llevado a cabo en este dominio ha sido realizado con pequeños aceleradores electrostáticos que aceleran los iones desde algunas decenas hasta algunas centenas de keV. Hoy en día, va tomando cada vez más interés la implantación a más altas energías (algunos MeV), permitiendo obtener perfiles de implantación más profundos. La línea de implantación del CNA permite realizar trabajos de irradiación de materiales para el posterior análisis de los efectos producidos por irradiación.

IBA is a broad term that covers several specific techniques, mainly:

- Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS).
- Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA).
- Nuclear Reaction Analysis (NRA).
- Particle Induced γ -Ray Emission (PIGE).
- Particle Induced X-Ray Emission (PIXE) Analysis.

Different atomic and nuclear processes are induced when the samples are exposed to the ion beam. In these processes, several products are induced and each product provides information about material properties (composition, structure, etc.) The fundamental applications of the IBA techniques are:

Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS). RBS is a non-destructive and multielemental analysis technique. With RBS, it is possible to obtain elemental depth profiles and to determine elemental compositions (stoichiometry) without using standards. Furthermore, surface impurities and in-depth impurity distribution can be established. The thickness of thin films and interfaces can also be measured with RBS. On the other hand, the lattice location of impurities and the defect distribution depth profile in single crystalline samples are determined by Channelling-RBS.

Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA). This technique is based on the physical principles of elastic scattering. It requires heavier ions in the beam in order to recoil light nuclei from the sample. ERDA is an efficient technique for high resolution depth profiling.

Nuclear Reaction Analysis (NRA)/ Particle Induced γ -Ray Emission (PIGE). Light-element depth profiles are obtained non-destructively with NRA and elements such as H, D, Li, B, C,

O and *F* can be analyzed. This technique is complementary to RBS, but NRA is isotopically sensitive. It is possible to carry out PIGE if gamma radiation is one of the NRA products. PIGE is usually employed in *Na*, *Mg*, *Al*, *Si* and *P* measurements.

Particle Induced X-Ray Emission (PIXE) Analysis. PIXE is a non-destructive technique which is used to obtain multielemental information of trace elements and major elements. It is used jointly with RBS for accurate mass identification of medium to heavy elements with similar masses and with NRA and PIGE for the study of elements with $Z < 12$.

In the last years we have developed two new techniques not available at the CNA. The Ionoluminescence (IL), which analyses the light emitted by a sample bombarded with an ion beam and the Ion Beam Induced Charge (IBIC), which allows the study of transport properties in semiconductor detectors.

Besides these analysis techniques, the centre has capability for modification of materials. It should be highlighted that ion implantation has supposed a revolution in microelectronics, metallurgy or the manufacturing of biological implants. Most of the work in this field has been carried out with small electrostatic accelerators that accelerate ions from some tens to some hundreds of keV. Nowadays, the implantation at higher energies (some MeV) is becoming more and more important because it affords deeper implantation profiles. The CNA implantation line allows material irradiation work and the analysis of the effects produced by the bombardments.

2.1.4. Laboratorios asociados al Acelerador Tándem de 3 MV/ 3 MV Tandem Accelerator Laboratories

El Centro Nacional de Aceleradores dispone de distintos laboratorios de investigación, así como de preparación de muestras asociados al Acelerador Tándem de 3 MV. A continuación, se describen estos laboratorios:

Laboratorio de Fluorescencia y Transmisión Gamma Este laboratorio cuenta con una serie de fuentes radioactivas y de tubos de Rayos-X asociados a distintos proyectos del grupo de investigación de Física Nuclear Aplicada.

Este equipamiento está dedicado al estudio de diferentes objetos y materiales, especialmente en el campo del Arte y de la Arqueometría. Esto permite realizar análisis independiente o complementario a los análisis llevados a cabo en el acelerador Tándem.

Las dos técnicas de las que se dispone son Fluorescencia por Rayos-X (XRF) y Transmisión de Rayos-Gamma (GRT).

La técnica de Fluorescencia de Rayos-X, XRF, es una técnica no destructiva similar a PIXE pero de menor coste y con equipos portátiles. Permite conocer la composición elemental superficial de las muestras. Se dispone de distintos equipos portátiles convencionales, con haces primarios de milímetros de diámetro, en geometrías horizontal y vertical. Se cuenta también con equipos de microfluorescencia de Rayos X portátiles que focalizan el haz primario de Rayos X a dimensiones de unas 30 micras. También se cuenta con un equipo de microfluorescencia confocal portátil que permite estudios de composición con una resolución en profundidad de unas 50 micras.

La técnica de Transmisión de Rayos-Gamma, GRT, es una técnica no destructiva complementaria tanto para XRF como, incluso, para PIXE. Basada en la atenuación que sufren los rayos gamma al atravesar la muestra, proporciona información complementaria sobre la composición elemental vo-

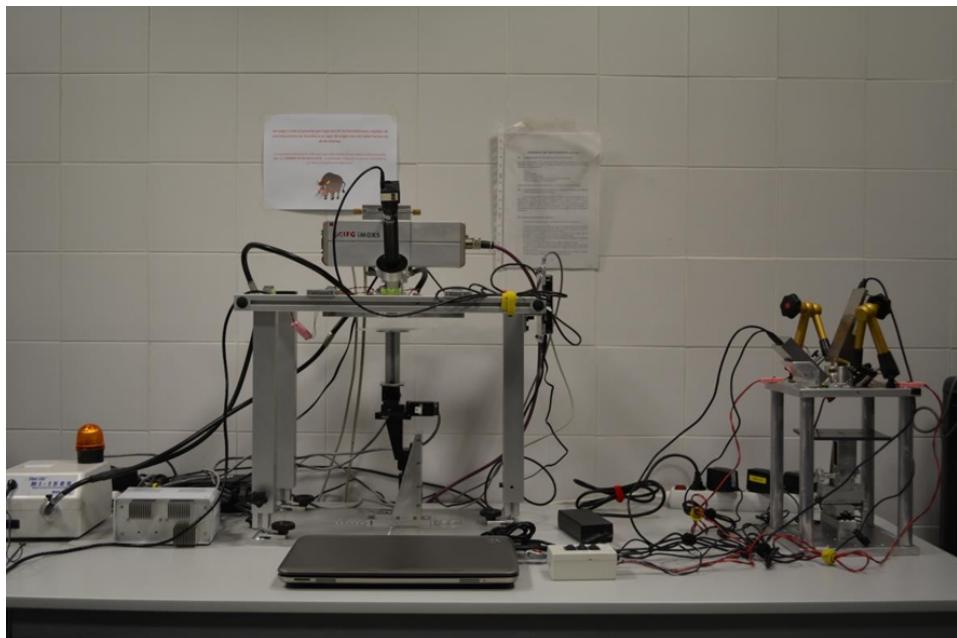


Figura 2.4: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos-X y Transmisión de Rayos-Gamma / X-Ray Fluorescent and Gamma-Ray Transmission Laboratory

lumétrica de dicha muestra. Se ha diseñado y construido recientemente un nuevo equipo portátil de transmisión gamma con un blindaje mucho más compacto que el anterior, que utiliza un detector de TeCd junto con una nueva fuente multigamma de ^{133}Ba , además de la fuente de ^{241}Am del equipo de laboratorio anterior.

X-Ray Fluorescence and Gamma-Ray Transmision Laboratory

This laboratory utilizes radioactive sources and X-Ray tubes that are associated to several research projects of the Nuclear Applied Physics group.

This laboratory is devoted to the study of objects and materials, especially in the fields of Art and Archaeometry. The use of such equipment makes possible the analysis of materials independently or complementarily to the use of the Tandem accelerator.

In this laboratory, two techniques are applied: XRF and GRT.

X-Ray Fluorescence, XRF, is a non-destructive technique similar to PIXE but with portable equipment and low cost. It allows to know the superficial elementary composition of the sample. Different conventional portable equipment is available, with primary beams of millimeters in diameter, in horizontal and vertical geometries, as well as portable X-ray microfluorescence equipment that focus the primary X-ray beam to dimensions of about 30 microns, and also a portable confocal microfluorescence equipment that allows composition studies with a depth resolution of about 50 microns.

Transmission Gamma-Ray Technique, GRT, is a non-destructive technique, such as XRF, and complementary to XRF and PIXE. It is based on attenuation that gamma rays suffer when they cross the sample and it give us complementary information about volumetric elemental composition of this sample. A new portable gamma transmission equipment with much more compact shielding than the previous one has recently been designed and built, using a TeCd detector in conjunction with a new ^{133}Ba multigamma source, in addition to the ^{241}Am source from the previous laboratory equipment.

Laboratorio de Detectores.

El laboratorio de detectores cuenta con una cabina de pesada para muestreo de la empresa TELSTAR.



Figura 2.5: Laboratorio de Detectores / Detectors Laboratory

Esta cabina es capaz de generar un ambiente de trabajo considerado limpio a través de un flujo de aire laminado que permite trabajar con detectores abiertos y manipular con más seguridad sus distintas piezas componentes, en un ambiente aislado, minimizando los riesgos de ruptura o contaminación de dichas piezas por distintos tipos de accidentes o por la presencia de impurezas en el ambiente. El laboratorio también cuenta con distintas equipos y herramientas para operar o montar partes de ciertos prototipos de detectores de partículas, principalmente los mini prototipos de detectores de electrones secundarios (SED) de gas a baja presión.

El objetivo es seguir equipando este laboratorio, en los próximos años, siguiendo las prioridades y necesidades del mismo, dentro de los presupuestos del CNA.

Detectors Laboratory.

Detectors laboratory has a weighing and protection cabinet by TELSTAR, capable of generating a considered working environment clean. A laminated airflow allows working with open detectors and manipulating with more security different parts inside an isolated environment. In that way, it can be minimized the risks of rupture or contamination of such parts by different types of accidents or by the presence of impurities in the environment. The laboratory also has different equipments and tools to operate or ride parts of certain prototypes of particle detectors, primarily mini prototypes of secondary electron detectors at low pressure (SED).

The aim is further equipping this laboratory in the coming years, according to priorities and needs, within the budgets of the CNA.

Laboratorio de Electrónica Multipropósito.

Actualmente, el laboratorio dispone de un sistema básico de simulación de circuitos por ordenador, diseño e incluso montaje y reparación de placas de circuitos impresos (printed circuit boards-PCB), principalmente aquéllas referentes a electrónica que pueden ser probadas como parte de la instrumentación nuclear asociada a los detectores de partículas.

El laboratorio cuenta con un osciloscopio de última generación, con alta velocidad, frecuencia de muestreo y memoria, de la empresa Le Croy. También se ha adquirido una estación de soldadura versátil con extracción de humo acoplada. El laboratorio dispone de fuentes de alimentación y corriente, un generador de pulsos, además de la obtención de licencias para operar con distintos tipos

de “software” en un ordenador instalado en el propio laboratorio.

Multipurpose Electronic Laboratory

Presently, the laboratory has got different systems for electrical simulations and design software, development of printed circuit boards (PCB), soldering, improvement and testing. In fact, it will be possible to implement all the steps for developing electronics front-ends for particle tracking detectors.

Nowadays, different electrical instrumentation, such as high speed and sampling oscilloscope, power supply, arbitrary function generator, millimetre, is available, in the multipurpose electronics laboratory at CNA. There is a digital soldering/desoldering station with fume extraction, too. Different cables and connectors may be used as well as a personal computer where electrical licensed software is installed.

Laboratorio de preparación de muestras del Acelerador Tándem de 3 MV.

A pesar de que generalmente las muestras que se analizan por técnicas IBA no necesitan de una exhaustiva preparación, el laboratorio asociado al acelerador Tándem de 3 MV dispone del equipamiento necesario para realizar diversos tratamientos a las muestras, previos a su estudio, fundamentalmente a muestras minerales, biológicas y medioambientales.

Entre el equipamiento propio del laboratorio cabe destacar: el molino de bolas, morteros de ágata y prensa para la molienda, homogeneización y prensado; una pulidora con diferentes paños para el pulido de muestras; un horno para el calcinado de las mismas y una liofilizadora. Por otro lado, dispone de diversos productos químicos propios de laboratorio y patrones de referencia de diversa naturaleza, tales como material biológico, cenizas o suelos, entre otros.

Sample preparation Laboratory

Generally the samples which are measured by IBA techniques do not need exhaustive preparation. Nevertheless, the 3 MV Tandem Accelerator Laboratory has the necessary equipment to carry out different treatments to the samples before they are studied, mostly in mineral, biological and environmental samples

The laboratory has own equipment such: a ball grinder, an agate mortars and a press for grinding, homogenization and pressing; a polisher with different laminas for the sample polishing; an oven for the sample calcining and a freeze drier. Also, the laboratory has various chemical products and reference standards, such as blood, ashes, soil...

2.2. Ciclotrón/ Cyclotron.

El Ciclotrón fue el segundo acelerador de partículas que se instaló en el Centro Nacional de Aceleradores (año 2004). Este tipo de acelerador consigue acelerar iones en órbitas de radio y energía crecientes mediante la aplicación combinada de un campo eléctrico oscilante y de un campo magnético. Se trata de un ciclotrón Cyclone 18/9 fabricado por Ion Beam Applications (IBA, Bélgica), capaz de acelerar protones y deuterones a 18 y 9 MeV, respectivamente. Las intensidades de corriente máximas que pueden ser extraídas en el blanco son de $80 \mu\text{A} \pm 10\%$ para protones y de $35 \mu\text{A} \pm 10\%$ para deuterones.

Este acelerador permite la irradiación sobre un único blanco o simultáneamente con la misma partícula sobre dos blancos diametralmente opuestos (Dual Beam Mode). Este acelerador cuenta con ocho puertos de irradiación, de los cuales siete están dedicados a la producción de radionúclidos emisores de positrones. De esta forma, el CNA ofrece la posibilidad de producir los radioisótopos

más empleados en la modalidad de imagen médica PET (Tomografía por Emisión de Positrones).



Figura 2.6: Ciclotrón 18/9 MeV del CNA / Cyclotron 18/9 MeV at CNA

La descripción de los blancos dispuestos en los ocho puertos disponibles es la siguiente:

- Blanco de gran volumen (2 ml) con agua enriquecida en ^{18}O en su interior ($[^{18}\text{O}]\text{-H}_2\text{O}$, pureza 95 % en ^{18}O), para producir ^{18}F en forma de $[^{18}\text{F}]\text{-Fluoruro}$ mediante la reacción $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$.
- Dos blancos de volumen grande (2 ml), con las cavidades fabricadas en niobio y llenos de agua enriquecida en ^{18}O ($[^{18}\text{O}]\text{-H}_2\text{O}$, pureza 95 % en ^{18}O). Están destinados también a la producción de ^{18}F en forma de $[^{18}\text{F}]\text{-Fluoruro}$ mediante la reacción nuclear $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$.
- Blanco de 1,7 ml relleno de una mezcla agua-etanol para la obtención dentro del blanco de ^{13}N en forma de $[^{13}\text{N}]\text{-Amoniaco}$ mediante la reacción $^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)^{13}\text{N}$.
- Blanco de 30 ml que contiene $^{18}\text{O}_2$ y utilizado en la obtención de ^{18}F en forma de $[^{18}\text{F}]\text{-F}_2$ mediante bombardeo con protones.
- Blanco gaseoso de 60 ml, en el que se bombardea una mezcla nitrógeno-oxígeno con protones para obtener ^{11}C en forma de $[^{11}\text{C}]\text{-CO}_2$ mediante la reacción $^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$.
- Blanco de 60 ml relleno de una mezcla nitrógeno-oxígeno para la obtención de ^{15}O en forma de $[^{15}\text{O}]\text{-O}_2$ mediante la reacción $^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$.
- En el último puerto existe una ventana de salida de haz en la que se ha instalado una línea que transporta el haz de partículas a una segunda sala blindada donde se ubica una cámara de reacción fundamentalmente para la irradiación de materiales de interés tecnológico.

The Cyclotron was the second particle accelerator installed at CNA (year 2004). In this accelerator, ions are accelerated through the combined application of an electric and a magnetic field. It was manufactured by IBA (Belgium) and it accelerates protons and deuterons to 18 and 9 MeV, respectively. The extracted maximum beam intensities in the internal target ports are $80 \mu\text{A} \pm 10\%$

for protons and $35 \mu\text{A} \pm 10\%$ for deuterons.

The Cyclone 18/9 allows the simultaneous bombardment with the same particle of one or two targets that are located in opposite positions (Dual Beam Mode). Seven out of the eight targets are devoted to the production of positron emitters. Thus, CNA offers the possibility to produce the most frequent radioisotopes employed in the imaging modality Positron Emission Tomography (PET).

This is the description of the available targets at the CNA Cyclotron:

- Large-volume target (2 ml) filled with ^{18}O -enriched water ($[^{18}\text{O}]\text{-H}_2\text{O}$, purity $\geq 95\%$ in ^{18}O). It is used for the production of ^{18}F as $[^{18}\text{F}]\text{-Fluoride}$ through the $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ nuclear reaction.
- Two large-volume targets (2 ml) with the cavities made of niobium and filled with ^{18}O -enriched water ($[^{18}\text{O}]\text{-H}_2\text{O}$, purity $\geq 95\%$ in ^{18}O). They are utilized for the production of ^{18}F as $[^{18}\text{F}]\text{-Fluoride}$ through the $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ nuclear reaction.
- 1.7 ml target filled with an ethanol-water mixture for the in-target production of ^{13}N in the form of $[^{13}\text{N}]\text{-Ammonia}$ using the $^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)^{13}\text{N}$ nuclear reaction.
- 60 ml target containing $^{18}\text{O}_2$ gas used to produce ^{18}F as $[^{18}\text{F}]\text{-F}_2$ by protons bombardment.
- 60 ml target, where a nitrogen-oxygen mixture is bombarded with protons, obtaining ^{11}C as $[^{11}\text{C}]\text{-CO}_2$ through the $^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$ nuclear reaction.
- 60 ml target filled with a nitrogen-oxygen mixture and used to produce ^{15}O as $[^{15}\text{O}]\text{-O}_2$ by means of the $^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$ nuclear reaction.
- Finally, there is an exit line (Experimental Beam Line) in the last target port which transports the beam line to a second vault. A reaction chamber devoted to the irradiation of technological materials is located in this second room.

2.2.1. Línea de Haz de Experimentación/ Experimental Beam Line

Los trabajos que requieren el uso de protones y deuterones, con energía superior a 6 MeV, han de llevarse a cabo en el CNA en la línea de transporte de haz del Ciclotrón. Hasta el año 2010, se había trabajado en vacío ensamblando una línea móvil de irradiación e implantación que puede ser acoplada tanto al Acelerador Tándem de 3 MV como al Ciclotrón.

En 2010 se realizaron una serie de modificaciones en dicha línea conducentes a ampliar la versatilidad de este acelerador. En cuanto a la energía de las partículas, el Ciclotrón compacto está limitado a suministrar protones de 18 MeV y deuterones de 9 MeV. Se ha instalado una línea de haz externo propiamente dicho, ya que el haz de partículas sale al aire antes de incidir sobre el blanco. Desde el punto de vista analítico, esto presenta algunas ventajas respecto al uso de una cámara de vacío, como la disminución del fondo en los espectros de Rayos-X adquiridos mediante la técnica PIXE. Por otro lado, el montaje de algunos experimentos de irradiación se simplifica, la temperatura que se alcanza en el blanco es inferior que trabajando en vacío y el tamaño de las muestras a irradiar no está limitado por el de la cámara. Sin embargo, se dificulta la monitorización de la densidad de corriente del haz y en muchos casos hay que realizar medidas indirectas a través de calibración. En caso de trabajar con flujos de partículas en torno a microamperios, se hace una lectura directa de la corriente en diferentes colimadores de grafito y/o en el propio blanco. Para la medida de flujos muy bajos se utilizan detectores de partículas o de centelleo.

La línea es sencilla y versátil, pudiendo ser modificada con los elementos necesarios para cada ensayo sin mucha dificultad. Se encuentra acoplada a la línea fija del ciclotrón y en la terminación

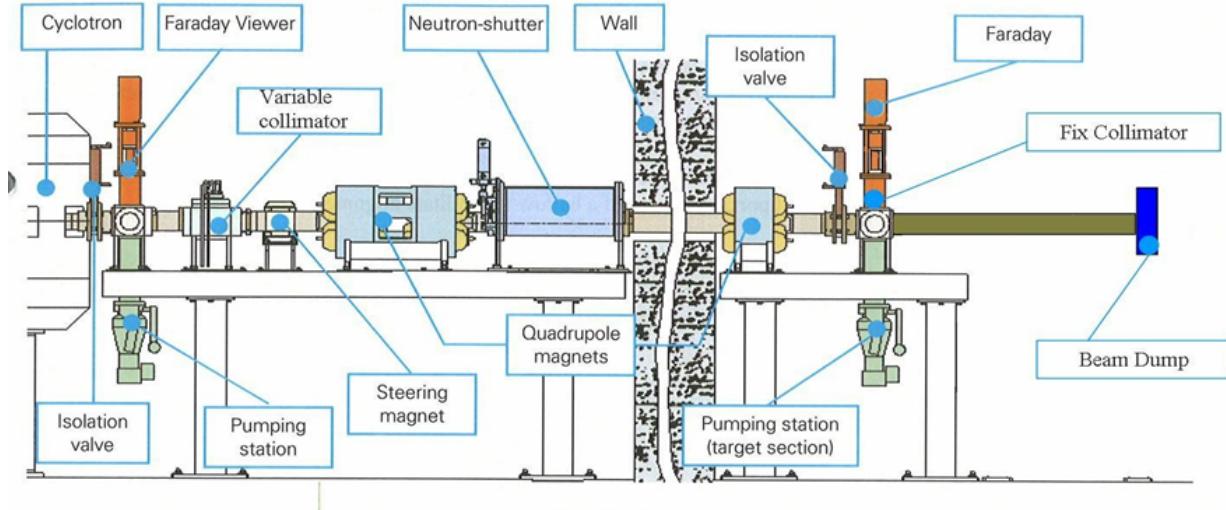


Figura 2.7: Línea de haz externo del Ciclotrón / Cyclotron external ion beam line

se pueden intercambiar varios colimadores con ventanas de distintos materiales adaptables a cada trabajo. Esto resulta muy interesante, ya que las muchas aplicaciones que tiene conllevan muy diferentes necesidades experimentales (energía, flujo, tamaño de haz...) implicando el uso de diversos dispositivos de degradación del haz y/o de diagnóstico. Aunque no existe posibilidad de barrido, permite tener un rango variado de áreas de irradiación, ya que se puede ajustar jugando con el material de la ventana de salida y la distancia del blanco.

The research which requires the use of protons and deuterons, with energies above 6 MeV, must be carried out in CNA in the Cyclotron beam transport line (Figure 3.9). Until 2010, it had worked in vacuum coupling the portable irradiation and implantation line. This line can be fixed to both, the 3 MV Tandem Accelerator and the Cyclotron. At 2010, it had been a number of changes in the line leading to expand the versatility of this accelerator. Regarding the energy of the particles, the compact Cyclotron is limited to supply 18 MeV protons and deuterons of 9 MeV. In 2010, a “true” external beam line has been installed, as the particle beam goes to the air before impacting on the target.

From the analytical standpoint, this presents some advantages over the use of a vacuum chamber, such as the low background X-Ray spectra obtained by PIXE technique. On the other hand, the assembly of some irradiation experiments is simplified, the temperature reached in the target is lower than working in vacuum, and the size of the samples to be irradiated is not limited by the chamber dimensions. However, it is difficult to monitor the beam current density and in many cases is necessary to do indirect measurements through calibration. When working with particles fluxes around microamps, a direct reading of current in different graphite collimators and/or the target itself is done. To measure very low fluxes, particle or scintillation detectors are used.

The line is elementary and versatile; it can be modified with the necessary elements for each investigation without much complexity. This is now coupled to the fixed line of the Cyclotron and there are various sizes collimators available, where can be adapted different materials windows according to the study concerned. This is very interesting, since the many applications imply very different experimental needs (energy, flux, beam size ...) involving the use of various devices for the beam degradation and/or diagnosis. Although there is not possibility of scanning, it allows for a diverse range of irradiation areas by playing with the material of the exit window and the target distance.

En lo referente a la obtención de haces con distintos valores de energía, se ha diseñado y fabricado un sistema de degradadores variables. Se trata de un carrusel, acoplado a la línea de vacío, donde

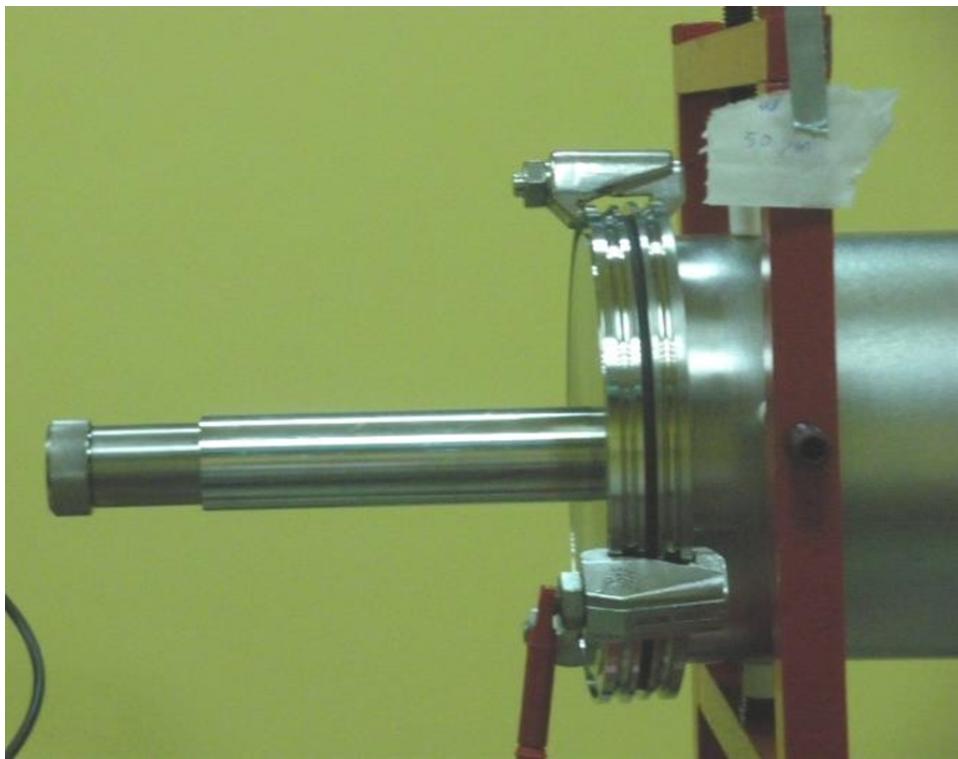


Figura 2.8: Línea de haz externo/ External beam line

se pueden introducir hasta cuatro láminas simultáneamente que son fácilmente intercambiables. La naturaleza y espesor de las láminas que se coloquen permite abrir el abanico de valores de LET (Linear Energy Transfer) que pueden obtenerse con la irradiación de protones y deuterones. Por tanto es posible llevar a cabo experimentos, tanto en vacío como en aire, por debajo de los 18 MeV. Como puede apreciarse, no existe una configuración permanente de esta línea ya que no hay muchos componentes fijos. En este sentido, ésta es una línea “viva”.

Recientemente se ha diseñado e instalado un portamuestras motorizado que permite cambiar de punto de análisis y/o de muestra desde la sala de control, sin necesidad de acceder al búnker de la línea. Esto último es una gran ventaja ya que evita los tiempos de espera relacionados con el enfriamiento de las partes de la línea que pueden quedar activas tras cada irradiación. La precisión del movimiento en las dos direcciones perpendiculares al haz es de $\pm 80 \mu\text{m}$.

Concerning the possibility to obtain beams with different energy values, it has been designed and manufactured a variable degraders system. It is a carousel, assembled to the vacuum line, where it is possible to introduce up to four films simultaneously which are easily interchangeable. The variability in the nature and thickness of the sited foil open the range of LET (Linear Energy Transfer) that can be obtained with protons and deuterons irradiation. It is therefore feasible to carry out experiments, both in vacuum and air, below 18 MeV. As can be seen, there is not a permanent configuration for this line, not many fixed components. In this sense it is an “alive” line.

Recently, has been designed and installed a sample motorized sample-holder. This system avoids going into the beamline vault to change the point under analysis because it is possible to do that from the control room. With this new sample-holder the experiments are less time consuming because it is no necessary to wait for the decay of the activate pieces after irradiations. The movement accuracy is of $\pm 80 \mu\text{m}$ in the both beam perpendicular directions.

2.2.2. Laboratorios asociados al ciclotrón/ Cyclotron Laboratories

Los laboratorios de radiofarmacia fueron diseñados para trabajar bajo las normas de buenas prácticas de fabricación farmacéutica (normas GMP). En el Centro se dispone actualmente de cuatro laboratorios: Dos para síntesis de radiofármacos (denominados de Producción e Investigación), y dos laboratorios de control de calidad de radiofármacos.

El laboratorio de producción se destina exclusivamente a la síntesis de radiofármacos PET destinados a su comercialización. El laboratorio de investigación tiene un uso mixto, la síntesis de radiofármacos para comercialización, y otros para ensayos clínicos y preclínicos. Cada laboratorio cuenta con un laboratorio de control de calidad de radiofármacos asociado, donde se realizan las pruebas determinadas por la Agencia Española del Medicamento.

Tras haber obtenido las correspondientes autorizaciones como instalación radioactiva, laboratorio farmacéutico y Unidad de Radiofarmacia, y dentro del marco de acuerdo con la empresa farmacéutica Curium Pharma, se comenzó la fabricación y distribución de FDG marcada con ^{18}F al propio CNA y a centros externos (Andalucía, Castilla-La Mancha, Murcia, Valencia, Portugal...) a partir de mayo de 2005. En la actualidad se producen, además de la FDG, otras moléculas con registro farmacéutico, asimismo marcadas con ^{18}F : Colina, Fluorodopa, Florbetaben y DCFPyL.

El Laboratorio de Producción dispone de una celda de fraccionamiento y dispensación aséptica de radiofármacos, y dos celdas de síntesis blindadas fabricadas por Comecer, que albergan módulos síntesis Synthera y Trasis AIO. Se producen en este laboratorio FDG, Florbetaben y DCFPyL.



Figura 2.9: Laboratorio de Producción de FDG/ FDG Production Laboratory

El Laboratorio de Investigación dispone de cinco celdas blindadas Comecer en las que se sintetiza fluorodopa para fines comerciales, y otros radiofármacos en el ámbito de la investigación y que son de interés para el estudio de procesos metabólicos o funcionales: $[^{18}\text{F}]\text{-Fluorotimidina}$ ($[^{18}\text{F}]\text{-FLT}$), $[^{18}\text{F}]\text{-Fluoromisonidazol}$ ($[^{18}\text{F}]\text{-FMISO}$), $[^{18}\text{F}]\text{-Fluoruro sódico}$ ($[^{18}\text{F}]\text{-NaF}$), $[^{11}\text{C}]\text{-Colina}$, $[^{11}\text{C}]\text{-Metionina}$, $[^{13}\text{N}]\text{-Amonio}$, etc... La configuración de las celdas de síntesis en este laboratorio es la siguiente:

- Celda de síntesis de compuestos marcados con carbono-11, en la que se encuentra un módulo GE Tracerlab FX-C. La metilación de distintos grupos funcionales (aminas, alcoholes, tioles, ácidos carboxílicos) con ioduro de metilo radiactivo es el modo más común de producir radiofármacos marcados con carbono-11. El módulo permite la metilación de gran número de moléculas orgánicas.
- Celda libre para investigación (sin módulo de síntesis automático en su interior).
- Celda de síntesis para la producción de fluorodopa (con registro farmacéutico), en un módulo Trasis All-in-One.
- Celda de síntesis para la producción de F-DCFPYL (con registro farmacéutico), en un módulo Trasis All-in-One.
- Celda de síntesis de compuestos marcados con flúor-18 mediante el módulo GE Tracerlab FX-FN. En este caso, el flúor-18 se utiliza en forma de [18F]-Fluoruro, en el marcaje de moléculas por sustitución nucleofílica.

The radiopharmacy laboratories were designed to work under the standards of good pharmaceutical manufacturing practices (GMP standards). Four laboratories are currently available at the Centre: Two for radiopharmaceutical synthesis (called Production and Research), and two radiopharmaceutical quality control laboratories.

The production laboratory is intended exclusively for the synthesis of PET radiopharmaceuticals for marketing. The research laboratory has a mixed use, radiopharmaceutical synthesis for marketing, and others for clinical and preclinical trials. Each laboratory has an associated quality control laboratory, in which the quality tests of the synthesized radiopharmaceuticals are carried out according to the requirements of the Pharmacopoeia.

After obtaining the corresponding authorizations from the general sub-direction of Nuclear Energy (as a radioactive installation) and the Ministry of Health (as a pharmaceutical laboratory), and within the framework of the pharmaceutical company Curium, the manufacture and distribution of FDG marked with 18F to the CNA itself and to external centers (Andalusia, Castilla-La Mancha, Portugal) began from May 2005. Currently, in addition to the FDG, other radiopharmaceuticals with pharmaceutical registration are synthesized, also marked with 18F: Choline, Dopa, Florbetaben.

The Production Laboratory has an aseptic fractionation and dispensing cell of radiopharmaceuticals, and two shielded synthesis cells manufactured by Comecer, which house Synthera synthesis modules (IBA). FDG, Choline and Florbetaben are produced in this laboratory.

The Research Laboratory has five shielded cells from Comecer, in which fluorodopa is synthesized for commercial purposes, and other radiopharmaceuticals in the field of research and which are of interest for the study of metabolic or functional processes: [18F]-Fluorotimidine (Fluorotimidine ([18F]-FLT), [18F]-Fluoromisonidazole ([18F]-FMISO), [18F]-Sodium Fluoride ([18F]-NaF), [11C]-Choline,[11C]-Methionine, [13N]-Ammonium, etc... The configuration of the synthesis cells in this lab is as follows:

- Synthesis cell of carbon-11 marked compounds, in which a GE Tracerlab FX-C module is located. Methylation of different functional groups (amines, alcohols, thiols, carboxylic acids) with radioactive methyl iodide is the most common way to produce carbon-11 marked radiopharmaceuticals. The module allows methylation of many organic molecules.
- Free cell for research (without an automatic synthesis module inside).

- Synthesis cell to produce fluorodopa (with pharmaceutical registration), in a Trasis All-in-One module.
- Synthesis cell to produce F-DCFPYL (with pharmaceutical registration), in a Trasis All-in-One module.
- Synthesis cell of compounds marked with fluoride-18 using the GE Tracerlab FX-FN module. In this case, fluoride-18 is used in the form of [18F]-Fluoride, in the marking of molecules by nucleophilic substitution.

En los laboratorios de Control de Calidad se realizan diversas pruebas en los radiofármacos sintetizados que exige la farmacopea: La pureza química y radioquímica de los compuestos sintetizados, mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y cromatografía en capa fina (TLC). También se efectúan los tests de pH, y endotoxinas.

La pureza radioisotópica se comprueba mediante espectrometría gamma, y la presencia de disolventes residuales en los radiofármacos se realiza mediante cromatografía de gases.

In the quality control laboratories, various tests are carried out on the synthesized radiopharmaceutical, as required by pharmacopoeia: The chemical and radiochemical purity of synthesized compounds, using high-resolution liquid chromatography (HPLC) and thin layer chromatography (TLC); pH and endotoxin tests are also performed.

Radioisotopic purity is checked by gamma spectrometry, and the presence of residual solvents in radiopharmaceuticals is performed by gas chromatography.

Otros laboratorios

En ubicación separada de los laboratorios descritos anteriormente, está habilitado un laboratorio para desarrollo de investigación básica y experimentación de nuevos trazadores PET / Basic research and synthesis new PET tracers Laboratory. El laboratorio cuenta con una central de gases de argón, así como la preinstalación de 4 módulos con dispensador de gases de alta pureza de N₂, CO₂, H₂ y O₂ dirigidos a una campana extractora.

La pureza química de los compuestos marcados se evalúa mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). La cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC) consta de bomba analítica de gradiente cuaternario, totalmente programable y con sistema de inyección automático. Consta de tres detectores, UV, con un amplio rango de trabajo y alta resolución que permite la obtención precisa de espectros UV en determinación de compuestos principales e impurezas. Posee además detector amperimétrico y detector de conductividad para cromatografía iónica de alta sensibilidad y extrema estabilidad. El equipo es programable con control desde el teclado o mediante software, con gran versatilidad, permitiendo la monitorización en tiempo real de espectros y la dispensación de fase líquida. El HPLC dispone de un detector de conductividad para cromatografía iónica y software de adquisición/tratamiento de datos.

El laboratorio contiene el equipamiento necesario para permitir el desarrollo de nuevas líneas de síntesis de radiofármacos PET y que la calidad de los productos sintetizados sea satisfactoria.

Other laboratories In a separated place from the formerly described laboratories, there is a laboratory dedicated to basic research and development of new PET tracers. It has a central argon gas system and the pre-installation of 4 modules with high purity gases N₂, CO₂, H₂ and O₂.

The chemical purity of labeled compounds is evaluated by high performance liquid chromatography (HPLC). The high performance liquid chromatography (HPLC) analytical comprises a



Figura 2.10: Laboratorio para desarrollo de investigación básica y experimentación de nuevos trazadores PET/ Basic research and synthesis new PET tracers Laboratory

quaternary gradient pump which is fully programmable, an automatic injection system, injection reproducibility and a detector with a wide working range and high resolution which allows obtaining accurate determination of UV spectra of major compounds and impurities. HPLC is highly sensitive and extremely stable. HPLC is programmable to be controlled from the keyboard or by software, with great versatility and allows real time monitoring of the spectra and dispenser of liquid phase. HPLC contains conductivity detector for ion chromatography and software acquisition / data processing.

The quality control laboratory contains the equipment necessary to enable the development of new lines of synthesis of PET radiopharmaceuticals and the quality of the synthetic products is satisfactory.

2.2.3. Radiofarmacia e Imagen Molecular/ Radiopharmacy and Molecular Imaging

La tecnología PET permite la cuantificación de procesos metabólicos y es una tecnología que aporta una elevada sensibilidad y resolución.

La Unidad de Radiofarmacia del CNA combina el uso del acelerador de partículas tipo ciclotrón, con los laboratorios de producción/investigación. De esta manera se posibilita el desarrollo de síntesis radioquímicas automatizadas en celdas blindadas, a la vez que se proporciona una técnica traslacional de la preclínica a la clínica.

Un radiotrazador se puede considerar como una sonda para imagen molecular marcada radiactivamente, capaz de visualizar procesos metabólicos básicos, neurotransmisión, etc., mediante el radiomarcaje de péptidos, nanopartículas y sistemas macromoleculares.

La reciente construcción del nuevo laboratorio de control de calidad, junto con la prevista ampliación del laboratorio de investigación, tiene como objeto implantar una normativa basada en GMP (Good Manufacturing Practice) y, con ello, la cualificación de equipos y validación de los procesos de producción y control de calidad, entre otros.

El principal objetivo de esta implantación será la producción de radiofármacos para uso clínico, lo que apoyará sustancialmente la investigación clínica en el ámbito de la Medicina Nuclear.

En el CNA disponemos de capacidad para la producción de diversos radiofármacos. Entre ellos, se encuentran la $[^{18}\text{F}]$ -Fluorotimidina ($[^{18}\text{F}]$ FLT), marcador de proliferación celular, $[^{18}\text{F}]$ -Fluormisonidazol ($[^{18}\text{F}]$ FMISO), trazador de hipoxia útil en estudios de hipoxia tumoral, infarto de miocardio y en la visualización de tejido isquémico, $[^{11}\text{C}]$ -Metionina ($[^{11}\text{C}]$ Met) para el diagnóstico y seguimiento de tumores cerebrales, $[^{11}\text{C}]$ -Colina ($[^{11}\text{C}]$ Col) para la visualización de cáncer de próstata y $[^{18}\text{F}]$ -Tetrafluoroborato sódico ($[^{18}\text{F}]$ TFB) para el estudio de patologías tiroideas.

Asimismo, se sintetizan rutinariamente varios radiofármacos autorizados por la AEMPS para investigación clínica en el tomógrafo PET/TAC. Entre ellos, la $[^{18}\text{F}]$ -Fludesoxiglucosa ($[^{18}\text{F}]$ FDG), marcador de metabolismo glucídico, la $[^{18}\text{F}]$ -Fluorometilcolina ($[^{18}\text{F}]$ FCH) para el estudio de cáncer de próstata, la $[^{18}\text{F}]$ FDOPA para el estudio de enfermedad de Parkinson y tumores neuroendocrinos y el $[^{18}\text{F}]$ -Florbetaben, utilizado para la visualización de placas de β -amiloide en pacientes con enfermedad de Alzheimer u otras patologías cerebrales. Recientemente se ha incorporado la producción de $[^{18}\text{F}]$ DCFPyL, radiofármaco muy sensible para la detección de recurrencia temprana de cáncer de próstata.

¿Qué podemos ofrecer?

Además de los radiofármacos PET ya mencionados, disponemos de la infraestructura necesaria para el desarrollo de nuevas rutas de radiosíntesis, como:

- Síntesis de radiofármacos para estudios clínicos.
- Síntesis de radiotrazadores para estudios translacionales (moléculas pequeñas, fármacos, proteínas/péptidos, nanosistemas poliméricos)
- Estudios de microPET.
- Estudios de biodistribución y radiofarmacocinética *in vivo / ex vivo*
- Radionúclidos PET disponibles: ^{18}F , ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N .

PET technology allows the quantification of metabolic processes and it provides a very high sensitivity and resolution.

The Radiopharmacy Unit in CNA combines the use of the particle accelerator cyclotron and our production and research laboratory facilities, allowing us to develop automated synthesis inside hot cells. This facility can provide us a translation from the preclinical to the clinical use of the synthesized molecules.

A radioactive tracer is a chemical compound in which one or more atoms have been replaced by a radioisotope. It can be considered as a molecular imaging probe that can provide the *in vivo* visualization and quantification from a variety of basic metabolic processes, neurotransmission, ... There are many molecules than can be radiolabelled, including peptides, nanoparticles and macromolecular systems.

In CNA we have developed the recent construction of a new quality control laboratory for the Radiopharmacy Unit. This, with the planned expansion of the research/production laboratory, will provide us the implementation of a regulation based on GMP (Good Manufacturing Practice), with



Figura 2.11: Módulo de síntesis Tracerlab FX-FN

the equipment qualification and production/quality control validation. The main objective of this implantation will be the production of radiopharmaceutical for clinical use, which will substantially support clinical research in Nuclear Medicine.

We have the capacity to produce a variety of radiopharmaceuticals in our facilities. Among them, we produce $[^{18}\text{F}]$ -Fluor thymidine ($[^{18}\text{F}]\text{FLT}$) for cellular proliferation studies, $[^{18}\text{F}]$ -Fluormisonidazol ($[^{18}\text{F}]\text{FMISO}$) for tumoral hypoxia, myocardial infarction and visualization of ischemic tissue, $[^{11}\text{C}]$ -Methionine ($[^{11}\text{C}]\text{Met}$) for brain tumour, $[^{11}\text{C}]$ -Choline ($[^{11}\text{C}]\text{Col}$) for prostate cancer and $[^{18}\text{F}]$ -Tetrafluoroborate ($[^{18}\text{F}]\text{TFB}$) for thyroid pathologies.

In CNA we have also the capacity to produce regulatory approved radiopharmaceuticals for human use in our own PET/CT scanner. Among them, we produce $[^{18}\text{F}]$ -Fludeoxyglucose ($[^{18}\text{F}]\text{FDG}$) for glucidic metabolism, $[^{18}\text{F}]$ -Fluromethylcholine ($[^{18}\text{F}]\text{FCH}$) for prostate cancer, $[^{18}\text{F}]\text{FDOPA}$ for Parkinson disease and neuroendocrine tumours studies and $[^{18}\text{F}]$ -Florbetaben for β -amyloid visualization in Alzheimer disease. We have recently included the production of $[^{18}\text{F}]\text{DCFPyL}$ for the detection of recurrent prostate cancer.

How can we help you at the CNA?

In addition to the PET radiopharmaceuticals already mentioned, we have the infrastructure for the development of new radiosynthesis routes.

- Synthesis of radiopharmaceuticals for clinical use.
- Synthesis of radiotracers for translational studies (small molecules, drugs, proteins and peptides, polymeric nanosystems).
- microPET studies.
- In vivo / Ex vivo biodistribution and radiopharmacokinetic studies.
- PET radionuclides available: ^{18}F , ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N .

2.2.4. Tomógrafo PET y TAC para pequeños animales/ Small animal PET and CT

El CNA dispone de un tomógrafo PET para pequeños animales modelo Mosaic y fabricado por Philips. El sistema de detección del aparato está basado en 14456 cristales de GSO (ortosilicato de gadolinio activado con cerio, Gd₂SiO₅:Ce) de dimensiones 2x2x10 mm³ y distribuidos en 52 anillos con 278 cristales cada uno. Los cristales de GSO están pegados a una guía de luz continua de 1,2 mm de grosor y con ranuras de una profundidad de 0,5 mm. Dichos cristales están conectados a un conjunto hexagonal de 288 tubos fotomultiplicadores que tienen un diámetro de 19 mm. El escáner trabaja exclusivamente en modo 3D y su resolución espacial en el centro es de 2,7 mm.



Figura 2.12: Sala del tomógrafo microPet y microTAC para pequeños animales/ Small animal microPET and microCT

En octubre de 2008 quedó instalado un equipo de microTAC preclínico marca Bioscan, modelo NanoCT (instalado por Philips Sistemas Médicos). El sistema NanoCT es un tomógrafo TAC helicoidal, que opera a una tensión máxima de 65 kV, y ofrece imágenes con una resolución espacial mejor que 200 μm , con un campo de visión axial de 270 mm y transaxial de 76 mm. Este equipo se utiliza para la obtención de imágenes de pequeños animales o de objetos de interés tecnológico o arqueológico mediante tomografía axial computerizada (TAC) con Rayos-X.

El equipo dispone de camillas de exploración compatibles con las del tomógrafo PET Mosaic, de forma que permite la adquisición secuencial de imágenes PET/TAC de animales de experimentación. De esta forma, y tras la fusión de las imágenes obtenidas por ambas técnicas, permite obtener una imagen única multimodalidad, que engloba la información metabólica ofrecida por la tomografía PET con la información morfológica de la tomografía axial con Rayos-X.

The CNA small-animal PET scanner was made by Philips. The detection system is based on 14,456 GSO crystals (Gd₂SiO₅:Ce, gadolinium orthosilicate activated with cerium) with dimensions of 2x2x10 mm³ and is arranged in 52 rings of 278 crystals each. The GSO crystals are glued to a continuous light guide with a thickness of 1.2 mm and 0.5 mm deep slots. The crystals are read out by a hexagonal array of 288 photo multiplier tubes (PMTs) with a diameter of 19 mm each. The scanner operates exclusively in 3D mode and the spatial resolution is 2.7 mm at the centre. The unit also has capability for housing up to thirty animals in environmentally controlled rooms.

In October 2008, a new preclinical microCT system (made by Bioscan, model NanoCT) was installed by Philips Medical Systems. The NanoCT system is a helical CT scanner which operates

at 65 kV maximum voltage, obtaining images with a spatial resolution higher than 200 μm . The scanner has an axial field of view (FOV) of 270 mm and a transaxial FOV of 76 mm. This unit will be used to obtain computed tomography (CT) images with X-Rays from small animals and objects of technological or archaeological interest.

The system is equipped with exploration beds that are fully compatible with the Mosaic PET scanner. Sequential image acquisition with both techniques (PET/CT) in experimental animals is thus possible and a unique multimodality PET/CT image is finally obtained. This single set of images combines PET metabolic and CT morphologic information.

2.2.5. Procesamiento de imágenes médicas clínicas y preclínicas/ Clinical and preclinical medical image processing

El laboratorio dispone de programas de evaluación y análisis de imágenes TAC, PET y otras modalidades como RMI: Imalytics, Invivoquant 1.43 y PMOD 3.6. Dispone de contratos de mantenimiento que garantizan siempre la última versión del programa. Especialmente cuenta con PMOD, que desde 2014 consiste de los siguientes módulos: VIEW (operación básica con imágenes, procesamiento de los imágenes en serie, “batch”), KINETIC (modelización cinética de radiofármacos), PXMOD (mapas paramétricas pixel a pixel de modelos cinéticos), FUSION y FUSEIT (para fusión de imágenes de distintos modalidades y estandarización a las plantillas de los cerebros humano, rata, ratón y mono), SEGMENT (para segmentación de las imágenes según valores de los píxeles), 3D (para representación tridimensional de las imágenes), ALZHEIMER (evaluación de estado de paciente con signos clínicos de la enfermedad de Alzheimer en base de estudio de FDG-PET; la herramienta es para uso preclínico) y NEURO (delineación semiautomática de las regiones de interés según anatomía de los núcleos en imagen PET o RMI).

La aplicación de ese software permite el modelado avanzado de captación de radiosonda cinética, y el procesamiento avanzado de imágenes médicas. Un ejemplo de ello es un método pendiente de patente para predecir o pronosticar el riesgo de muerte o vasospasmo de un paciente con hemorragia subaracnoidea.

The laboratory has several programs for the evaluation and analysis of CT, PET images and other modalities as MRI: imalytics, Invivoquant 1.43 and PMOD 3.6 for which has the maintenance contracts which allow to update always to the newest version of the program. The most used one, PMOD, has from 2014 the following modules: VIEW (basic operation with the images, batch image processing), KINETIC (kinetic modelling of the radiotracers), PXMOD (pixel by pixel parametric mapping of kinetic models), FUSION and FUSEIT (for fusion/overlay of the images of different modalities, normalization to brain templates of human, rat, mouse or macaque [cynomologus monkey]), SEGMENT (for image segmentation according to the pixel values), ALZHEIMER (evaluation of the patient with clinical signs of Alzheimer’s disease based on FDG-PET scan; this is not a clinical tool), NEURO (semiautomatic delineation of the regions of interest of the brain according to nuclear anatomy in PET or MRI images).

The application of that software allows advanced kinetic radiotracer uptake modelling, and advanced medical image processing. An example of it is a patent-pending method for predicting or predicting the risk of death or vasospasm of a patient with subarchnoid hemorrhage.

2.3. Tomógrafo PET/TAC para humanos/ PET/CT human scanner.

Desde finales de 2011, el Centro Nacional de Aceleradores dispone de un escáner PET/TAC para humanos , lo que permite recibir pacientes en el Centro de Diagnóstico por Imagen del CNA (CDI). Se trata de un equipo Siemens Biograph mCT con corrección por tiempo de vuelo, con detectores PET de LSO con un campo de vista axial de 162 mm (axial bed coverage), una resolución axial y transaxial de aproximadamente 4 mm. El tomógrafo TAC espiral permite obtener imágenes con hasta 64 cortes, y tiene una apertura de gantry de 78 cm.



Figura 2.13: Tomógrafo PET/TAC/ PET/CT scanner

Este escáner PET/TAC permite la realización de estudios muy flexibles, como:

- Examen estándar PET/TAC de cuerpo completo.
- Exámenes dinámicos PET con campo de visión mayor que un anillo detector por debajo de 3 s por cama.
- Exámenes dinámicos TAC con campo de visión superior a 67 mm y por debajo de 1 s de resolución temporal.
- Exámenes PET o TAC con gating cardíaco o respiratorio.
- Adquisición PET en modo lista.

La sala de control está compartida con la de los escáneres PET/TAC de la Unidad de Imagen Preclínica para pequeños animales. Y ambas se encuentran a pocos metros de los laboratorios de radiofarmacia, lo que permite estudios con radiofármacos marcados con radioisótopos PET de semivida corta, como el¹¹C.

Se ha firmado un convenio con el Hospital Universitario Virgen del Rocío para el uso y soporte de la Unidad del Diagnóstico Molecular de CNA.

Actualmente se hacen exámenes de los pacientes hospitalarios de interés científico durante tres días a la semana, quedando los dos días restantes disponibles con el servicio que proporciona personal cualificado (facultativos especialistas en Medicina Nuclear, personal de Enfermería y técnicos en imagen) para estudios en humanos propuestos por personal científico no hospitalario. Además de los estudios con pacientes, el escáner TAC se usa para exámenes de objetos de gran tamaño de patrimonio cultural (esculturas, etc.).

Since late 2011, the National Accelerator Centre operates a PET/CT for humans (Figure 3.17), which allows receiving patients at the Diagnostic Imaging Centre of CNA (CDI). The scanner is a Siemens Biograph mCT with TOF correction, LSO detectors, axial FOV of (axial bed coverage) of 162 mm, and axial and transaxial space resolution of approximately 4 mm. The spiral CT scanner provides 64-slice images, with a gantry aperture of 78 cm.

The PET/CT scanner is able to perform a variety of studies, as:

- Standard whole-body PET and CT scans.
- Dynamic PET scans with field of view longer than one detector ring down to 3 s per bed.
- Dynamic CT scans of up to 67 mm field of view and down to 1 s resolution.
- Respiratory or cardiac gated PET or CT scans.
- List mode acquisition in PET.

The human scanner shares its control room with that of the preclinical PET/CT scanners in the image unit for small animals. They both are installed a few meters away from the radiopharmacy laboratories, which allows studies with short half-life PET radioisotopes, such as ¹¹C based radiopharmaceuticals.

There is an agreement with the University Hospital Virgen del Rocío to use and support the research facility in CNA.

Presently, Hospital patients of research interest are scanned at CNA three days per week, and for the remaining two days the Service provides the qualified staff (Nuclear Medicine specialists, nursery, and technicians staff) for the human studies proposed by non-Hospital scientific staff. Moreover, the CT scanner is used for examination of art large objects (sculptures, etc.).

2.4. Acelerador Tandetrón de 1 MV con Espectrómetro de Masas(AMS)/ 1MV Tandetron Accelerator with Mass Spectrometer (AMS)

La Unidad de AMS del CNA se consolida en septiembre de 2005 con la instalación de un espectrómetro de masas con acelerador o sistema de AMS (i.e. del inglés Accelerator Mass Spectrometry) de 1 MV, diseñado y fabricado por la empresa holandesa High Voltage Engineering Europe (HVEE, Amersfoort). Este sistema es el único que existe actualmente en territorio nacional con la capacidad de abordar el estudio de radionucleidos ligeros y pesados en el dominio de esta técnica y es conocido con el acrónimo SARA.



Figura 2.14: Carrusel de almacenamiento de muestras/ Sample carousel

AMS justifica su uso en la determinación de una serie de núclidos normalmente con periodos de semidesintegración largos y muy poco abundantes en las muestras de interés, difíciles o imposibles de cuantificar mediante técnicas convencionales. Esto se consigue gracias a la combinación de la espectrometría de masas tradicional y a la alta energía alcanzada por los iones de la muestra en el acelerador, lo cual se concreta en: i) la selección de la energía, masa y carga de las partículas mediante una combinación de sectores magnéticos y eléctricos; ii) la eliminación de iones moleculares en el terminal del acelerador en el proceso conocido como stripping; y iii) la detección de los iones de interés mediante detectores nucleares, que permite realizar un filtrado adicional de interferentes. El sistema de 1 MV del CNA pertenece a una primera generación de sistemas compactos de AMS desarrollados en los años 2000, en los que primaba la reducción del tamaño y coste de las instalaciones, por lo que sólo dispone de los selectores de masas indispensables para la aplicación de la técnica (i.e. un sector magnético en la zona de baja energía, y un sector magnético y otro electrostático a la salida del acelerador). En los últimos años, la incorporación de un nuevo detector de gas optimizado para la medida de iones ligeros y pesados a bajas energías ($E < 1\text{MeV}/\text{uma}$), y el uso del gas He a modo de stripper, han permitido mejorar sensiblemente las condiciones de medida para la mayoría de los radionucleidos estudiados, recogidos en la Tabla 1. Desde el 2012, las medidas de ^{14}C se llevan a cabo en un sistema de AMS especializado denominado Micadas diseñado por la empresa suiza Ionplus

Tabla: Radionucleidos que se miden de manera rutinaria en el CNA, condiciones de medida y aplicaciones en desarrollo./ Radionuclides that are routinely analysed on the 1 MV AMS system at the CNA: measurement conditions and application fields.

Como se observa en la Tabla, la sensibilidad de la técnica depende mucho del isótopo concreto de que se trate. Esto se debe a que esta sensibilidad está condicionada por distintos parámetros tales como la existencia de isóbaros, otros isótopos de masa similar al de interés o las características químicas que se relacionan con la extracción en la fuente de iones.

Figura 2.15

Radionuclido/ <i>Radionuclide</i>	T _{1/2} (a)	Abundancia isotópica en muestras de interés/ <i>Isotopic abundance in the targeted samples</i>	Sensibilidad alcanzada en el CNA/ <i>Sensitivity achieved at the CNA</i>	Aplicaciones en desarrollo en el CNA/ <i>Ongoing applications at CNA</i>
¹⁰ Be	1.51x10 ⁶	¹⁰ Be/ ⁹ Be=10 ⁻¹¹ -10 ⁻⁵	2.5x10 ⁻¹⁴	Procesos atmosféricos/ <i>Atmospheric processes</i>
¹⁴ C*	5730	¹⁴ C/ ¹² C=10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹¹	2-4x10 ⁻¹⁵ (50000 y BP)	Datación / <i>Dating</i>
²⁶ Al	7.08x10 ⁵	²⁶ Al/ ²⁷ Al=10 ⁻¹³ -10 ⁻¹²	2x10 ⁻¹⁴	Procesos atmosféricos/ <i>Atmospheric processes</i>
⁴¹ Ca	9.94x10 ⁴	⁴¹ Ca/ ⁴⁰ Ca=10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹¹	(2-8)x10 ⁻¹²	Residuos nucleares/ <i>Nuclear wastes</i>
¹²⁹ I	1.57x10 ⁷	¹²⁹ I/ ¹²⁷ I=10 ⁻¹² -10 ⁻⁷	1x10 ⁻¹³	Residuos nucleares/ <i>Nuclear wastes</i>
²³⁶ U	2.34x10 ⁷	²³⁶ U/ ²³⁸ U=10 ⁻¹³ -10 ⁻⁶	2x10 ⁻¹⁰	
²³⁹ Pu	24110			Oceanografía/ <i>Oceanography</i>
²⁴⁰ Pu	6564			Muestras ambientales / <i>General environmental samples</i>
²³⁷ Np	2.14x10 ⁶	10 ⁶ -10 ¹⁰ átomos / atoms	10 ⁶ átomos / atoms	

The CNA AMS unit became established in September 2005 with the arrival of the 1 MV Accelerator Mass Spectrometry system, designed and manufactured by the Dutch company High Voltage Engineering Europa (HVEE, Amersfoort). This is the only Spanish AMS system with the potential to determine light and heavy radionuclides within the domain of the technique and it is known with the acronym SARA.



Figura 2.16: Acelerador Tandetrón 1 MV / 1 MV Tandetron Accelerator

AMS becomes necessary when it comes the analysis of usually long-lived radionuclides whose concentrations in the samples of interest are extremely low and cannot be fulfilled by conventional techniques. Thanks to the combination of kinematic filters with an electrostatic tandem accelerator, i) the energy, mass and charge of the particles can be selected; ii) molecular background is suppressed in the stripping process occurring at the accelerator terminal; and iii) nuclear detectors can be used to unambiguously select the ions of interest in a final stage. The 1 MV CNA AMS system belongs to a first generation of compact AMS facilities that were developed beginning of the 2000s for whose design the reduction of the floor space and costs were a priority. Thus, the mass, energy and charge selection are carried out with the basic kinematic filters (i.e., a sector magnet on the low-energy side, and a sector magnet and an electrostatic deflector at the exit of the accelerator). In the last few years, the setup of a miniaturised gas detector optimized for the detection of light and heavy ions at low energies (E_j 1 MeV/uma), and the use of He gas as the stripper medium, have allowed the improvement of the measurement conditions for most of the studied radionuclides, as explained in Table 1. In 2012, ^{14}C measurements were moved to a Micadas-type AMS system provided by the Swiss company Ionplus.

As it can be observed in Table 1, the achieved sensibility strongly depends on the targeted radionuclide. This is because different effects condition the performance of the AMS systems, such as the presence of atomic and molecular isobars, the abundance of neighbouring major nuclides, or the chemical properties which relate to the ion extraction process in the ion source.

2.4.1. Laboratorio asociado al Acelerador Tandetrón de 1MV con Espectrómetro de Masas / AMS Laboratory

El procesado químico de las muestras de interés es una de las etapas clave en AMS. Normalmente, se trabaja con muestras valiosas, por lo que es fundamental tener optimizados los protocolos de preparación de muestras para que la extracción y purificación del elemento en cuestión se lleve a cabo eficientemente. Al final del proceso la muestra debe prensarse en un cátodo capaz de albergar varios mg de material. Además, en determinados casos, los protocolos deben estar optimizados para la máxima reducción de determinados nucleidos que pueden generar problemas de interferencia durante la medida. Tal es el caso del ^{238}U para la determinación de ^{237}Np o ^{239}Pu , por su proximidad en masas, o del ^{10}B durante la medida de ^{10}Be , por tratarse de isóbaros.

Los métodos radioquímicos dependen de la matriz de trabajo y el radionucleido que se quiere cuantificar. Es esencial la calidad de los reactivos químicos utilizados y la limpieza del material de laboratorio. También es importante disponer de laboratorios diferentes para muestras que, por su naturaleza, puedan tener concentraciones muy dispares. En el CNA se lleva a cabo un esfuerzo continuo de actualización de los equipos de laboratorio, las estancias de trabajo y el instrumental, para que se reduzca al máximo la posibilidad de contaminación.

A lo largo del año 2020 se ha puesto a punto un segundo laboratorio equipado para la preparación de muestras de AMS, gracias a la concesión por parte del Ministerio de Ciencia e Innovación de financiación de un proyecto de infraestructura para el mismo (EQC2019-005898-P), con el objeto, precisamente, de ser dedicado al tratamiento de muestras de origen artificial, especialmente aquellas procedentes de residuos nucleares de media y baja actividad. Estas muestras presentan a veces niveles de radionúclidos que superan en varios órdenes de magnitud los de muestras de origen ambiental, y deben ser manipuladas en entornos distintos para evitar la contaminación de los espacios.



Figura 2.17: Laboratorio de preparación de muestras para AMS/ AMS sample preparation Laboratory

Tanto el laboratorio destinado a la preparación de muestras ambientales como el recientemente establecido para muestras no ambientales, cuentan con equipamiento de alta especialización para la aplicación de diversas técnicas radioquímicas necesarias para los distintos radionúclidos y matrices. Entre ellas se dispone de equipos de refrigeración, vitrinas de extracción de gases, hornos, hornos microondas, equipos de producción de agua hiperpura, agitadores, accesorios para la utilización de resinas de intercambio iónico, etc.

The radiochemical treatment of the samples is a key process in AMS. As samples are small and valuable in many cases, it is important to optimise the sample preparation methods to make an optimum extraction and purification of the isotope of interest. At the end of the process, the sample will be pressed into a metallic cathode able to contain several mg of sample. Apart from this, the methods need to be optimised for the elimination of other isotopes that can produce interferences in the detection of the isotope of interest. This is the case of radionuclides as ^{238}U for the determination of ^{237}Np or ^{239}Pu (due to the vicinity of masses) or ^{10}B in the measurement of ^{10}Be (which are isobars).

The radiochemical methods depend on the isotope of interest and the type of sample. It is essential to use high purity chemical reagents and extremely clean laboratory material. Also, the use of different spaces for sample manipulation is necessary when high level samples need to be prepared in order to prevent the cross contamination between samples. At CNA, the laboratory equipment, workplaces and instrumentation are in a continuous renovation to prevent contamination as possible.

Currently there are two AMS sample preparation labs at CNA. During 2020, a second lab has been set up thanks to the funding obtained from the Spanish Ministry of Science and Innovation. When the first lab will be dedicated exclusively to environmental samples, the new lab will be used for non-environmental samples, mainly low-level radioactive waste. Despite being called “low-level”, these samples often present radioactive levels much higher than the environmental ones. For that reason, it is necessary to dedicate different spaces for their treatment.

Both the environmental radiochemistry lab and the non-environmental one are equipped with specialized instrumentation to apply the different techniques used for AMS sample preparation. Among other systems, they include gas extraction cabinets, ovens, microwave ovens, water purification systems, etc.

2.5. Acelerador MiCaDaS/ MiCaDaS Accelerator.

El sistema MiCaDaS es un instrumento para realizar Espectrometría de Masas con Acelerador (AMS, del inglés Accelerator Mass Spectrometry), específico para el análisis de muestras de ^{14}C .

Su diseño y funcionamiento siguen el patrón básico de otras instalaciones de AMS como el propio sistema SARA en el CNA. Las muestras pueden ser sólidas o gaseosas, y en la fuente de iones el material es bombardeado con iones de Cs $^+$ para producir un haz de iones negativos. Este haz es analizado por un campo magnético antes de entrar en la zona de aceleración de 200 kV. Dentro de la zona de aceleración, los iones interactúan con el gas de stripper, de modo que los iones cambian su estado de carga de negativo a neutral o positivo. Los iones positivos son acelerados nuevamente y son analizados en función de su masa y carga.



Figura 2.18: MiCaDaS (Mini radioCarbon Dating System)

El sistema de AMS determina de forma precisa el cociente $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de las muestras, para lo que mide los diferentes isótopos en distintas zonas del sistema. En la zona de baja energía mide la intensidad del haz de ^{12}C . En la zona de alta energía mide la intensidad de los haces de ^{12}C y ^{13}C , así como ^{13}C procedente de la rotura de las moléculas de ^{13}CH . Además, mide el número de iones de ^{14}C .

Las corrientes de los isótopos estables se miden en cámaras de Faraday, mientras que el ^{14}C se detecta en un detector de ionización. Los cocientes se corrigen tanto por los niveles de fondo como por el fraccionamiento utilizando todos los valores medidos en las diferentes cámaras de Faraday.

El sistema MiCaDaS está diseñado para medir muestras con un cociente en el rango de 0,002 hasta 10 F ^{14}C con alta precisión, lo que incluye todo el rango de posibles muestras arqueológicas y de estudios ambientales. El sistema de intercambio de muestras está equipado con cámaras independientes que permiten un proceso de medida continuo, sin interrupciones.

En comparación a otros sistemas de AMS, MiCaDaS permite una alta precisión en las medidas de radiocarbono con un sistema muy compacto y menos complejo, de modo que puede ser instalado

en laboratorios en combinación con otros sistemas complementarios. Se trata de un sistema muy robusto y relativamente fácil en su operación. Están planeadas algunas actualizaciones y mejoras del sistema para ser implementadas en 2023.

MiCaDaS system is an instrument to perform AMS analysis specifically designed for ^{14}C measurements. Its design and functioning follow the basic scheme of other AMS facilities, like the SARA system at CNA. Samples can be either solid or gaseous, and in any case, they are sputtered by Cs⁺ ions in the ion source, producing a negative ion beam. This beam is analyzed by a magnetic field before entering the accelerating part, with 200 kV. In the accelerating stage ions interact with the stripper gas, changing from negative to neutral or positive charge, so that positive ions are accelerated a second time until ground potential, and finally analyzed with magnetic and electric field depending on the charge and mass.

AMS systems determine in a precise way the $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio in the samples, measuring different isotopes in different parts of the system. At the low energy side, the ^{12}C beam intensity is measured. At the high energy side beam intensity for ^{12}C and ^{13}C as well as ^{13}C coming from the breakup of ^{13}CH molecules is measured. ^{14}C counts are also measured.

Currents from stable isotopes are measured in Faraday cups, meanwhile ^{14}C counts are detected in an ionization chamber. Ratios are fractionation and background corrected using the currents measured.

The MiCaDaS system is designed to measure samples with a ratio in the range of 0.002 to 10 ^{14}C with high precision, which includes all the range of the possible archaeological and environmental applications. The sample changing system is equipped with two independent locks allowing a continuous measurement sequence.

Compared to other AMS systems, MiCaDaS allows a high precision radiocarbon dating with a very compact and less complex instrument. Therefore, it can be housed in laboratories in combination with other complementary equipment. It is a robust and friendly user system. An update and upgrade of the system is expected during 2023.

2.5.1. Servicio de Datación por Radiocarbono/ Radiocarbon Dating Service

Como se sabe, es posible estudiar la edad de muestras de interés arqueológico, artístico, histórico, etc., mediante la medida de su contenido en ^{14}C . Este es un radioisótopo de origen cosmogénico y se genera de forma natural en las capas altas de la atmósfera al interaccionar los rayos cósmicos con la misma. Al ser un isótopo del carbono, tiene el mismo comportamiento químico que los isótopos estables.

Asociado al Acelerador MiCaDaS existe un Servicio de Datación por Radiocarbono (^{14}C). En este servicio se incluye un completo laboratorio de preparación de muestras, siendo el primero de su naturaleza en España. Por razones científicas la técnica tradicional de datación por ^{14}C es altamente destructiva (necesita gramos de carbón para datar), consume mucho tiempo de trabajo (al menos se necesitan varias horas por muestra) y es poco productiva (por las razones anteriores).

El uso de un Espectrómetro de Masas con Acelerador (AMS) permite:

- Reducir la cantidad de muestra necesaria para producir una fecha hasta fracciones de milígramo (casi no destructiva, muy importante para objetos de interés especial).

- Realizar la medición en fracciones de hora por muestra y, consecuentemente, es capaz de producir una mayor cantidad de fechas por unidad de tiempo que el método tradicional. La razón para todo ello reside en que mientras que con el método tradicional se mide la radiación emitida por el ^{14}C , con AMS se mide el número de átomos de ^{14}C presente en la muestra.

Samples (archaeological, artistic, historical, etc.) can be dated by measuring their ^{14}C content. This is a cosmogenic radioisotope and is naturally generated in the high layers of the atmosphere through the interaction of cosmic rays with the atmosphere itself. Being a carbon isotope, it has the same chemical behaviour as other carbon stable isotopes.

At CNA, there is a Radiocarbon Dating Service (^{14}C) associated to MiCaDaS Accelerator. This service includes a fully equipped laboratory for sample preparation, the first of its kind in Spain. Because of technical reasons, the traditional radiometric techniques are highly destructive (grams of carbon are required for the analysis), time-consuming (hours per sample) and less productive.

The use of Accelerator Mass Spectrometry allows:

- The reduction to the sub-milligram scale of the sample amount that is required for dating (almost non-destructive, which is really important in the analysis of valuable material).
- Sample measurements in less than one hour, producing a higher number of dating analyses per day than conventional methods (higher productivity). All these advantages are due to the fact that in the traditional procedures, the radiation emitted by ^{14}C is measured, but with AMS, we measure the total number of ^{14}C atoms that are contained in the sample.

El servicio de radiocarbono cuenta con una importante infraestructura: el sistema de medida de C-14 Micadas (Mini Carbon DAting System), dos líneas de grafitización para reducir CO_2 a grafito, un Analizador Elemental para generar CO_2 a partir de muestras orgánicas y el sistema para generar CO_2 a partir de muestras de carbonato. Esto permite atacar una amplia variedad de problemas, ya que gracias a esta infraestructura ha sido posible ir implementando diferentes protocolos de preparación para las diferentes necesidades.

La última actualización importante en este sentido es el trabajo de desarrollo iniciado para la preparación de muestras de carbonato disuelto en líquidos. La metodología habitual consiste en disolver directamente estos carbonatos mediante la adición de ácido a la muestra líquida. Sin embargo, este procedimiento requiere de sistemas complejos y no es fácil de implementar. Como alternativa, se está desarrollando un procedimiento en el que los carbonatos del líquido son precipitados en atmósfera inerte, para luego ser tratados como un sólido. Actualmente se están llevando a cabo diferentes experimentos para optimizar el proceso.

Durante el año 2022 el CNA ha participado en el último Ejercicio Internacional de Intercomparación de Radiocarbono. Los resultados de los laboratorios están todavía recopilándose.

Durante los años 2021 y 2022 se ha preparado 367 y 361 muestras desconocidas respectivamente, para un total de más de 5100 dataciones desde la puesta en marcha del servicio.

The radiocarbon dating service counts with an important infrastructure: the Micadas (MIni CARbon DAting System) C-14 detection system, two graphitization lines to reduce CO_2 to graphite, an Elemental Analyzer to generate CO_2 from organic samples, and the carbonate handling system to generate CO_2 from carbonate samples. With this equipment it is possible to deal with a great variety of research, since it has allowed the implementation of many different sample preparation protocols.

The newest update related to sample preparation is the development of a procedure for dissolved inorganic carbon samples. The usual methodology consists of dissolving the carbonates in the liquid directly by adding acid. But this procedure requires complex systems, and it is no easy to set up. As an alternative, we are developing a procedure in which the carbonate is precipitated under inert atmosphere, and then treated as a solid sample. At the moment several experiments are being carried out to optimize the process.

In 2022 the CNA has participated in the last International Radiocarbon Intercomparison Exercise. Results from the labs are still being collected.

During 2021 and 2022 a number of 367 and 361 unknown samples have been prepared respectively, giving a total of more than 5100 datings since the start of the service.

2.5.2. Laboratorio de grafitización del Centro Nacional de Aceleradores(AGE)/ Automated Graphitisation Equipment(AGE)

Para la medida de muestras de radiocarbono mediante AMS en el CNA se necesitan muestras sólidas de grafito. Las muestras en el laboratorio se limpian, y es necesario extraer el carbono intrínseco a ellas para transformarlo en este material. De forma general, este carbono se extrae en forma de CO₂ y es reducido a grafito mediante un sistema de grafitización.



Figura 2.19: Laboratorio de grafitización /Graphitization laboratory

El sistema automático AGE (Automatic Graphitization Equipment) está directamente conectado a un analizador elemental (EA), y se ha diseñado para preparar muestras de forma eficiente y rápida para su posterior medida por AMS.

Tradicionalmente se ha usado el transporte criogénico del CO₂ generado en la combustión de la muestra hasta los reactores mediante el uso de nitrógeno líquido. En AGE se utiliza una columna rellena de zeolita para atrapar el CO₂ proveniente de la combustión de la muestra en el EA. Después, el CO₂ se libera fácilmente por calentamiento de la trampa de zeolita y se transfiere al reactor por expansión gaseosa. Al evitar el uso del nitrógeno líquido el sistema es muy compacto y permite un

funcionamiento completamente automatizado de los procesos de combustión y grafitización.

El sistema para la obtención de CO₂ a partir de los carbonatos funciona también acoplado al sistema AGE, pero genera el CO₂ mediante disolución en ácido en lugar de por combustión. Utiliza un automuestreador que purga los tubos septum en los que se encuentran las muestras, añade el ácido y transporta el CO₂ generado hasta los reactores.

El sistema completo con válvulas, hornos, sensores de presión y temperatura, está controlado por un ordenador. Un programa en LabView recorre todos los pasos necesarios del proceso de preparación de la muestra: acondicionamiento del catalizador, combustión de la muestra, atrapamiento del CO₂ y su posterior liberación de la trampa, y finalmente el proceso de grafitización en sí mismo.

Como resultado, se obtiene grafito en polvo que se prensa en un cátodo de aluminio con forma cilíndrica listo para ser introducido en el carrusel de muestras de la fuente de iones del acelerador.

For radiocarbon measurements with accelerator mass spectrometry (AMS) at CNA solid graphite targets are required. Samples in the laboratory are therefore cleaned, and intrinsic carbon is extracted to be transformed in such material. In a general way, carbon is extracted as CO₂ and is reduced to graphite with a graphitization system.

The Automated Graphitization Equipment (AGE) is directly coupled to the sample combustion in an elemental analyzer (EA). AGE has been developed for fast and efficient sample preparations for radiocarbon measurement by means of accelerator mass spectrometry.

Traditionally, the cryogenic transport of CO₂ into the graphitization reactors with liquid nitrogen is used after sample combustion. AGE uses instead a column filled with zeolite to trap the CO₂ coming from the combustion in the EA. The CO₂ can then be easily released by heating the zeolite trap and transferred to the reactor by gas expansion. The consequence of the AGE avoiding the use of liquid nitrogen is, that it is very compact and allows running fully automated for sample combustion and graphitization.

The Carbonate Handling System (CHS) to obtain CO₂ from carbonate samples is also coupled to AGE, but generates CO₂ by acid dissolution instead of combustion. It uses an autosampler that purges the septum tubes in which the samples are stored, adds the acid, and transports the generated CO₂ to the reactors.

The entire system with valves, ovens, temperature and pressure sensors is computer controlled. A LabVIEW program runs through all consecutive steps when processing a sample: catalyst preconditioning, sample combustion in the EA and CO₂ trapping, thermal CO₂ release from the trap into the reactor, and finally the graphitization reaction itself.

The final graphite powder is pressed into an aluminum cylindrical target, which is ready for AMS measurement.

2.6. Laboratorio de Radiación Gamma/ Gamma Radiation Laboratory.

Entre las infraestructuras del Centro Nacional de Aceleradores se cuenta con un laboratorio basado en un sistema de irradiación con fotones gamma (RadLab). Complementando así la línea de investigación en irradiación con partículas desarrollada en los Aceleradores Tándem de 3 MV y Ci-

clotróon.

El laboratorio se encuentra situado en la planta sub-sótano del edificio. El irradiador y los sistemas auxiliares se alojan en una sala de $5,8 \times 4,8 \times 3$ m³, construida con un blindaje a base de muros y techo de hormigón armado especialmente diseñados para cumplir con la normativa vigente sobre Protección Radiológica. Un pasillo en forma de laberinto da acceso a la sala de control, igualmente blindada, donde se encuentra la consola de control del irradiador, el sistema de seguimiento dosimétrico, así como los equipos asociados a vigilancia y seguridad radiológica.

Se cuenta con uno de los equipos de radiación gamma para investigación más versátiles, el modelo Gammabeam® X200 (GBX200) de la empresa Best Theratronics. Consiste en un cabezal rotatorio (360°) de acero, relleno de plomo y tungsteno, donde se aloja una fuente radiactiva de cobalto (⁶⁰Co). Mediante un pistón neumático, la fuente se desplaza horizontalmente entre las posiciones de reposo y exposición. En esta posición, el blindaje tiene una apertura cónica donde se encuentra un colimador ajustable, que permite obtener diferentes campos de irradiación cuadrados. Además, se le puede añadir un sistema auxiliar de plomo para reducir la penumbra, donde cabe la posibilidad de adaptar máscaras de diferentes tamaños y formas para seleccionar áreas de irradiación específicas.

El GBX200 contiene una fuente isotópica de ⁶⁰Co fabricada por MDS-Nordion. Mediante el bombardeo neutrónico de ⁵⁹Co en un reactor se produce el isótopo ⁶⁰Co. Éste, con una vida media de 5.26 años, decae a ⁶⁰Ni mediante desintegración beta emitiendo rayos gamma de 1.17 y 1.33 MeV. La fuente instalada en el irradiador del CNA cuenta con una actividad de 141 TBq (3.8 kCi), a fecha de diciembre de 2020. Variando la distancia de la muestra a la fuente y con el uso de un atenuador, es posible obtener un amplio rango de tasa de dosis entre 0.05 y 160 Gy/h. El tamaño de campo de irradiación es variable, siendo el mayor de 140x140 cm² a la máxima distancia posible del blanco a la fuente.

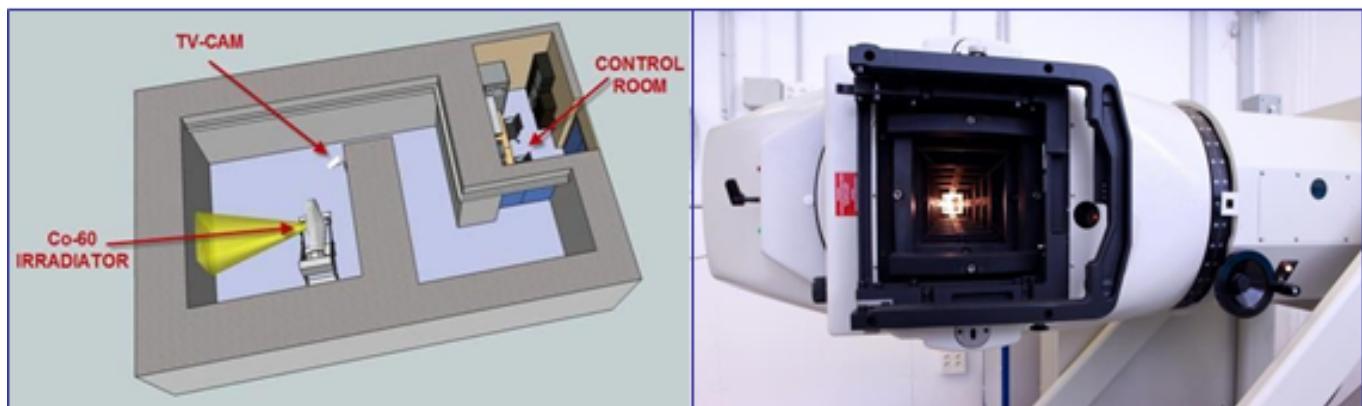


Figura 2.20: Plano general del Laboratorio de Radiación Gamma del CNA(RadLab). Detalle del irradiador GBX200/ General layout of the CNA Gamma Radiation Laboratory (RadLab). Detail of the GBX200 irradiator

En RadLab, los procedimientos de calibración y dosimetría, tanto en agua como en aire, se han establecidos conforme a los protocolos TRS-398 y TRS-469 de la IAEA respectivamente. Asimismo, los procedimientos dosimétricos se han sometido hasta el momento a tres ejercicios de intercomparación, siempre junto al laboratorio ESTEC de la ESA (Agencia Espacial Europea), a los que se han sumado otros destacados laboratorios internacionales (CRC-UCL en Bélgica; TL-ISDE en Rusia, UML en EEUU, CERN en Suiza, TRAD en Francia y SL en Austria).

Esta instalación está disponible para la utilización por parte de toda la comunidad científica y

empresas interesadas en diferentes campos de aplicación. La puesta a punto del laboratorio se ha realizado junto a la empresa ALTER Technology (TÜV NORD). El uso principal es llevar a cabo ensayos de irradiación TID (Total Ionizing Dose) en componentes de uso aeroespacial, sector donde se exceden los requerimientos demandados por la normativa actual aplicable (ESCC, MIL-STD o ASTM). Además del campo aeroespacial, se hace uso de la instalación para otro tipo de ensayos de interés en aplicaciones como Física de Altas Energías, Ciencia de Materiales, Patrimonio Histórico, Medicina y Agricultura.

Actualmente están disponibles los ensayos combinados de radiación con temperatura. Recientemente, se ha incrementado la versatilidad del laboratorio para llevar a cabo ensayos a alta y baja temperatura, con o sin ciclado térmico. Se ha diseñado y fabricado un sistema móvil que puede adaptarse además a las líneas de los aceleradores tandem 3MV y ciclotrón. El sistema cubre bien el rango típico entre -60 °C y 125°C.

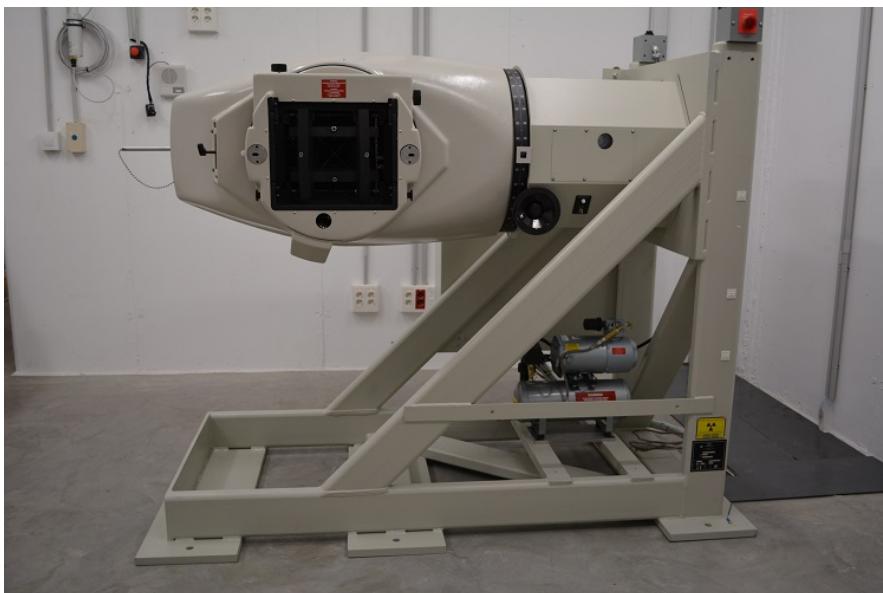


Figura 2.21: Detalle del irradiador GBX200 y cámara de ciclado térmico. / Detail of the GBX200 irradiator and the thermal cycling chamber.

One of the infrastructures at the National Centre for Accelerators is the laboratory based on a gamma photon irradiation system (RadLab). Therefore, complementing the research in ion irradiation developed in the 3 MV Tandem and Cyclotron Accelerators.

The laboratory is sited in the basement of the building. The irradiator and auxiliary systems are housed in a room ($5.8 \times 4.8 \times 3$ m 3) built with walls and ceiling shielded made of reinforced concrete, especially designed based on current regulations of radiation protection. A labyrinth shaped passage gives access to the control room, also shielded, where are placed the irradiator control console, the dosimetric monitoring system and the radiation safety monitoring equipment.

The CNA has one of the gamma radiation equipment for research most versatile, the model Gammabeam ® X200 (GBX200) of Best Thertronics company. It comprises a steel rotary head (360°) filled with lead and tungsten, where is placed a radioactive source of ^{60}Co . By using an air cylinder, the double-encapsulated source is slid horizontally between the fully shielded position and the fully exposed position. In this location, the shield has a conical opening which contains a variable collimator system, providing different square irradiation fields. Moreover, detachable trimmers, which provide an improved penumbra, are available and it is also possible to adapt on them masks

of different sizes and shapes to select specific areas of irradiation.

The GBX200 contains an isotopic source of ^{60}Co manufactured by MDS-Nordion. The ^{60}Co isotope is produced in a reactor by neutron bombardment of the ^{59}Co stable isotope. With a half-life of 5.26 years, the ^{60}Co nucleus decays to become ^{60}Ni by beta emission and two associated gamma rays with energy of 1.17 and 1.33 MeV. The source installed in the irradiator of this Centre has an activity of 141 TBq (3.8 kCi), in December 2020. By adjusting the distance of the sample to the source and by means of an attenuator, it is possible to obtain a wide range of dose rate from 0.05 to 160 Gy/h. The irradiation field size is also variable; the largest field is 140x140 cm² at the maximum distance from the source.

In RadLab, the calibration and dosimetry procedures are performed in full compliance, either in water or in air, with TRS-398 and TRS-469 IAEA protocols. Likewise, three intercomparison exercises on dosimetry procedures were undergone, always together with the ESTEC laboratory of ESA (European Space Agency), and other leading international laboratories (CRC-UCL in Belgium; TL-ISDE in Russia, UML in the US, CERN in Switzerland, TRAD in France and SL in Austria).

This facility is available for use by the whole scientific community and companies interested in different fields of application. The laboratory set-up has been done together with the company ALTER Technology (Member of TÜV NORD). The primary objective is to perform TID (Total Ionizing Dose) irradiation tests on devices for aerospace application. Our facility will exceed the requirements currently demanded by the industrial sector and applicable standards such as ESCC, MIL-STD or ASTM. Besides aerospace, the facility is used for applications in High Energy Physics, Materials Science, Historical Heritage, Biomedical and Agriculture.

Combined irradiation tests with temperature are currently available. Recently, it has been increased the versatility of the laboratory carrying out high and low temperature tests, with or without thermal cycling. A movable system has been designed and manufactured that can also be adapted to the 3MV tandem accelerator and cyclotron lines. The system covers the typical range between -60°C and 125°C.

Investigación/ Research

Capítulo 3

Investigación/ Research.

3.1. Unidad de Investigacion de Técnicas de Análisis y Modificación de Materiales con Haces de Iones/ Ion Beam Analysis and Modification os Materials Research Strand.

3.1.1. Ciencia de Materiales/ Materials Science

Estudio de la supresión de ganancia en LGADs inducido por la densidad de ionización de carga.

Los detectores de avalanchas de baja ganancia (LGAD) son sensores de silicio n+-on-p con ganancia intrínseca. Esta tecnología ha sido desarrollada en el marco de la Colaboración CERN RD50, que comenzó en 2001 y cuyo objetivo es el desarrollo de detectores de silicio con alta resistencia a la radiación para el HL-HLC y otros futuros experimentos con colisionadores. El uso de LGADs está previsto en la actualización del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en los casos en los que, además de una buena resolución espacial, se necesita una excelente resolución temporal para determinar y asignar correctamente las trazas donde hay un gran número de interacciones individuales.

Para asegurar una buena interpretación de los datos obtenidos en un experimento con LGADs, es fundamental conocer el valor de ganancia en todo momento, ya que las variaciones de ganancia durante el funcionamiento del sensor pueden degradar la resolución temporal. La ganancia depende de la temperatura y del voltaje de polarización inversa, y también cambia cuando el detector se daña si se somete a un campo de radiación elevado.

En este trabajo, se han realizado experimentos de carga inducida por haz de iones (IBIC) e IBIC resuelta en tiempo (TRIBIC) para estudiar en detalle un nuevo mecanismo de supresión de ganancia en LGAD, relacionado con la densidad de carga de ionización creada en el detector. Para modificar este parámetro, se realizaron medidas en la línea de microhaz del CNA utilizando un haz de protones de 3 MeV y un portamuestras especial que nos permite girar el detector con una precisión angular de 1º sin necesidad de romper el vacío.

Los resultados experimentales indican que las curvas de ganancia hasta 50º muestran un crecimiento monótono a medida que aumenta el ángulo de incidencia (Fig. 3.1). Este comportamiento se correlaciona con una disminución progresiva en la proyección de la densidad del portador a lo largo de la capa de multiplicación. Esta disminución en la ganancia da como resultado una distorsión significativa de las formas de onda de corriente transitoria medidas por la técnica TRIBIC debido a un déficit en el componente de huecos secundarios. Para ángulos de incidencia tales que el pico de Bragg cae dentro del volumen sensible del detector, la formación de microplasmas modifica el comportamiento de las curvas de ganancia, produciendo una disminución abrupta de la ganancia a medida que aumenta el ángulo. En resumen, esta magnitud, junto con la temperatura o la tensión aplicada, es por tanto un factor importante a considerar para una mejor comprensión y control de la

ganancia en estos detectores.

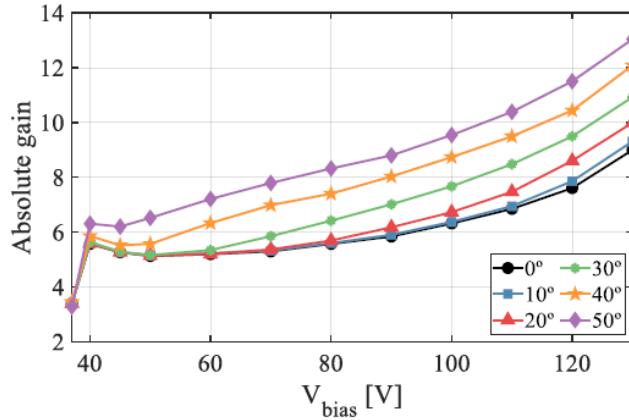


Figura 3.1: Curvas de ganancia absoluta para ángulos de incidencia entre 0º y 50º

Resistencia a la radiación de microdosímetros de silicio-3D.

La hadronterapia es una forma de radioterapia externa que utiliza protones e iones pesados para tratar el cáncer. Consigue una conformidad de la dosis muy alta alrededor del objetivo tumoral, lo que permite una mejor protección de los órganos en riesgo al tiempo que disminuye los efectos secundarios de la radiación. Para una mayor optimización del tratamiento es fundamental la cuantificación precisa de la energía suministrada por los iones a lo largo de la traza de las partículas a nivel microscópico, lo que sólo es posible con microdosímetros avanzados.

A ese respecto, el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (MB) lleva desde hace años desarrollando microdosímetros de silicio 3-D con forma cilíndrica y dimensiones similares a una célula humana (diámetro \approx 25 micras y espesores entre 10 y 20 micras). Las propiedades espectrométricas y de transporte de dichos detectores fueron recientemente estudiadas por nuestro grupo, donde se desarrolló un nuevo método para medir la dependencia radial de la Eficiencia de colección de carga (CCE) a través de los espectros de energía [1].

El conocimiento de la CCE es un parámetro fundamental para evaluar correctamente la respuesta de estos dosímetros en condiciones reales de trabajo en un centro de protonterapia [2].

En este trabajo se ha puesto en marcha un nuevo sistema de adquisición de datos conectado a nuestra microsonda nuclear, que permite registrar medidas evento a evento (modo List). Esta electrónica se ha utilizado, junto con un programa de Matlab desarrollado por nuestro grupo, para estudiar la degradación de estos sensores con la dosis irradiada, usando un microhaz de protones de 1.17 MeV. Los resultados indican que las propiedades espectrométricas de estos detectores apenas cambian para dosis de hasta 5 kGy, unas 100 veces mayores que las utilizadas en un tratamiento típico de protonterapia, lo cual demuestra que su resistencia a la radiación es suficientemente alta para esta aplicación. Para dosis mayores, la CCE sufre una degradación progresiva, siendo esta mucho más acentuada en los bordes del detector y menor en el centro

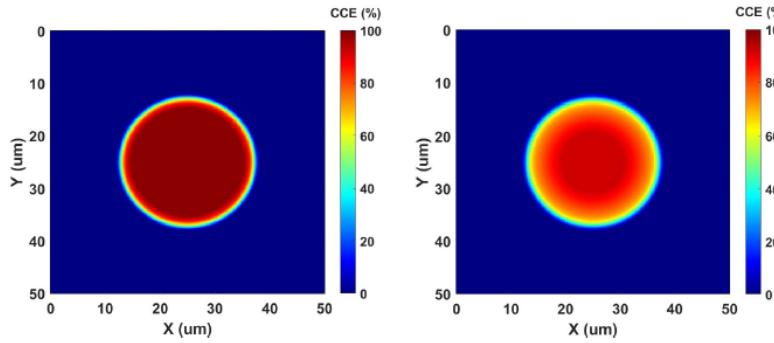


Figura 3.2: Mapas radiales de CCE en 2D en función de la fluencia irradiada de protones. Dosis: Izquierdo 5 kGy; Derecha 42 kGy

Dinámica de los efectos de la radiación en silicio estudiada con haces de iones pulsados.

La dinámica de los defectos estructurales creados en dispositivos semiconductores y detectores por irradiación de iones presenta un problema de múltiples escalas con tiempos característicos que van desde picosegundos hasta segundos. En el marco del Proyecto Coordinado de Investigación titulado “Evolución estructural espacio-temporal de materiales inducida por haces de iones: Aceleradores para una nueva era tecnológica” de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) (Fig. 3.3), el CNA ha establecido una colaboración con el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) para estudiar el efecto del flujo de iones en la formación de defectos en silicio.



Figura 3.3: Investigadores principales del Proyecto de Investigación Coordinado de la IAEA “Evolución estructural espacio-temporal de materiales inducida por haces de iones: Aceleradores para una nueva era tecnológica”.

El Experimento de Compresión de Deriva Neutralizada (NDCX-II) en LBNL es un acelerador que emite haces de iones pulsados ultracortos y muy intensos, lo que permite el acceso a estudios de dinámica de defectos en una escala de tiempo de nanosegundos. En el CNA hemos utilizado la técnica de carga inducida por haz de iones (IBIC) para comparar cambios en la eficiencia de recolección de carga (CCE) de diodos de silicio irradiados con la misma dosis de iones He⁺ de 1 MeV, pero a tasas de dosis que difieren en 11 órdenes de magnitud. Para un alto flujo de iones, hasta $\sim 4 \times 10^{19}$ iones $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, se empleó el acelerador NDCX-II utilizando pulsos de iones individuales de unos pocos ns de duración, mientras que las irradiaciones de bajo flujo ($\sim 10^8$ iones $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) se realizaron con el acelerador Tándem de 3 MV del CNA, utilizando una microsonda nuclear. Observamos un flujo de

iones umbral de $\sim 2 \times 10^{19}$ iones $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ para el inicio de una mayor acumulación de daño para las irradiaciones pulsadas.

En esas condiciones, el análisis de los diodos indica un aumento en la probabilidad de atrapamiento de electrones para pulsos de iones de alto flujo en un factor de 3 en comparación con las irradiaciones convencionales de bajo flujo. Por otro lado, observamos que los pulsos de iones de alto flujo también recuperan parcialmente los defectos estructurales en muestras dañadas a través de intensas excitaciones locales y calentamiento

Mediante ese trabajo hemos constatado que los intensos pulsos de iones brindan acceso al dominio del tiempo en estudios de efectos de radiación y permiten nuevas direcciones en ingeniería de defectos para aplicaciones en ciencia de la información cuántica.

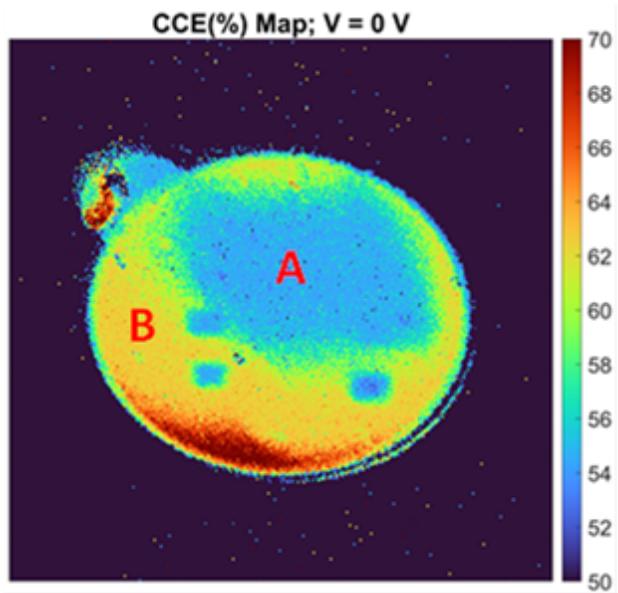


Figura 3.4: Capa de CCE de un diodo de silicio tras una irradiación consecutiva con bajo y alto flujo iónico

Formación de defectos en silicio mediante pulsos iónicos de aceleración láser

En el marco de un proyecto coordinado del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) titulado "Ion beam induced spatio-temporal structural evolution of materials: Accelerators for a new technology era", hemos estudiado la formación de defectos estructurales en silicio utilizando pulsos intensos de iones procedentes de la aceleración láser. Los pulsos de iones se generaron utilizando el láser BELLA petawatt del LBNL, enfocando pulsos láser sobre un blanco de kapton para intensidades de $12 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$. De esta manera se forman pulsos de iones cortos ($\sim 10 \text{ ns}$) e intensos con niveles de flujo de hasta $10^{22} \text{ iones/cm}^2/\text{s}$ que dañan, implantan, dopan y calientan simultáneamente las muestras de silicio. Tras la exposición a un único pulso o a una serie de pulsos de protones e iones, se caracterizaron los cambios resultantes en la estructura superficial de muestras de silicio monocrystalino y se analizaron su composición química local y sus propiedades estructurales y ópticas.

Nuestra principal contribución a este trabajo ha sido determinar la concentración y distribución en profundidad del ^{12}C en las muestras. Para ello utilizamos la reacción nuclear $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p})^{13}\text{C}$ con un haz de deuterones de 1,4 MeV, y un detector de silicio colocado a un ángulo de dispersión $\theta=150$ grados. Las imágenes ópticas de las muestras indican cambios topográficos superficiales muy poco uniformes a lo largo del punto de impacto nominal de 5 mm. (Fig. 3.5 superior). Por este motivo, realizamos un barrido de 6 (muestra irradiada con 10 pulsos) y 8 (muestra irradiada con 100 pulsos) mediciones a lo largo de la dirección horizontal con pasos de 1 mm. En la figura 3.6 inferior se muestran tres espectros representativos de la muestra 100x.

La simulación de los espectros de la NRA indicó que cerca de la superficie de las muestras se implanta

una alta fluencia de iones de carbono de baja energía, $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ por pulso, unos cuatro órdenes de magnitud superior a la fluencia de iones MeV.

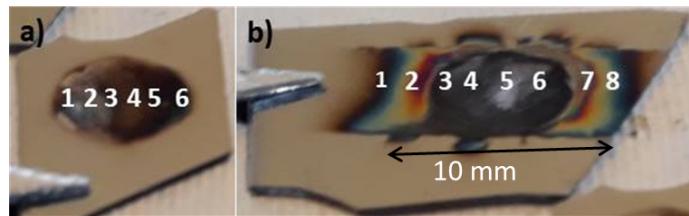


Figura 3.5: Fotografía de las muestras (a) pulso 10x y b) pulsos 100x con los correspondientes puntos de escaneo donde se han realizado los análisis.

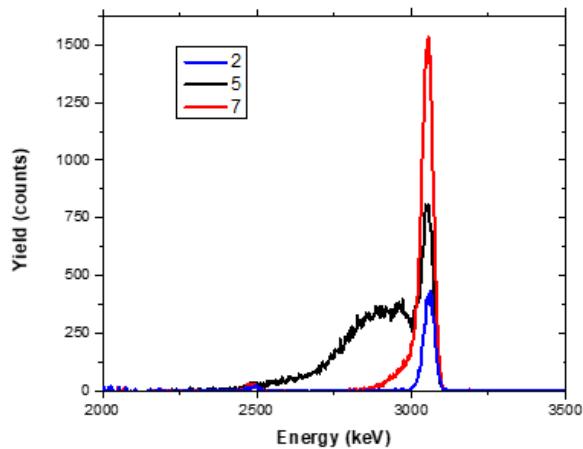


Figura 3.6: Espectros NRA de la muestra de pulso 100x correspondiente utilizando la reacción $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p})^{13}\text{C}$ con deuterones a una energía de 1,4 MeV

Este resultado concuerda con el proceso de dopaje de alto flujo basado en la alineación espaciotemporal de iones de alta energía procedentes de la aceleración de la envoltura normal del blanco (target normal sheath acceleration, TNSA) e iones de baja energía procedentes de la expansión del plasma de la lámina irradiada por el láser, que se implantan cerca de la superficie y luego difunden rápidamente en la muestra de silicio que fue precalentada localmente por los iones de alta energía. Este hallazgo abre una nueva dirección para la exploración del dopaje superficial de alto flujo y la síntesis de materiales. Las mediciones realizadas en el LBNL indican que los centros de color, predominantemente W y G-centers, se forman directamente en respuesta a los pulsos de iones sin un paso consecutivo de recocido térmico. En conclusión, la aceleración iónica por láser amplía la gama de parámetros para la ingeniería de defectos y el dopaje de semiconductores con equilibrios sintonizables de flujo iónico, tasas de daño y calentamiento local.

In 2012, our group put into operation at CNA the IBIC (Ion Beam Induced Current) technique, an advanced analytical technique that uses MeV ion beams to study properties of semiconductor devices. The following is a brief description of the projects we are currently working on.

Study of Ionization Charge Density-Induced Gain Suppression in LGADs.
Low Gain Avalanche Detectors (LGADs) are n+-on-p silicon sensors with intrinsic gain. This technology has been developed in the framework of the CERN RD50 Collaboration, which started in

2001 and whose objective is the development of silicon detectors with high radiation resistance for the HL-HLC and others future collider experiments. The use of LGADs is foreseen in the Large Hadron Collider (LHC) upgrade in cases where, in addition to good spatial resolution, excellent temporal resolution is needed to correctly determine and assign traces where there are a large number of individual interactions. To ensure a good interpretation of the data obtained in an experiment with LGADs, it is essential to know the gain value at all times, as gain variations during sensor operation can degrade the temporal resolution. The gain is dependent on temperature and reverse bias voltage, and also changes when the detector is damaged if it is subjected to a high radiation field.

In this work, Ion Beam Induced Charge (IBIC) and Time Resolved-IBIC (TRIBIC) measurements have been performed to study in detail a new gain suppression mechanism in LGADs, related to the ionization charge density created on the detector [1]. To modify this parameter, measurements were performed at the microbeam line of the CNA using a 3 MeV proton beam and an especial sample holder that allow us to rotate the detector in vacuum. The experimental results indicate that the gain curves up to 50° show a monotonic growth as the incident angle increases. This behaviour correlates with a progressive decrease in the projection of the carrier's density along the multiplication layer (Fig. 3.3). This decrease in gain results into a significant distortion of the transient current waveforms measured by the TRIBIC technique due to a deficit in the secondary holes component. For angles of incidence such that the Bragg peak falls within the sensitive volume of the detector, the formation of microplasmas modifies the behavior of the gain curves, producing an abrupt decrease in gain as the angle increases. In summary, this magnitude, together with temperature or applied voltage, is therefore factor to consider for a better understanding and control of the gain in these detectors.

Radiation hardness of 3D-silicon microdosimeters.

Hadronetherapy is a form of external radiation therapy that uses protons and heavy ions to treat cancer. It achieves very high dose compliance around the tumor target, allowing better protection of organs at risk while decreasing the side effects of radiation. For further optimization of the treatment, the precise quantification of the energy supplied by the ions along the particle trace at the microscopic level is essential, which is only possible with advanced microdosimeters. In this regard, the Barcelona Institute of Microelectronics (MB) has been developing for years 3-D silicon microdosimeters with a cylindrical shape and dimensions similar to a human cell (diameter \approx 25 microns and thicknesses between 10 and 20 microns). The spectrometric and transport properties of such detectors were recently studied by our group, where a new method was developed to measure the radial dependence of the Charge Collection Efficiency (CCE) using the energy spectra [1]. Knowledge of the CCE is a fundamental parameter to correctly evaluate the response of these dosimeters in real working conditions in a proton therapy center [2]. In this work, a new data acquisition system connected to our nuclear microprobe has been installed, which allows measurements to be recorded event by event (List mode). This electronics has been used, together with a Matlab program developed by our group, to study the degradation of these sensors with the irradiated dose, using a 1.17 MeV proton microbeam. The results indicate that the spectrometric properties of these detectors hardly change for doses of up to 5 kGy, about 100 times higher than those used in a typical proton therapy treatment, which demonstrates that their radiation resistance is high enough for this application. For higher doses, the CCE suffers a progressive degradation, this being much more pronounced at the edges of the detector and less in the center (Fig.).

Dynamics of radiation effects in silicon studied with pulsed ion beams and ion beam charge collection

The dynamics of structural defects created in semiconductor devices and detectors by ion irradiation present a multi-scale problem with characteristic times ranging from pico-seconds to seconds. Within the frame of the Coordinated Research Project entitled “Ion beam induced spatio-temporal

structural evolution of materials: Accelerators for a new technology era“ from the International Atomic Energy Agency (IAEA), the CNA has established a collaboration with the Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) to study the effect of ion flux on defect formation in silicon. The Neutralized Drift Compression Experiment (NDCX-II) at LBNL is an accelerator that delivers very intense and short pulsed ion beams, allowing access to defect dynamics studies at the nanosecond time scale. At the CNA, we have used the Ion Beam Induced Charge (IBIC) technique to compare changes in the charge collection efficiency (CCE) of silicon diodes irradiated with 1 MeV He⁺ ions at dose rates that differ by 11 orders of magnitude. For high ion flux, up to $\sim 4 \times 10^{19}$ ions cm⁻²s⁻¹, the NDCX-II accelerator was employed using single ion pulses of a few ns duration, while the low flux irradiations (10^8 ions cm⁻²s⁻¹) were performed with the 3 MV Tandem accelerator of the CNA, using a nuclear microprobe. We observe a threshold ion flux of $\sim 2 \times 10^{19}$ ions cm⁻²s⁻¹ for the onset of increased damage accumulation for pulsed irradiations. The analysis of the diodes indicates an increase in the electron trapping probability for high flux ion pulses by a factor of 3 compared to conventional low flux irradiations. We observe that high flux ion pulses also partially anneal pre-damaged samples through intense local excitations and heating. In summary, intense ion pulses provide access to the time domain in studies of radiation effects and enable new directions in defect engineering for applications in quantum information science.

Defect formation in silicon using ion pulses from laser acceleration

In the frame of a coordinated project of the International Atomic Energy Agency (IAEA) entitled “Ion beam induced spatio-temporal structural evolution of materials: Accelerators for a new technology era”, we have studied the formation of structural defects in silicon using intense ion pulses from laser acceleration [1]. The ion pulses were generated using the BELLA petawatt laser of the LBNL, by focusing laser pulses on a kapton foil target for intensities of 12×10^{18} W/cm². Short (~ 10 ns), intense ion pulses with ion flux levels up to 10^{22} ions/cm²/s are formed which simultaneously damage, implant, dope and anneal silicon samples. Following exposure to a single pulse or to a series of proton and ion pulses, the resulting changes in the surface structure of single crystal silicon samples were characterized and analyzed their local chemical composition, structural and optical properties.

Our main contribution to this work has been to determine the concentration and depth distribution of ¹²C in the samples. For that purpose we used the nuclear reaction ¹²C(d,p)¹³C with a 1.4 MeV deuteron beam with the detector placed to $\Theta=150$ degrees. Optical images of the samples indicate highly non-uniform surface topography changes across the 5 mm nominal beam spot. (Fig.3.5). For that reason we performed a scan of 6 (10x pulse sample) and 8 (100x pulse sample) measurements along the horizontal direction with 1 mm steps/point. Three representative spectra of the 100 shots sample are shown in Figure 3.6. Simulation of the NRA spectra indicated that a high fluence of low energy carbon ions, $\sim 10^{16}$ cm⁻² per pulse is implanted near the surface of the samples, about four orders of magnitude higher than the fluence of MeV ions.

This result is in agreement with the high flux doping process based on the spatio-temporal alignment of high energy ions from target normal sheath acceleration (TNSA) and low energy ions from plasma expansion of the laser-foil target, which are implanted near the surface and then quickly diffuse into silicon samples that were locally pre-heated by high energy ions. This finding opens a new direction for exploration of high flux surface doping and synthesis of materials. Measurements at LBNL indicates that color centers, predominantly W and G-centers, form directly in response to ion pulses without a consecutive thermal annealing step. In conclusion, laser ion acceleration expands the parameter range for defect engineering and doping of semiconductors with tunable balances of ion flux, damage rates and local heating.

3.1.2. Patrimonio Cultural/ Cultural Heritage

Dentro de la denominada “Ciencia en Patrimonio Cultural”, la utilización de técnicas nucleares no destructivas de análisis e imagen siguen jugando un importantísimo papel en multitud de estudios de objetos muy diversos. El grupo de Física Nuclear Aplicada en Patrimonio Cultural del CNA sigue manteniendo una intensa actividad en este campo, continuando su actividad investigadora en el periodo 2021-2022 en varios Proyectos: el estudio y análisis de las monedas del tesoro de Tomares, en el desarrollo de nuevos métodos de imagen de gran poder de penetración para objetos opacos para los métodos convencionales mediante Rayos X, y en el diseño y fabricación de un sistema de escaneo para radiografiado de obras (principalmente cuadros) de gran formato.

Tras el cierre del Museo Arqueológico de Sevilla para acometer una reforma integral del mismo, se continúa con el estudio del tesoro de Tomares en el CITIUS gracias al traslado de parte de las monedas a este Centro de la Universidad de Sevilla, donde se ha continuado con las labores de limpieza, catalogación, documentación gráfica y análisis no destructivo de las mismas. Este trabajo continuado ha permitido que en la actualidad se lleven estudiadas y catalogadas un 10 % del total de las 55000 monedas que constituyen el tesoro. Se ha comenzado también la publicación de los primeros resultados de dicho estudio, comenzando por un estudio individualizado de cada una de las cecas en los distintos periodos temporales que abarca el tesoro.

Por otra parte, se ha continuado con el estudio sobre la capa superficial enriquecida en Ag, obtenida de manera probablemente intencionada, y que produciría una apariencia de mayor ley en las monedas. Se han continuado las tareas de arqueología experimental, fabricando cospeles con composición similar a las monedas, que se someten a procesos térmicos y mecánicos que simularían los procesos que podrían haberse seguido en las cecas romanas para la obtención de esa pátina rica en Ag. Seguimos estudiando un conjunto muy reducido de monedas y los cospeles así fabricados con distintas técnicas (FIB, SEM, RBS...) para determinar el proceso físico que origina la aparición de dichas capas y que sigue siendo objeto de controversia entre los distintos especialistas internacionales en la materia.

Por otro lado, el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico (IAPH) está llevando a cabo la restauración y estudio de dos efebos romanos en bronce de época Altoimperial (siglo I-II d.C.) encontrados en el municipio cordobés de Pedro Abad. A estas excepcionales piezas, de gran valor histórico y artístico, se le está realizando un exhaustivo estudio científico para avanzar en el conocimiento sobre la materialidad, técnica de ejecución y estado de conservación, en el que está participando el CNA. En concreto, durante el periodo que abarca esta Memoria, hemos realizado en el CNA distintas gammagraffías y una tomografía computerizada (CT) de la cabeza del Efebo Dionisíaco y de la mano del Efebo Apolíneo. Estas técnicas no destructivas son capaces de proporcionar imágenes de contraste de densidades del interior de las piezas al irradiarlas con la fuente gamma de ^{60}Co del servicio de irradiación del CNA. Esta fuente de altísima intensidad emite fotones gamma (1,17 y 1,33 MeV) que permiten sondar objetos que, por su densidad o espesor, son radiopacos a la radiología CT convencional. De este modo se obtiene una información no visible empleando otras técnicas y sin afectar a la integridad de los materiales analizados. Por ejemplo, nos permite distinguir grietas ocultas, técnicas de ejecución de la pieza, espesor de las paredes metálicas en cualquier sección y ofrece reconstrucciones y modelos 3D. Para este estudio se utilizó el equipo de rotación diseñado en el CNA y que permite rotar con muy alta precisión objetos de gran volumen y peso delante de los distintos sistemas de irradiación con que contamos en el Centro: tubos de Rayos X con ánodos de W y Mo, irradiador de ^{60}Co y fuente de neutrones HISPANOS. También se utilizó la nueva cámara de centelleo (Ofelia) que permite un fácil intercambio del material centelleador que la hace idónea para todo tipo de radiografías, tanto de rayos X convencionales, como las más novedosas utilizando gammas o haces de neutrones.

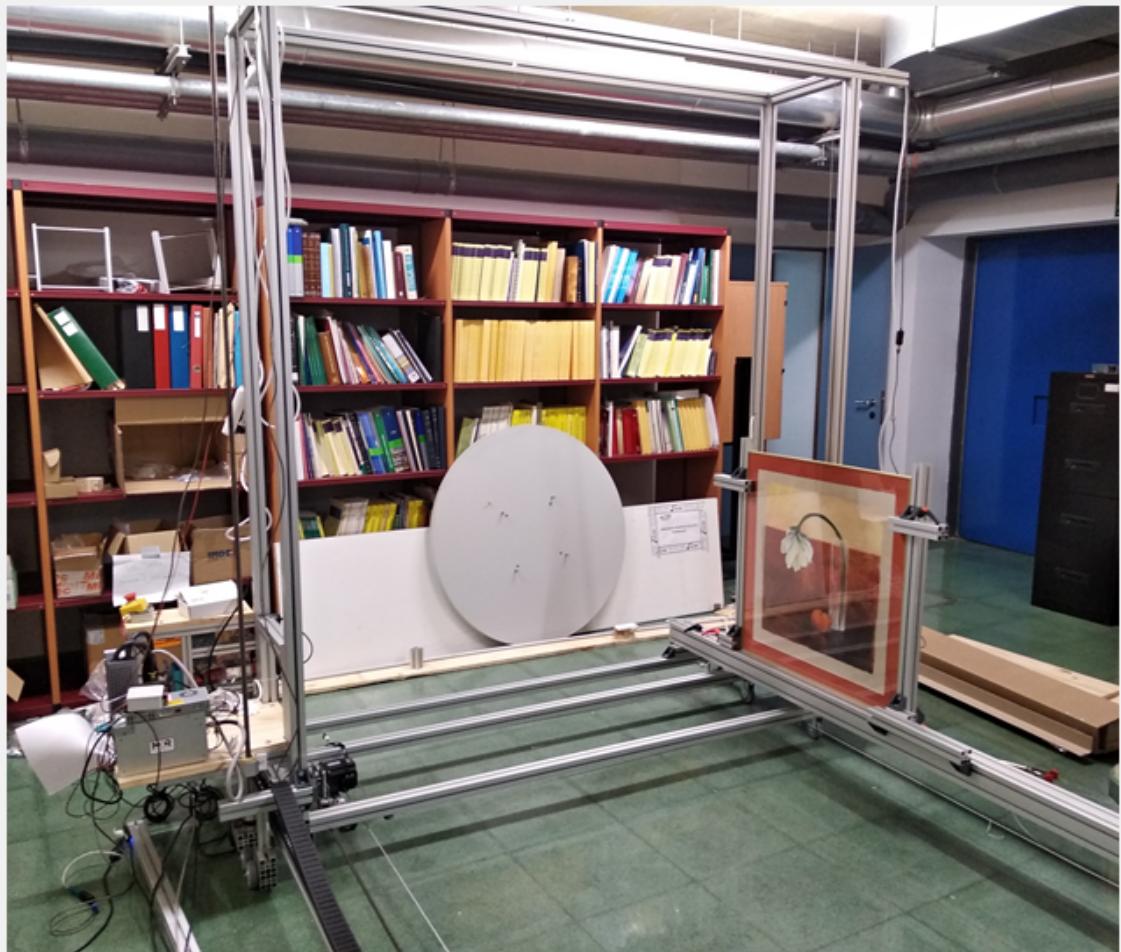


Figura 3.7: Sistema de Barrido Automatizado

Por último, se ha diseñado y construido un sistema de barrido automatizado para el radiografiado de cuadros de gran formato, que posibilita mediante el ensamblaje de radiografías obtenidas con la cámara de centelleo descrita más arriba, una imagen en mosaico de obras de grandes dimensiones. El sistema puede usarse no sólo para la obtención de radiografías, sino que acoplando una cámara de IR podemos obtener imágenes de reflectografía en el infrarrojo (IRR) para estudiar posibles dibujos subyacentes y arrepentimientos. También podemos acoplar un sistema de MA-XRF que permite obtener mapas en falsos colores de la composición multielemental ofrecida por la técnica de fluorescencia de rayos X para la determinación de la paleta de pigmentos empleada por el pintor, así como de las combinaciones de los mismos que generan las distintas tonalidades de la obra.

In the field known as 'Science in Cultural Heritage,' the use of non-destructive nuclear techniques for analysis and imaging continues to play a crucial role in numerous studies of diverse objects. The Applied Nuclear Physics in Cultural Heritage group at CNA (Center for Advanced Studies in Nuclear Physics and Accelerators) maintains a robust presence in this field, sustaining intensive research activities during the 2021-2022 period across various projects. These projects include the study and analysis of the treasure coins of Tomares, the development of new high-penetration imaging methods for opaque objects not suitable for conventional X-ray methods, and the design and construction of a scanning system for radiographing large-format works (primarily paintings)

Following the closure of the Archaeological Museum of Seville for a comprehensive renovation, the study of the Tomares treasure continues at CITIUS (Center for Scientific and Technological Research at the University of Seville). Part of the coins has been relocated to this center, where ongoing activities involve cleaning, cataloging, graphic documentation, and non-destructive analysis.

This continuous effort has resulted in the study and cataloging of 10 % of the total 55,000 coins constituting the treasure. Additionally, the publication of the initial findings has begun, starting with an individualized study of each mint in the different temporal periods covered by the treasure.

Furthermore, research continues on the intentionally enriched Ag (silver) surface layer, creating an appearance of higher fineness in the coins. Experimental archaeology tasks persist, involving the manufacture of blanks with compositions similar to the coins. These blanks undergo thermal and mechanical processes simulating those that might have been employed in Roman mints to obtain the silver-rich patina. A limited number of coins and the blanks produced using various techniques (FIB, SEM, RBS, etc.) are being studied to determine the physical process behind the appearance of these layers, which remains a subject of controversy among international specialists.

On another front, the Andalusian Institute of Historical Heritage (IAPH) is conducting the restoration and study of two Roman bronze ephebos from the Early Imperial period (1st-2nd centuries AD) found in the municipality of Pedro Abad. These exceptional pieces, of great historical and artistic value, undergo a thorough scientific study to advance knowledge of materiality, execution techniques, and conservation status, with the participation of CNA. During this reporting period, various gamma-ray scans and a computed tomography (CT) of the heads of the Dionysian Ephebos and the hand of the Apollonian Ephebos have been conducted at CNA. These non-destructive techniques provide contrast images of the internal densities of the pieces by irradiating them with the ^{60}Co gamma source at CNA's irradiation service. This high-intensity source emits gamma photons (1.17 and 1.33 MeV) capable of probing objects that, due to density or thickness, are radiopaque to conventional CT radiography. This approach provides information not visible using other techniques and without compromising the integrity of the analyzed materials. For example, it allows the detection of hidden cracks, execution techniques, thickness of metal walls in any section, and offers reconstructions and 3D models. The study used the rotation equipment designed at CNA, allowing the precise rotation of large and heavy objects in front of the various irradiation systems available at the center: X-ray tubes with W and Mo anodes, a ^{60}Co irradiator, and the HISPANOS neutron source. The new scintillation camera (Ofelia) was also used, allowing easy exchange of the scintillating material, making it suitable for all types of radiographs, including conventional X-rays and more advanced ones using gamma or neutron beams.

Finally, an automated scanning system has been designed and built for radiographing large-format paintings. By assembling radiographs obtained with the aforementioned scintillation camera, the system creates a mosaic image of large artworks. The system can be used not only for obtaining radiographs but also, by attaching an IR camera, for obtaining infrared reflectography (IRR) images to study possible underlying drawings and regrets. Additionally, an MA-XRF system can be attached, allowing the generation of false-color maps of the multi-elemental composition offered by X-ray fluorescence technique to determine the painter's pigment palette, as well as the combinations that produce different shades in the artwork.

3.2. Centro para ensayos de Irradiación/Irradiation Testing Facility

El área de Irradiación del CNA se encarga de coordinar toda la investigación relacionada con los ensayos de fiabilidad en dispositivos y materiales susceptibles de ser utilizados en ambientes críticos de radiación, como es el entorno espacial o los experimentos de física nuclear de altas energías. Así como la irradiación de materiales que conlleve una modificación para aplicaciones específicas en agricultura o medicina. Tres de los laboratorios del CNA han sido mejorados por nuestro grupo para realizar diferentes ensayos de irradiación, habitualmente con usuarios de empresas privadas y grupos

de investigación. Este tipo de ensayos ya sea en modo estático o dinámico, se realizan en RadLab empleando fotones gamma y en los laboratorios de los aceleradores de partículas Tándem 3MV y Ciclotrón; siendo las líneas de trabajo habitual con partículas la línea de irradiación e implantación y la de haz externo del Ciclotrón.

Asegurar la robustez frente a la radiación mediante pruebas aceleradas es uno de los ensayos más relevantes para calificar una amplia gama de dispositivos y materiales en entornos aeroespaciales y otros entornos hostiles. En estas pruebas o ensayos, un dispositivo recibe, en poco tiempo, una exposición a la radiación equivalente a la que podría recibir en funcionamiento normal en el entorno espacial durante su tiempo de vida útil. La fiabilidad de un dispositivo puede ser estudiada, entre otros, en base al impacto eventual de una partícula ionizante (Single Event Effects, SEE; Displacement Damage Dose, DDD) o en función de una determinada dosis de radiación acumulada (Total Ionization Dose, TID). En estos años se ha visto crecer el uso de tecnologías comerciales (COTS) como alternativa a los dispositivos reforzados contra la radiación, para satélites de bajo costo o para partes menos críticas de una misión. Extender el uso de estos dispositivos en el espacio es deseable desde hace años, pero sigue limitado por la necesidad de asegurar su eficacia bajo radiación. Esta necesidad conlleva un importante incremento en la demanda de ensayos de irradiación y en la búsqueda de nuevas metodologías de aseguramiento de la robustez.

En estos años, el CNA se ha ido consolidando como centro de ensayos de irradiación, donde además pueden combinarse radiación con fotones gamma, con partículas e incluir distintos ambientes térmicos. La Unidad de Irradiación ha continuado con su labor científico-técnica en el irradiador gamma, e implementando algunas de las líneas de trabajo de los aceleradores, para el estudio de producción de fallos en tecnologías altamente integrada además del daño en materiales. La Unidad de Irradiación ha contribuido a la oferta de servicios del CNA como ICTS, tanto con trabajos de empresas privadas como de instituciones públicas. Ha habido una creciente progresión de solicitudes de uso, pasando de una docena en 2021 a 27 solicitudes en 2023. Desde mediados de 2021, en representación de la Universidad de Sevilla, nuestro grupo es punto de contacto para el programa de “Transnational Access”, incluido dentro del proyecto RADNEXT (European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 101008126). Proyecto liderado por el CERN y donde participan 31 instituciones, siendo la Universidad de Sevilla uno de los socios beneficiarios. Entre marzo de 2020 y septiembre de 2021, la Unidad de irradiación junto a la empresa Alter Technology, llevó a cabo un fructífero proyecto (PRECEDER) enfocado en la predicción del comportamiento de los dispositivos sometidos a radiación. Los productos, desarrollados en el marco de PRECEDER se han incorporado tanto a la rutina del CNA como de la propia empresa privada, siendo un ejemplo más de la transferencia tecnológica público-privada que existe entre ambos grupos. En el marco de esta colaboración, se ha comenzado a trabajar en una nueva iniciativa con la que se digitalizarán los procesos de dos de los laboratorios del CNA, comenzando por el RadLab. Esto facilitará aún más la conexión remota de los usuarios externos, tanto para el seguimiento como para la realización de campañas de ensayos. El trabajo se desarrollará en los próximos años, gracias a la financiación de un contrato de PTA (Personal Técnico de Apoyo a la I+D+I) por parte del Ministerio de Ciencia e Innovación.

El CNA ha ampliado su presencia en la comunidad internacional de radiación. Por un lado, desde julio de 2021, aparece de modo explícito dentro del acuerdo de colaboración entre CERN y Universidad de Sevilla. Por otro lado, desde septiembre de 2022, uno de los miembros de la Unidad forma parte del Steering Group de RADECS Association.

The irradiation area of the CNA coordinates all the research related to reliability testing on devices and materials that could be used in critical environments of radiation, such as the space environment or high energy Physics experiments. As well as the irradiation of materials that implies their internal modification for particular applications in agriculture and medicine. Three of the CNA laboratories have been improved by our group to carry out different irradiation tests, usually with users from

private companies and research groups. This type of test, in static and/or dynamic mode, is performed in RadLab using gamma photons and in the laboratories of Tandem and Cyclotron particle accelerators; using the irradiation and implantation line and the external beamline of the Cyclotron.

When the technology is used in Space, the materials resistance and the robustness of circuits against radiation must be ensured. The technique to check the devices behavior is the called irradiation accelerated test, where the operation conditions and the environment are reproduced, so that the circuit can receive in a short time a similar radiation than during their full lifetime. The reliability of a device under radiation can be studied, among others, based on the eventual impact of an ionizing particle (Single Event Effects, SEE; Displacement Damage Dose, DDD) or according to a given dose of radiation accumulated (Total Ionization Dose TID). In these years, the use of commercial technologies (COTS) has grown as an alternative to rad-hard devices, for low-cost satellites or for less critical parts of a mission. Extending the use of these devices in space has been desirable for years but remains limited by the need to ensure their effectiveness under radiation. This need entails a significant increase in the demand for irradiation tests and in the search for new robustness assurance methodologies.

During these years, the CNA has been consolidated as Irradiation testing facility, where it can be combined gamma photons, accelerated particles, and different temperatures. The Irradiation Unit has continued with its scientific-technical work in the gamma irradiator, and implementing some of the accelerators' lines of work, for the study of failure production in highly integrated technologies as well as damage to materials. The Irradiation Unit has contributed to the CNA's service offering as ICTS, both with work from private companies and public institutions. There has been a growing progression of requests for use, going from a dozen in 2021 to 26 requests in 2023. Since middle of 2021, on behalf of the University of Seville, our group is the contact point in the Transnational Access Program, included in the RADNEXT project (European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 101008126). This is a project, led by CERN and involving 31 institutions, where the Universidad de Sevilla is one of the beneficiary partners. In between March 2020 and September 2021, the Irradiation Unit together with the company Alter Technology, carried out a fruitful project (PRECEDER) focused on predicting the behavior of devices subjected to radiation. The products, developed within the framework of PRECEDER, have been incorporated into the routine of both the CNA and the private company itself, being another example of public-private technology transfer that exists between both groups. In the frame of this collaboration, a new work has been started. The procedures followed in two of the CNA laboratories will be digitalized, starting with the RadLab. This will further facilitate the remote connection of external users, both for monitoring and performing experimental campaigns. The work will be carried out in the next years, thanks to the financial support for a PTA contract (Technical Personnel Support for R&D&I) by the Ministry of Science and Innovation.

The CNA has extended its presence in the international community of Radiation. On the one hand, since July 2021, it appears explicitly within the collaboration agreement signed between the CERN and the Universidad de Sevilla. On the other hand, since September 2022, one of the members of the Irradiation Unit is part of the RADECS Association Steering Group.

PRECEDER – Predicción del comportamiento eléctrico de dispositivos electrónicos bajo radiación.

En 2020, la Unidad de Irradiación junto a Alter Technology, empezó a trabajar en un enfoque novedoso para evaluar el comportamiento de dispositivos electrónicos frente a la radiación a partir de resultados previos. Este análisis utiliza medidas de los mismos parámetros tomadas en dispositivos lo más similares posibles al objetivo. Incluyendo técnicas de aprendizaje automático en la metodología, estos datos se normalizan para eliminar la variabilidad natural existente entre las piezas y se ajustan

a un modelo de regresión, usado posteriormente en las predicciones. Por ello, la primera fase implicó la creación de una base de datos parametrizada, que ya ha sido implementada en forma de aplicación interactiva dentro de la plataforma Virtual LabTM de la empresa Alter Technology. Ésta contiene la información estructurada de los dispositivos testeados, así como los valores de los parámetros y las condiciones de medidas eléctricas y de radiación. Estos datos se han recopilado de informes de Alter Technology, de las bases de datos de la NASA, la ESA y fabricantes de componentes y publicaciones en congresos. Actualmente, cuenta con más de 4000 registros digitalizados.

Los primeros trabajos se hicieron en el marco del Proyecto Ecosistema Innovador con Inteligencia Artificial para Andalucía 2025, liderado por el Campus de Excelencia Internacional Andalucía TECH, financiado por la Unión Europea. Sin embargo, el Grupo de trabajo ha continuado en esta línea, dado el interés suscitado en la comunidad de radiación y agencias espaciales (NASA y ESA). Evitar la necesidad de testear todos y cada uno de los componentes para asegurar la robustez frente a radiación, supondría por ejemplo una importante disminución de costes y tiempo a invertir por agentes del New Space. La continuación del proyecto se ha llevado a cabo con la colaboración de investigadores de la UNED (Universidad Nacional de Educación a Distancia). Y se ha contado además con la contribución del grupo R2E del CERN y el Grupo de Radiación de ESA – ESTEC para algunos de los trabajos realizados. Actualmente estamos inmersos en la obtención de un nuevo compendio sobre los efectos de la radiación en optoacopladores, que complementa al ya publicado por la NASA en el año 2000. La participación de la ESA, diseñadores de sistemas y fabricantes de semiconductores garantiza que las nuevas tecnologías seleccionadas para esta recopilación sean provechosas para la comunidad actual. Los fabricantes han facilitado los dispositivos y se están ensayando dentro del marco del proyecto RADNEXT (<https://radnext.web.cern.ch>). Hasta el momento, se han publicado algunos de los resultados en revistas científicas y se han presentado más de una decena de contribuciones a congresos internacionales.

Las herramientas desarrolladas por el proyecto PRECEDER no solo se utilizan en investigación básica, sino que se han integrado en el flujo de trabajo de Alter Technology. Sus predicciones están presentes en los ensayos de irradiación que se realizan en el RadLab para ofrecer estimaciones del comportamiento esperado de los componentes (Figura 4.X). Cabe destacar que el proyecto ha recibido dos premios de innovación en eventos organizados por el grupo TÜV Nord en 2022 y 2023.

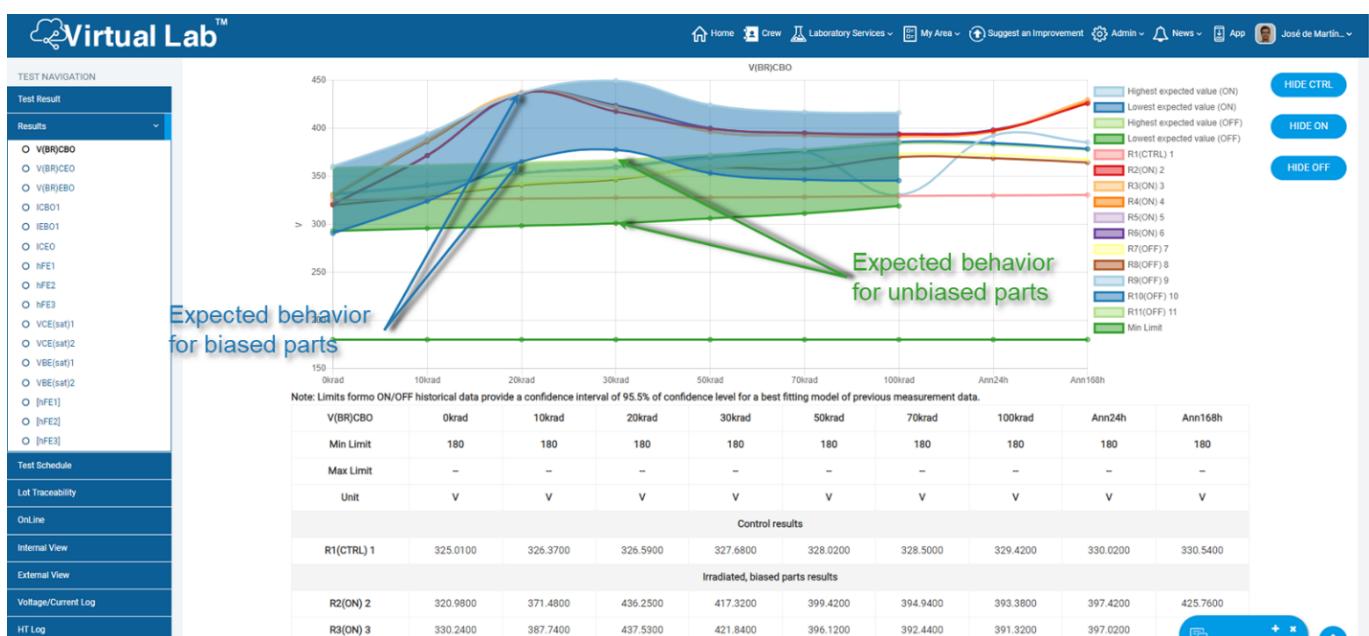


Figura 3.8: Ejemplo de uso de PRECEDER incluido en Virtual LabTM / Example of using PRECEDER included in Virtual LabTM

PRECEDER - Prediction of the electrical behavior of electronic devices under radiation.

In 2020, the Irradiation Unit together with Alter Technology, began working on a novel approach to evaluate the behavior of electronic devices against radiation based on previous results. This analysis uses measurements of the same parameters taken on devices as similar as possible to the target. By including machine learning techniques in the methodology, these data are normalized to remove the natural variability between parts and fitted to a regression model, which is then used to make predictions. Therefore, the first phase involved the creation of a parameterized database, which has already been implemented in the form of an interactive application within the Virtual LabTM platform of the company Alter Technology. This contains the structured information of the tested devices, as well as the parameter values and conditions of electrical and radiation measurements. This data was compiled from Alter Technology reports, NASA, ESA and component manufacturer databases, and conference publications. It currently contains more than 4,000 digitized records.

The first works were carried out within the framework of the Innovative Ecosystem Project with Artificial Intelligence for Andalusia 2025, led by the Andalusia TECH Campus of International Excellence, financed by the European Union. However, the Working Group has continued along this line, given the interest aroused in the radiation community and space agencies (NASA and ESA). Avoiding the need to test all the components to ensure robustness against radiation, would mean, for example, a significant reduction in costs and time to be invested by New Space agents. The continuation of the project has been carried out with the collaboration of researchers from UNED (National University of Distance Education). The R2E group of CERN and the Radiation Group of ESA – ESTEC have also contributed in some works carried out. We are currently immersed in obtaining a new compendium on the effects of radiation on optocouplers, which complements the one already published by NASA in 2000. The participation of ESA, system designers and semiconductor manufacturers ensures that the new technologies selected for this compilation are beneficial to today's community. The devices have been provided by manufacturers and are being tested within the framework of the RADNEXT project (<https://radnext.web.cern.ch>). To date, some of the results have been published in scientific journals and more than a dozen contributions have been presented at international conferences.

The tools developed by the PRECEDER project are not only used in basic research but have been integrated into the Alter Technology workflow. Their predictions are present in the irradiation tests carried out in the RadLab to offer estimates of the expected behavior of the components. It should be noted that the project has received two innovation awards at events organized by the TÜV Nord group in 2022 and 2023.

Ensayos de radiación gamma en dispositivos electrónicos y sensores

En estos años, en el laboratorio de radiación gamma (RadLab) se han realizado campañas de radiación TID de muy diversa naturaleza y aplicación. Se han llevado a cabo ensayos en modo estático en materiales y dispositivos. Muchos de los ensayos siguen la metodología de caracterizar el comportamiento de los dispositivos cada determinado paso de radiación con una dosis o fluencia acumulada. Sin embargo, en otros estudios los dispositivos sometidos a radiación están en funcionamiento durante el ensayo, y en muchos casos su comportamiento es monitorizado “on line”. Como es habitual, en nuestro laboratorio existe la posibilidad de simultanear varios tipos de ensayos, a diferentes tasas de dosis y/o temperaturas.

En el marco del proyecto PRECEDER se han llevado a cabo diferentes campañas de TID. En

una primera fase de validación de la metodología del propio proyecto se caracterizaron transistores bipolares NPN, ampliamente utilizados en el sector Espacio, en concreto el part type 2N2222 de Semicoa Semiconductor. Se ha continuado con el estudio de la eficiencia de los modelos, ampliando la aplicación a parámetros medidos en un amplificador operacional bipolar, como es el OP77FJZ. En este caso, el estudio de TID se completó con ensayos de protones a alta energía en las instalaciones de la UCL, en Bélgica. Gracias a la colaboración con el CERN, se comenzó el estudio de diferentes dispositivos comparando datos de ambas bases de datos (CERN y PRECEDER) y realizando campañas de ensayos TID y DD, permitiendo evaluar los modelos desarrollados hasta el momento en diferentes tipos de familias de dispositivo electrónicos. Cabe destacar la comparación y predicción del comportamiento de optoacopladores (HCPL-060-500E y HCNR-200-300E) utilizando datos de campañas de radiación anteriores llevadas a cabo en el CERN y evaluación de las predicciones de forma empírica con nuevos resultados en RadLab, así como con protones de alta energía. Este trabajo supuso el punto de partida para la aplicación de la metodología no sólo a ensayos de TID sino de DD, así como para comenzar con el ambicioso propósito del compendio de optocopladores.

A parte del uso rutinario que hace Alter Technology, bajo el correspondiente convenio con nuestro Centro, en el laboratorio RadLab, es habitual colaborar con el Departamento de Optoelectrónica y Nuevas Tecnologías de la propia empresa. En este período se han llevado a cabo ensayos de TID dentro del marco del proyecto DIGISOLAR subvencionado por fondos de resiliencia de la Unión Europea. El objetivo principal del proyecto consistirá por tanto en desarrollar un prototipo funcional de sensor solar digital, investigando para ello una novedosa técnica de lectura de datos asíncrona con una arquitectura de sensor basada en eventos. En la primera campaña de ensayos se valida la sensibilidad de sensores asíncronos diseñados por el IMSE (Instituto de Microelectrónica de Sevilla – CSIC) para aplicaciones espaciales.

Arquimea Aerospace, Defence & Security S.L.U. continúa realizando ensayos TID para calificación de la familia de dispositivos TMTC y LVDS desarrollados por la empresa. Enfocada en el uso espacial, está especializada en transceptores y convertidores adecuados para habilitar las comunicaciones SpaceWire y SpaceFibre; así como el diseño de ASICs y FPGAs para misiones espaciales. Se han realizado campañas también junto a su socio en el proyecto SPAD, IHP - Leibniz-Institut for High Performance Microelectronics. En concreto se han realizado ensayos sobre convertidores analógico digital desarrollados con objeto de ser cualificados para espacio, como el Proto ADC (IHP SG13S technology).

Se continúa trabajando con el INFN (Istituto Nazionale di Física Nucleare) y Universidad de Nápoles. En este período se han llevado a cabo ensayos de TID para la caracterización de un dispositivo VCO (Voltage Controller Oscillator) de operación en banda X (10.00GHz). Éste ha sido desarrollado en el marco del contrato ESA No. 4000110791/14/NL/PA, proyecto financiado por la ASI (Agenzia Spaziale Italiana).

Investigadores de la Universidad de Granada – Dpto. de Electrónica y Tecnología de Computadores siguen colaborando con la Unidad de Irradiación del CNA, llevando a cabo ensayos con radiación gamma y protones. Recientemente, en RadLab, se ha realizado la caracterización y comparativa de la dependencia angular en sensores construidos con fotodiodos BPW34S. En el marco del proyecto ELICSIR, se está llevando a cabo la caracterización del nuevo dosímetro portátil NFC (DosiTag), dosímetro de radiación portátil con MOSFETs CD4007 apilados. Por otro lado, se han realizado las medidas preliminares para determinar la respuesta de una cámara de ionización, diseñada para su uso en IFMIF-Dones, así como el montaje experimental asociado.

Miembros de Tecnun, la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Navarra, junto a investigadores del Dpto. de Ingeniería Electrónica de la ETSI de la Universidad de Sevilla, han realizado experimentos de TID en amplificadores milimétricos de tecnología BiCMOS SiGe. Estos ensayos se

engloban en el proyecto “miliRAD: Radiómetros avanzados en rango milimétrico para instrumentos de observación terrestre de nueva generación para predicción meteorológica y evaluación de cambio climático”. El objetivo de este experimento es extender, a muy alta frecuencia (banda G, entorno a 190GHz), los estudios de radiación en amplificadores de esta tecnología, hacer un estudio de su robustez y las técnicas de recuperación de funcionalidad en caso necesario. Actualmente se están analizando los resultados.

El IMB - Instituto de Microelectrónica de Barcelona ha realizado varias campañas de radiación gamma en capacidades MOS con diferentes dieléctricos. El trabajo se enmarca en un proyecto de investigación (NEST) para seguridad civil frente a incidentes RN. Dentro del proyecto se propone la fabricación de detectores de radiación basados en transistores de efecto campo (RADFET) para la monitorización del nivel de radiación. Como primer paso para esta fabricación se plantea el estudio del efecto de la radiación en diferentes dieléctricos (por espesor y composición) que serán el material sensible del RADFET.

Gamma irradiation testing on electronic devices and sensors.

During these years, different TID irradiation test campaigns were performed in the gamma radiation laboratory (RadLab) for a wide range of applications. Static mode testing on materials and devices has been carried out. However, the most usual it is to work with the device under test (DUT) running during the irradiation, also monitoring their behavior “on line”. Moreover, in the laboratory there is the possibility to work with remote control by the external user. As usual, in our laboratory there is the possibility of simultaneous several types of tests, at different dose rates and / or temperatures.

Within the framework of the PRECEDER project, different TID campaigns have been carried out. In a first phase of validation of the project's methodology, NPN bipolar transistors, widely used in the Space sector, were characterized, specifically the part type 2N2222 from Semicoa Semiconductor. The study of the efficiency of the models has continued, expanding the application to parameters measured in a bipolar operational amplifier, such as the OP77FJZ. In this case, the TID study was completed with high-energy proton assays at the UCL facilities in Belgium. Thanks to the collaboration with CERN, the study of different devices began by comparing data from both databases (CERN and PRECEDER) and carrying out TID and DD test campaigns, allowing the models developed to date to be evaluated in different types of families of devices. electronic device. It is worth highlighting the comparison and prediction of the behavior of optocouplers (HCPL-060-500E and HCNR-200-300E) using data from previous radiation campaigns carried out at CERN and evaluating the predictions empirically with new results in RadLab, as well as with high-energy protons. This work was the starting point for the application of the methodology not only to TID but also to DD tests, as well as to begin the ambitious purpose of the compendium of optocouplers.

Apart from the routine use that Alter Technology makes, under the corresponding agreement with our Center, in the RadLab laboratory, it is common to collaborate with the Optoelectronics and New Technologies Department of the company itself. In this period, TID tests have been carried out within the framework of the DIGISOLAR project subsidized by resilience funds from the European Union. The main objective of the project will therefore be to develop a functional prototype of a digital solar sensor, investigating a novel asynchronous data reading technique with an event-based sensor architecture. In the first test campaign, the sensitivity of asynchronous sensors designed by the IMSE (Institute of Microelectronics of Seville – CSIC) for space applications is validated.

Arquimea Aerospace, Defense & Security S.L.U. continues to carry out TID tests for qualification of the family of TMTC and LVDS devices developed by the company. Focused on space use, it is specialized in transceivers and converters suitable to enable SpaceWire and SpaceFibre com-

munications; as well as the design of ASICs and FPGAs for space missions. Campaigns have also been carried out together with its partner in the SPAD project, IHP - Leibniz-Institut for High Performance Microelectronics. Specifically, tests have been carried out on analog-digital converters developed with the aim of being qualified for space, such as the Proto ADC (IHP SG13S technology).

Work continues with the INFN (Istituto Nazionale di Physics Nucleare) and University of Naples. In this period, TID tests have been carried out for the characterization of a VCO (Voltage Controller Oscillator) device operating in band X (10.00GHz). This has been developed within the framework of contract ESA No. 4000110791/14/NL/PA, a project financed by the ASI (Agenzia Spaziale Italiana).

Researchers from the University of Granada – Department of Electronics and Computer Technology continue to collaborate with the CNA Irradiation Unit, carrying out tests with gamma radiation and protons. Recently, at RadLab, the characterization and comparison of the angular dependence in sensors built with BPW34S photodiodes has been carried out. Within the framework of the ELIC-SIR project, the characterization of the new NFC portable dosimeter (DosiTag), a portable radiation dosimeter with stacked CD4007 MOSFETs, is being carried out. On the other hand, preliminary measurements have been carried out to determine the response of an ionization chamber, designed for use in IFMIF-Dones, as well as the associated experimental setup.

Members of Tecnun, the School of Engineering of the University of Navarra, together with researchers from the Department of Electronic Engineering of the ETSI of the University of Seville, have carried out TID experiments in millimeter BiCMOS SiGe technology amplifiers. These tests are included in the project “miliRAD: Advanced millimeter-range radiometers for new generation Earth observation instruments for weather prediction and climate change assessment.” The objective of this experiment is to extend, at very high frequency (G band, around 190GHz), the radiation studies in amplifiers of this technology, to study its robustness and the techniques for recovering functionality if necessary. The results are currently being analyzed.

The IMB - Institute of Microelectronics of Barcelona has carried out several gamma radiation campaigns in MOS capacities with different dielectrics. The work is part of a research project (NEST) for civil security against RN incidents. The project proposes the manufacture of radiation detectors based on field effect transistors (RADFET) for monitoring the radiation level. As a first step for this manufacturing, the study of the effect of radiation on different dielectrics (by thickness and composition) is proposed, which will be the sensitive material of the RADFET.



Figura 3.9: Ensayos de irradiación de muestras orgánicas en RadLab / Irradiation testing of organic samples in RadLab

Otras aplicaciones en laboratorio con radiación gamma.

Como muestra de la creciente versatilidad, podemos destacar el uso de nuestro laboratorio para la realización de experimentos de gammagrafía y tomografía computerizada (GAMMA TC). Investigadores del CNA han llevado a cabo por primera vez esta técnica de imagen para complementar sus estudios realizados con otras fuentes de radiación, como rayos X y neutrones. Cabe destacar el estudio realizado sobre dos efebos romanos, del yacimiento de Pedro Abad, en colaboración con el IAPH (Instituto andaluz de Patrimonio Histórico).

Se ha trabajado en colaboración con investigadores de la Estación Biológica de Doñana para el estudio de anfibios expuestos a radiación ionizante. Existen estudios que han demostrado alteraciones en la genética y la fisiología de los organismos. Por otro lado, se ha sugerido un potencial papel protector de la pigmentación (melanina) frente a las radiaciones ionizantes. Este grupo ha encontrado que las ranas son más oscuras en la Zona de Exclusión de Chernobyl que en lugares exteriores. Esto le ha llevado a plantear un estudio empírico en el que se induce un cambio en la pigmentación en hermanos de una especie de sapo para investigar si la melanina protege contra la radiación y los posibles efectos de transferencia durante el período larval hasta y después de la metamorfosis. Realizadas las primeras campañas, actualmente se están analizando los datos.

La empresa ANECOOP S.COOP. continúa trabajando en programas para inducir variabilidad genética en material vegetal. Más específicamente en variedades frutales, empleando como agente mutágeno físico la radiación gamma de Co-60. Hasta el momento, se han realizado sesiones de irradiación con el objetivo de establecer la dosis que genera un DL50 en la variedad de frutal *Diospyros kaki*; así como en cítricos mandarino y naranjo. En la misma línea de trabajo, más recientemente, la empresa BIOGOLD EM ha iniciado también campañas de irradiación sobre varetas de cítricos.

Por otro lado, se ha trabajado con investigadores del Centro de Transfusiones, Tejidos y Células (CTTC) de Sevilla en la irradiación de parches de fibrina. Estas campañas se engloban en el marco de desarrollo de un nuevo parche hemostático y su implementación en la rutina hospitalaria. El objetivo era conocer la posibilidad de utilizar la irradiación con fotones gamma como método de esterilización de un polímero natural como es la fibrina. Se está haciendo un estudio sobre este material, que serviría como soporte en un parche hemostático de uso tópico para cirugía hepática. En la primera campaña, se realizó una prueba de concepto de muestras de fibrina para estudiar la viabilidad del método sobre ratones y establecer la dosis óptima. Observados muy buenos resultados, se realizó posteriormente una satisfactoria segunda fase de estudio sobre conejos. Los resultados serán publicados en una revista especializada. En la misma línea, se ha colaborado en el estudio de esterilización de colágeno funcionalizado por parte de un grupo de la facultad de medicina de la Universidad de Granada. Otras técnicas de esterilización como autoclave, exposición a luz ultravioleta o etanol, no han resultado viables para este tipo de material. Este trabajo forma parte de una tesis doctoral en curso.

Por último, se ha comenzado a colaborar con un grupo de la facultad de Ciencias, también de Granada. En el marco de una tesis doctoral, se está llevando a cabo la caracterización de muestras de franela de algodón con PCDA inmovilizado. A modo de telas radiocrómicas, se obtienen las curvas de respuesta en el cambio de color con objeto de usarlas como dosímetros.

Other laboratory applications with gamma radiation.

As an example of the growing versatility, we can highlight the use of our laboratory to carry out gammagraphy and computed tomography (GAMMA CT) experiments. CNA researchers have carried out this imaging technique for the first time to complement their studies carried out with other radiation sources, such as X-rays and neutrons. It is worth highlighting the study carried out on two Roman ephebes, from the Pedro Abad site, in collaboration with the IAPH (Andalusian Institute of

Historical Heritage).

We have worked in collaboration with researchers from the Doñana Biological Station to study amphibians exposed to ionizing radiation. There are studies that have shown alterations in the genetics and physiology of organisms. On the other hand, a potential protective role of pigmentation (melanin) against ionizing radiation has been suggested. This group has found that frogs are darker in the Chernobyl Exclusion Zone than outside. This observation has led to propose an empirical study in which a change in pigmentation is induced in siblings of a species of toad to investigate whether melanin protects against radiation and possible transfer effects during the larval period until and after death. metamorphosis. Once the first campaigns have been carried out, the data is currently being analyzed.

The company ANECOOP S.COOP. continues working on programs to induce genetic variability in plant material. More specifically in fruit varieties, using Co-60 gamma radiation as a physical mutagen agent. To date, irradiation sessions have been carried out with the objective of establishing the dose that generates an LD₅₀ in the *Diospyros kaki* fruit variety, as well as in mandarin and orange citrus fruits. In the same line of work, more recently, the company BIOGOLD EM has also started irradiation campaigns on citrus stems.

On the other hand, we have worked with researchers from the Center for Transfusions, Tissues and Cells (CTTC) of Seville on the irradiation of fibrin patches. These campaigns are included in the framework of the development of a new hemostatic patch and its implementation in hospital routine. The objective was to know the possibility of using gamma photon irradiation as a sterilization method for a natural polymer such as fibrin. The study is being carried out on this material, which would serve as a support in a hemostatic patch on topical use for liver surgery. In the first campaign, a proof of concept of fibrin samples was carried out to study the viability of the method on mice and establish the optimal dose. Very good results were observed, a satisfactory second phase of the study on rabbits was subsequently carried out. The results will be published in a specialized journal. Along the same line, a group from the Faculty of Medicine of the University of Granada has collaborated in the study of sterilization of functionalized collagen. Other sterilization techniques such as autoclaving, exposure to ultraviolet light or ethanol have not been viable for this type of material. This work is part of an ongoing doctoral thesis.

Finally, we have begun to collaborate with a group from the Faculty of Sciences, also from Granada. Within the framework of a doctoral thesis, the characterization of cotton flannel samples with immobilized PCDA is being carried out. As radiochromic fabrics, response curves in color change are obtained in order to use them as dosimeters.

Ejercicios de intercomparación dosimétrica con otros laboratorios de irradiación gamma.

El último ejercicio de intercomparación del laboratorio RadLab (ATN-CNA) con otros laboratorios internacionales, se ha realizado junto al laboratorio ESTEC de la ESA (Holanda), el laboratorio de Cobalto-60 de TRAD (Francia) y el de Seibersdorf (Austria). En esta ocasión, el estudio dosimétrico para ensayos TID se ha centrado en la confidencialidad de resultados basados en el uso de dosímetros de Alanina certificados de NPL (National Physical Laboratory) y AERIAL - CRT. Un conjunto representativo de dosímetros ha sido expuesto a radiación gamma en las cuatro diferentes instalaciones de cobalto-60. Dos niveles de dosis (60 y 600 Gy) han sido alcanzados con tres tasas de dosis (0.36, 3.6 y 36 Gy/h), usando diferentes configuraciones y factores de conversión de kerma en aire y dosis en agua. La intercomparación ha validado las buenas prácticas seguidas por los laboratorios involucrados en lo referente a dosimetría. Aunque existen diferencias en los valores absolutos obtenidos en los diferentes rangos de dosis estudiados, los valores obtenidos para el 5 % Z-Score se

mantienen siempre dentro del margen apropiado [-1, 1]. En conclusión, el estudio ha demostrado en gran medida una coherencia adecuada de los métodos de dosimetría para irradiación con fotones gamma al nivel requerido por los métodos de ensayos ESCC 22900 y MIL.

Dosimetry intercomparison exercises with other gamma irradiation laboratories.

The last RadLab (ATN-CNA) intercomparison exercise with other international laboratories have been performed with the ESTEC laboratory of ESA (Holland), the Cobalt-60 laboratory of TRAD (France) and that of Seibersdorf (Austria). On this occasion, the dosimetry study for TID assays has focused on the confidentiality of results based on the use of certified Alanine dosimeters from NPL (National Physical Laboratory) and AERIAL - CRT. The dosimeters were exposed to Co-60 irradiation fields in the four different irradiation laboratories. A representative set of dose levels and dose rates was used for the exposures. The participants have used different configurations and conversion factors between air kerma Ka and the dose to water DW have been applied. This inter-laboratory comparison has validated the dosimetry good practices of the four irradiation facilities involved. The obtained data have shown some differences in dosimetry among the laboratories of a few percentage points, but all the 5 % Z-Score values are within the appropriate range [-1, 1]. In conclusion, the study has largely demonstrated adequate consistency of gamma photon radiation dosimetry methods at the level required by ESCC 22900 and MIL test methods.

Ensayos de irradiación con protones de baja energía para uso espacial y otros entornos.

En estos años, se ha consolidado la relación con el grupo R2E (Radiation to Electronics Project) del CERN, el cual se encarga de evaluar el riesgo de fallos por radiación en los equipos de control, protección, monitorización y encendido de sus instalaciones, así como de proponer acciones de mitigación. Una de las actividades es el desarrollo de instrumentación capaz de cuantificar y caracterizar la radiación. Uno de los sistemas de detección que se están desarrollando está basado en el Timepix3, con el fin de utilizarlo en un ambiente de radiación mixta, compuesto por muchos tipos de partículas con un amplio rango energético. Los haces de iones quasi monoenergéticos obtenidos en las instalaciones del CNA ofrecen la posibilidad de emplearlos para su calibración. En el marco de esta colaboración, destacaremos las campañas realizadas con protones de baja energía hasta 4.5 MeV y partículas alfas hasta 8.5 MeV, con diferentes ángulos de incidencia, en el acelerador tandem de 3MV. En el mismo sentido, se han testeado otros sistemas de detección que se están proponiendo, dentro del marco de los proyectos CHIMERA y HEART, para realizar dosimetría en ensayos de iones pesados de muy alta energía en la instalación CHARM del CERN. Para el estudio de estos detectores se han empleado diferentes iones como alfas, carbono, silicio, níquel y oxígeno con varias energías cada uno, cubriendo un amplio rango de valores de LET.

En este periodo se ha iniciado una estrecha colaboración con el Dpto. de Electrónica y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada. El objetivo global es el estudio de viabilidad de uso de sensores de estado sólido comerciales como sensores dosimétricos con haces de protones para diversas aplicaciones. Se han llevado a cabo campañas de ensayos para determinar la sensibilidad de varios dispositivos MOSFET y Fotodiodos comerciales de distintos fabricantes. Hasta el momento se han llevado a cabo irradiaciones con protones de energías hasta 5.6 MeV, empleando el sistema de adquisición desarrollado por el propio grupo. La caracterización completa en función de diferentes parámetros continúa en curso. Los resultados complementan los obtenido en estudios con radiación gamma y resultados previos empleando radiación X y aceleradores de electrones. En la misma línea de trabajo, se está abordando el estudio de viabilidad de dispositivos RADFET de la empresa Varadis (spinout del Tyndall National Institute, en Irlanda). Los primeros ensayos con protones de baja energía se han llevado a cabo dentro de una propuesta financiada por el programa de Transnational Access del proyecto RADNEXT (European Union's Horizon 2020 research and innovation program

under grant agreement No 101008126), en el que además el CNA es socio beneficiario. Además, en el marco de este proyecto, se han llevado a cabo campañas de ensayos de SEE (Single Event Effects) en diferentes generaciones de memorias SRAM para uso espacial. En concreto, el estudio de fiabilidad llevado a cabo por el Surrey Space Centre – Faculty of Engineering and Physical Sciences, se enfoca en la observación de efectos de Single Event Upset (SEU) y Single Event Latch-up (SEL) con protones hasta 14 MeV.

Dentro del marco del proyecto RENASER3 y su continuidad RENASER4, se trabaja desde hace años con un grupo del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid y el Dpto. de Tecnología Informática y Computación de la Universidad de Alicante. Fundamentalmente se estudia la efectividad de diferentes técnicas de robustecimiento desarrolladas para sistemas electrónicos comerciales sometidos a entornos hostiles de radiación. Uno de los objetivos es validar las técnicas de tolerancia a fallos en sistemas distribuidos, mediante endurecimiento colaborativo. Por otro lado, establecer estrategias de mitigación de fallos mediante evaluación temprana de efectos de radiación en microprocesadores avanzados. En los últimos trabajos se está analizando la robustez de diversos programas que se ejecutan en varios dispositivos Multi-Processor System-on-Chip (MPSoCs). Las campañas suelen realizarse en la línea externa del ciclotrón, ya que las tarjetas, FPGAs y Microprocesadores donde se implementan los distintos modelos, tienen tecnología suficientemente sensible a protones de 15 MeV sin necesidad de realizar desencapsulado del dispositivo. Se trata de analizar distintas técnicas de endurecimiento de circuitos y técnicas de diagnósticos de errores producidos por SEEs. Se proponen distintas técnicas de endurecimiento basadas en la ejecución conjunta de tareas en los núcleos ARM y en las FPGAs, ambos integrados en los dispositivos.

La colaboración a lo largo de varios años con uno de los grupos de la facultad de informática de la Universidad Complutense de Madrid ha contribuido al trabajo de dos tesis doctorales defendidas en este último año. Este grupo se dedica al desarrollo de técnicas hardware y software para el análisis, detección y recuperación de errores inducidos por radiación. Enfocados fundamentalmente en la caracterización de dispositivos comerciales (COTS - Commercial-Off-The-Shelf) para posible uso espacial. Se han realizado campañas para estudiar la variación de la sensibilidad de SEE en función de diferentes parámetros, sobre memorias SRAM, MRAM, ReRAM y FPGAs con diferentes tecnologías. En el CNA se han realizado ensayos con protones desde 1 a 15 MeV, complementando así los estudios realizados con más altas energías y neutrones en otras instalaciones.

En la Figura puede verse el montaje diferentes experimentos para llevar a cabo este tipo de ensayos dinámicos, incluyendo el seguimiento en control remoto.

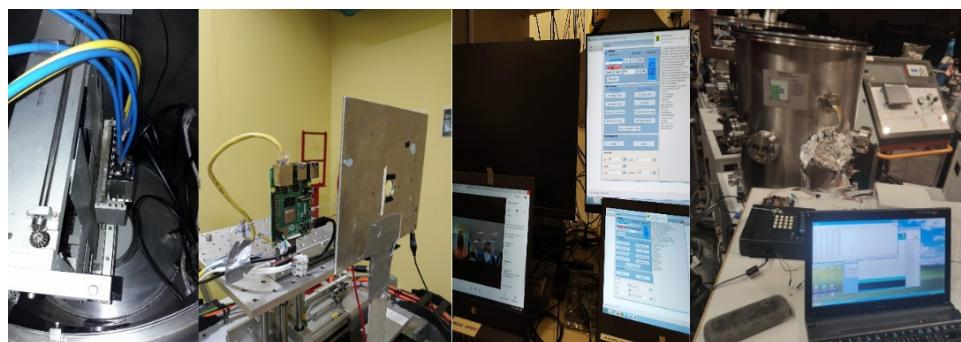


Figura 3.10: Montajes experimentales para ensayos dinámicos de irradiación en CNA. / Experimental setups for dynamic irradiation tests at CNA.

Las celdas solares, al igual que otros dispositivos semiconductores, se degradan eléctricamente cuando son expuestos a radiación con partículas. Los requerimientos para la cualificación de estos dispositivos quedan recogidos en la norma ISO 23038 – “Space systems – Space solar cells – electron

and proton irradiation test methods". En el siglo XXI la tecnología basada en Arseniuro de Galio ha permitido la fabricación de células solares multiunión para aplicaciones espaciales de alta eficiencia y gran resistencia al entorno espacial. Sin embargo, se continúan desarrollando nuevas generaciones con el fin de aumentar sus prestaciones para adaptarse a las nuevas misiones espaciales. En los ensayos para evaluar la sensibilidad de las celdas, ya sean al descubierto como emsambladas, o en las coberturas ópticas se utilizan haces de protones, habitualmente con energías entre 1 y 10 MeV. Por lo tanto, los de más baja energía se realizan en vacío en la línea de Irradiación e Implantación iónica instalada en el tandem de 3MV, y los de más alta energía en la línea de Haz Externo del Ciclotrón. En este campo, se ha continuado trabajando durante este periodo con la empresa española SPASOLAB-INTA y la italiana CESI SpA. En este periodo, Airbus Defence & Space GmbH, en su división Alemania, también ha sido usuario habitual de la Unidad de Irradiación para la investigación de nuevas tecnologías en celdas solares.

La empresa francesa TRAD (Test & Radiations), líder en el sector espacial, es usuario habitual para la realización ensayos con protones de baja energía. En este último período ha realizado estudios dirigidos a evaluar los riesgos de daño en cables y materiales poliméricos, de potencial uso en el entorno espacial. En el mismo sentido, Airbus Defence & Space GmbH, en su división Francia, ha realizado también ensayos sobre diferentes tipos de cables y lentes ópticas. Por motivos de confidencialidad, no se pueden aportar más datos procedentes de los análisis posteriores de las muestras realizados por las empresas.

Low energy proton irradiation testing for spacial applications and other environments.

In recent years, the relationship has been consolidated with the R2E group (Radiation to Electronics Project) at CERN, which is responsible for evaluating the risk of failure due to radiation in the control, protection, monitoring and powering equipment installed in its facilities, as well as proposing mitigation actions. One of the activities is the development of instrumentation capable of quantifying and characterizing radiation. One of the detection systems being developed is based on the Timepix3, with the aim of using it in a mixed radiation environment, composed of many types of particles with a wide energy range. The quasi-monoenergetic ion beams obtained at the CNA facilities offer the possibility of using them for calibration. Within the framework of this collaboration, we will highlight the campaigns carried out with low-energy protons up to 4.5 MeV and alpha particles up to 8.5 MeV, with different angles of incidence, in the 3MV tandem accelerator. In the same sense, other detection systems that are being proposed, within the framework of the CHIMERA and HEART projects, have been tested to perform dosimetry in very high energy heavy ion tests at the CERN CHARM facility. To study these detectors, different ions have been used such as alphas, carbon, silicon, nickel, and oxygen with various energies each, covering a wide range of LET values.

During this period, a close collaboration has begun with the Department of Electronics and Computer Technology of the University of Granada. The overall objective is the feasibility study of the use of commercial solid-state sensors as dosimetry sensors with proton beams for several applications. Test campaigns have been carried out to determine the sensitivity of various commercial MOSFET and Photodiode devices from different manufacturers. So far, irradiations with protons with energies up to 5.6 MeV have been carried out, using the acquisition system developed by the group itself. Complete characterization based on different parameters is ongoing. The results complement those obtained in studies with gamma radiation and previous results using X radiation and electron accelerators. In the same line of work, the feasibility study of RADFET devices from the company Varadis (spinout of the Tyndall National Institute, in Ireland) is being addressed. The first tests, with low-energy protons, have been carried out within a proposal financed by the Transnational Access program of the RADNEXT project (European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 101008126), in which the CNA is also a beneficiary partner.

Furthermore, within the framework of this project, SEE (Single Event Effects) test campaigns have been carried out on different generations of SRAM memories for space use. Specifically, the reliability study carried out by the Surrey Space Center – Faculty of Engineering and Physical Sciences, focuses on the observation of Single Event Upset (SEU) and Single Event Latch-up (SEL) effects with protons up to 14 MeV.

Within the framework of the RENASER3 project and the subsequent RENASER4, we are working for years with a group of the Department of Electronic Technology of the University Carlos III of Madrid and the Department of Information Technology and Computing of the University of Alicante. In general, it is studied the effectiveness of hardening techniques developed for commercial electronic systems to be used in hostile radiation environments. One of the objectives is to validate the fault tolerance techniques in distributed systems, through collaborative hardening. Moreover, to establish the fault mitigation strategies through the early evaluation of radiation effects in advanced microprocessors. In the latest works, the robustness of different softwares running on various Multi-Processor System-on-Chip (MPSoCs) devices is being analyzed. The campaigns are usually carried out on the external beam line of the cyclotron, since the boards, FPGAs and Microprocessors where the different models are implemented, have technology that is sufficiently sensitive to 15 MeV protons without the need to decapsulate the device. It involves analyzing different circuit hardening techniques and error diagnosis techniques produced by SEEs. Different hardening techniques are proposed based on the joint execution of tasks in ARM cores and FPGAs, both integrated into the devices.

The collaboration over several years with one of the groups of the computer science faculty of the Complutense University of Madrid has contributed to the work of two doctoral theses defended in the last year. This group is dedicated to the development of hardware and software techniques for the analysis, detection and recovery of radiation-induced errors. Mainly focused on the characterization of commercial devices (COTS - Commercial-Off-The-Shelf) for possible spatial use. Campaigns have been carried out to study the variation of SEE sensitivity depending on different parameters, on SRAM, MRAM, ReRAM and FPGA memories with different technologies. At the CNA, tests have been carried out with protons from 1 to 15 MeV, thus complementing the studies carried out with higher energies and neutrons in other facilities.

In Figure 3.10 you can see the setup of different experiments to carry out this type of dynamic tests, including remote control monitoring

Solar cells, as other semiconductor devices, are degraded electrically when exposed to particle radiation. The requirements for the qualification of these devices are included in the standard ISO 23038 - "Space systems - Space solar cells - electron and proton irradiation test methods". In the 21st century, the technology based on Gallium Arsenide has allowed the manufacture of multi-junction solar cells for space applications of high efficiency and great resistance to the space environment. However, new generations are under development in order to increase their performance for new space missions' adaptation. Proton beams, with energies between 1 and 10 MeV, are used in the tests to evaluate the sensitivity of the cells, whether bared or assembled, as well as the optical coverages. Therefore, the lowest energy is performed in vacuum in the Irradiation and Ion Implantation line installed in the 3MV tandem, and the highest energy in the External Beam Line of the Cyclotron. In this field, we have worked during this period with the Spanish company SPASOLAB-INTA and the Italian CESI SpA. In this period, Airbus Defense & Space GmbH, Germany division, has been also a regular user of the Irradiation Unit for research into new technologies in solar cells.

The French company TRAD (Test & Radiations), leader in the space sector, is a regular CNA user to perform low energy protons testing. In the last time, it has carried out studies in order to assess the risks of damage on cables and polymeric materials to be used in the space environment. In the same sense, Airbus Defence & Space GmbH, France division, has also carried out tests on dif-

ferent type of cables and optical lenses. For reasons of confidentiality, no more data can be provided from the subsequent analyzes of the samples made by the companies.

3.3. Unidad de Investigación en Física Nuclear Básica/ Basic Nuclear Physic Research Strand.

3.3.1. Estudio y caracterización de materiales.

Caracterización por técnicas IBA de láminas delgadas de VO_x y FeO_x

En el marco del proyecto “Recubrimientos termocrómicos inteligentes para la climatización eficiente y el control ambiental (TOLERANCE P18-RT-3480)”, entre cuyos objetivos se encuentra el desarrollo de materiales de alta porosidad que puedan ser utilizados como capas termocrómicas, se han desarrollado en el grupo Nanotechnology on Surfaces del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla láminas delgadas de VO_x y FeO_x sintetizadas por técnicas de deposición asistidas por plasma. Se ha estudiado la estequeometría de dichas láminas delgadas realizando medidas RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy) con partículas alfa y medidas de NRA (Nuclear Reaction Analysis) $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p})^{13}\text{C}$, $^{16}\text{O}(\text{d},\text{p})^{17}\text{O}$ y $^{14}\text{N}(\text{d},\alpha)^{12}\text{C}$ para obtener la concentración de C y N (posibles contaminantes en las capas).

Characterization of thin films of VO_x and FeO_x using IBA techniques

Within the framework of the project ”Smart thermochromic coatings for efficient air conditioning and environmental control (TOLERANCE P18-RT-3480)”, whose objectives include the development of high-porosity materials that can be used as thermochromic layers, in the Nanotechnology on Surfaces group of the Institute of Materials Science of Seville, thin films of VO_x and FeO_x have been developed and synthesized by plasma-assisted deposition techniques. The stoicheometry of these thin films has been studied by performing RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy) measurements with alpha particles and NRA (Nuclear Reaction Analysis) measurements $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p})^{13}\text{C}$, $^{16}\text{O}(\text{d},\text{p})^{17}\text{O}$ and $^{14}\text{N}(\text{d},\alpha)^{12}\text{C}$ to obtain the concentration of C and N (possible contaminants in the layers).

Análisis elemental en profundidad de capas finas con He crecidas por pulverización catódica

En el marco del proyecto de investigación “Desarrollo de catalizadores y soportes para procesos de almacenamiento químico de energía neutros en CO₂ basados en líquidos orgánicos portadores de hidrógeno (RTI2018-093871-B-I00)” del grupo de investigación Materiales Nanoestructurados y Microestructura (TEP217) del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, se ha analizado la estequeometría de capas delgadas de M:He (M≡ metal) para estudiar el efecto de la naturaleza del gas de proceso para el diseño a la carta de nanoestructuras con porosidad cerrada y/o abierta en distintos materiales. Para ello se ha realizado un análisis por p-EBS (proton Elastic Backscattering Spectroscopy). Este ha permitido determinar la cantidad de material de matriz, de gas de proceso incorporado (He), así como la distribución en profundidad y una estimación de contaminantes como C, O, N, Ar.

In-depth elemental analysis of thin layers with He grown by magnetrón sputtering

Within the framework of the research project ”Development of catalysts and supports for CO₂-neutral chemical energy storage processes based on hydrogen-carrying organic liquids (RTI2018-093871-B-I00).of the Nanostructured Materials and Microstructure research group (TEP217) of the

Institute of Materials Science of Seville, the stoichiometry of thin layers of M:He (M≡ metal) has been analyzed to study the effect of the nature of the process gas for the customized design of nanostructures with closed porosity and / or open in different materials. For this, an analysis by p-EBS (proton Elastic Backscattering Spectroscopy) has been carried out. This has made it possible to determine the amount of matrix material, incorporated process gas (He), as well as the depth distribution and an estimate of contaminants such as C, O, N, Ar.

Medida de blancos de ^{120}Sn depositados sobre Formvar para física nuclear básica

En el marco del proyecto “Rompiendo el 12C: una Sonda Hacia la Evolución de las Estrellas y el Origen de la Vida (PGC2018-096994-B-C21)” se han medido mediante la técnica de p-EBS diferentes blancos de ^{120}Sn depositados sobre Fomvar. La determinación del espesor y posibles contaminantes en la capa (C, O) se hace indispensable para la correcta interpretación de los resultados de las medidas de la reacción $^{10}\text{Be} + ^{120}\text{Sn}$ a energías alrededor de la barrera de Coulomb realizadas por investigadores del departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Sevilla en el laboratorio Laboratori Nazionale del Sud del instituto Nazional di Fisica Nucleare (LNS-INFN) junto a diferentes grupos de investigación. Para ello se ha realizado un análisis por p-EBS.

Measurement of ^{120}Sn targets deposited on Formvar for basic nuclear physics

Within the framework of the project ”Breaking 12C: a Probe Towards the Evolution of Stars and the Origin of Life (PGC2018-096994-B-C21)” different ^{120}Sn targets deposited on fomvar. The determination of the thickness and possible contaminants in the layer (C, O) is essential for the correct interpretation of the results of the measurements of the $^{10}\text{Be} + ^{120}\text{Sn}$ reaction at energies around the Coulomb barrier carried out by researchers from the Department of Physics Atomic, Molecular and Nuclear at the University of Seville in the Laboratori Nazionale del Sud laboratory of the Instituto Nazionale di Fisica Nucleare (LNS-INFN) together with different research groups. For this, an analysis by p-EBS (proton Elastic Backscattering Spectroscopy) has been carried out.

Determinación de la composición química de recubrimientos de $\text{Cr}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{N}_y$ con disinta estequiometría

En el marco del proyecto Recubrimientos innovadores preparados por magnetron sputtering para absorción solar selectiva (MAGICOS2: PID2019-104256RB-I00) se han desarrollado en el grupo Tribología y Protección de Superficies del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla recubrimientos del tipo $\text{Cr}(1-x)\text{AlxNy}$ preparados por la técnica de pulverización para la captación de energía solar de forma selectiva. El interés de este trabajo es estudiar y controlar las propiedades ópticas de dichos recubrimientos con espesores típicamente por debajo del centenar de nanómetros, donde se han variado los parámetros de la deposición con el objetivo de conseguir distintas estequiométrias y microestructuras. Para establecer una relación entre estequiométria y propiedades es necesaria la determinación precisa de la misma, principalmente para la determinación de la cantidad de nitrógeno, elemento difícil de cuantificar con precisión por otras técnicas. Para ello se han realizado medidas en condiciones de non-RBS con partículas alfas para determinar la cantidad de Cr, Al y N.

Determination of the chemical composition of $\text{Cr}(1-x)\text{AlxNy}$ coatings with different stoichiometry

Within the framework of the Innovative Coatings prepared by magnetron sputtering for selective solar absorption (MAGICOS2: PID2019-104256RB-I00) project, $\text{Cr}(1-x)\text{AlxNy}$ type coatings have been developed in the Tribology and Surface Protection group of the Institute of Materials Science of Seville. These coatings have been prepared by magnetron sputtering technique for selectively capturing solar energy. The interest of this work is to study and control the optical properties of these coatings with thicknesses typically below a hundred nanometers, where the deposition parameters

have been varied in order to achieve different stoichiometries and microstructures. To establish a relationship between stoichiometry and properties, its precise determination is necessary, mainly for the determination of the amount of nitrogen, an element that is difficult to quantify accurately by other techniques. For this, measurements have been made under non-RBS conditions with alpha particles to determine the amount of Cr, Al and N.

Caracterización de blancos sólido de Si:He para experimentos de reacciones nucleares en grandes instalaciones internacionales.

En el marco del experimento IS698 realizado en HIE-ISOLDE (CERN), en el que se ha estudiado la dispersión en He de haces radiactivos de alta intensidad de estaño (Sn-108 y Sn-110), se hace necesaria la caracterización de los blancos de Si:He tanto antes como después de la realización de las medidas experimentales. Para ello se ha realizado análisis de p-EBS (proton Elastic Backscattering Spectroscopy). Dichas medidas se realizaron en el contexto del consorico consorcio CLEAR (Cluster of Low Energy Accelerators for Research) que es un conjunto formado por tres instalaciones (ATOMKI en Debrecen, CNA en Sevilla e IST en Lisboa) que se encuentra enmarcado en el proyecto europeo EUROpean Laboratories for Accelerator Based Science (EURO-LABS) Este tipo de medidas supone un claro ejemplo de las sinergias entre pequeñas y grandes instalaciones de aceleradores de partículas.

Characterization of Si:He solid targets for nuclear reaction experiments in large international facilities.

Within the framework of the IS698 experiment carried out at HIE-ISOLDE (CERN), in which the dispersion in He of high-intensity radioactive beams of tin (Sn-108 and Sn-110) has been studied, it is necessary to characterize the Si:He targets both before and after the experimental measurements. For this, p-EBS (proton Elastic Backscattering Spectroscopy) analysis has been carried out. These measures were carried out in the context of the CLEAR (Cluster of Low Energy Accelerators for Research) consortium, which is a group made up of three facilities (ATOMKI in Debrecen, CNA in Seville and IST in Lisbon) that is part of the European project EUROpean Laboratories for Accelerator Based Science (EURO-LABS) This type of measurement is a clear example of the synergies between small and large particle accelerator facilities

3.3.2. Física experimental de neutrones/ Experimental neutron physics

La física experimental de neutrones tiene un papel fundamental en numerosos campos tales como física nuclear básica, física de materiales, tecnología nuclear, imagen, física médica, etc. La unidad de investigación de Física Nuclear Básica del CNA ha desarrollado la primera fuente de neutrones en España basada en un acelerador, llamada HiSPANoS (HISPAlis NeutrOn Source). El haz de neutrones generado de HiSPANoS era inicialmente, como el resto de los haces producidos en el CNA, continuo; pero se actualizó mediante un sistema de pulsado y compresión de pulsos que permite generar haces pulsados de neutrones que permiten realizar experimentos de tiempo-de-vuelo.

Se ha trabajado, principalmente, en las siguientes líneas de investigación:

Commissioning: se han finalizado las labores de caracterización y validación de los haces de neutrones rápidos disponibles en la instalación a través de reacciones ${}^2\text{H}(\text{d},\text{n})$, para haces monoenergéticos hasta 6 MeV, y $\text{Li}/\text{Be}(\text{d},\text{n})$ para haces “blancos” hasta 15 MeV.

Irradiación: Se ha continuado la colaboración con la irradiación con neutrones rápidos de yemas de árboles frutales, un servicio solicitado por la empresa ANECOOP.

Imagen: Se ha continuado con el desarrollo de la línea de imagen mediante el uso de la nueva cámara de neutrones, y la inter-comparación entre radiografías obtenidas con neutrones rápidos, térmicos, rayos X (del laboratorio de fluorescencia) y gammas (del irradiador de ^{60}Co).

Caracterización de detectores: a través del proyecto europeo H2020-ARIEL se ha realizado un experimento para la caracterización de la respuesta energética a neutrones rápidos de un detector tipo CLYC para su uso como espectroscopio de neutrones en reactores de fusión; por otro lado, se ha cuantificado la “sensitividad” a neutrones epítérmicos de los detectores i-TED (H2020-AERC-HYMNS) antes de su uso en la instalación n_TOF del CERN para medir reacciones (n,γ).

Producción de haces pulsados de ^4He : aunque el sistema de pulsado del haz está diseñado específicamente para haces de hidrógeno (^1H y ^2H), se han realizado las pruebas para ver las capacidades, que se han demostrado limitadas pero quizás suficientes, para pulsar haces de partículas alfa (^4He) que permitan el estudio mediante tiempo de vuelo de neutrones producidos por reacciones (α,n), que son el objetivo de la colaboración MANY.

Puesta punto de un sistema para medida de reacciones (n,γ): se ha continuado con la puesta a punto y prueba de un sistema basado en detectores delgados de Si para medir las partículas cargadas ligeras emitidas en reacciones inducidas por neutrones.

- Desarrollo y prueba de un espectrómetro pasivo de neutrones: con el objetivo de contribuir a la caracterización de las instalación NEAR de n_TOF en el CERN se ha diseñado, desarrollado y probado en HiSPANoS el detector ANTILoPE, basado en moderación de neutrones mediante polietileno y activación de láminas de delgadas de oro.



Figura 3.11: Radiografía mediante neutrónicos térmicos en HiSPANoS. Thermal neutron radiography at HiSPANoS

Experimental neutron physics plays a fundamental role in numerous fields such as basic nuclear physics, materials physics, nuclear technology, imaging, medical physics, etc. The CNA's Basic Nuclear Physics research unit has developed the first neutron source in Spain based on an accelerator,

called HiSPANoS (HISPAlis NeutrOn Source). The neutron beam generated from HiSPANoS was initially, like the rest of the beams produced at the CNA, continuous; but it was upgraded with a pulse pulsing and compression system that allows generating pulsed beams of neutrons that allow time-of-flight experiments to be carried out.

Work has been carried out mainly on the following lines of research:

Commissioning: the characterization and validation work of the fast neutron beams available at the facility (${}^2\text{H}(\text{d},\text{n})$ reactions for monoenergetic beams up to 6 MeV and $\text{Li}/\text{Be}(\text{d},\text{n})$ for “white” beams up to 15 MeV) has been completed.

Irradiation: Collaboration has continued with fast neutron irradiation of fruit tree buds, a service requested by the company ANECOOP.

Image: The development of the neutron radiography line has continued through the use of the new neutron camera, and the inter-comparison between radiographs obtained with fast, thermal neutrons, X-rays (from the fluorescence laboratory) and gammas (from the ${}^{60}\text{Co}$ irradiator).

Characterization of detectors: through the European project H2020-ARIEL, an experiment has been carried out to characterize the energy response to fast neutrons of a CLYC-type detector for use as a neutron spectrometer in fusion reactors. On the other hand, the “sensitivity” to epithermal neutrons of the i-TED detectors (H2020-AERC-HYMNS) has been quantified before their use in the n_TOF facility at CERN to measure (n,γ) reactions.

Production of ${}^4\text{He}$ pulsed beams: although the beam pulsing system is designed specifically for hydrogen beams (${}^1\text{H}$ and ${}^2\text{H}$), tests have been carried out to see the capabilities, which have been shown to be limited but perhaps sufficient, to pulse beams of alpha particles (${}^4\text{He}$) that allow the study by time-of-flight of neutrons emitted in (α,n) reactions, which are the objective of the MANY Collaboration.

Development of a system for measuring reactions (n,chp): the development and testing of a system based on thin Si detectors to measure light charged particles emitted in reactions induced by neutrons has continued.

Development and testing of a passive neutron spectrometer: with the aim of contributing to the characterization of the NEAR station of the n_TOF facility at CERN, the ANTILOPE detector has been designed, developed and tested at HiSPANoS, based on neutron moderation using polyethylene and activation of thin sheets of gold.

3.4. Unidad de Investigación Ciclotrón/ Cyclotron Research Strand.

3.4.1. Irradiación de células con protones y estudios radiobiológicos en la línea externa del ciclotrón / Irradiation of cells with protons and radiobiological studies on the external line of the cyclotron.

Durante el periodo 2021-2022 se han realizado principalmente experimentos de Irradiación (descritos en esta memoria dentro del apartado Centro para ensayos de irradiación) y de Física Médica, principalmente relacionados con protonterapia. Estos últimos se recogen de manera resumida a continuación.

During the period 2021-2022, mainly irradiation experiments (described in this report in the section Centre for irradiation tests) and Medical Physics experiments, related principally to proton therapy, have been carried out. The latter are summarised below.

Microdosimetría/Microdosimetry.

Se ha usado el haz de protones de 18 MeV del ciclotrón para calibrar la segunda generación de microdetectores con geometría cilíndrica 3D desarrollados en el Centro Nacional de Microelectrónica (IMB-CNM, CSIC) (C. Guardiola et al., patent ref: PCT/ES2015/070056). En esta instalación se han hecho las primeras medidas de microdosimetría usando un haz de protones de baja energía con fluencias equivalentes a las clínicas para distintas energías a lo largo del pico de Bragg. Los resultados han demostrado la capacidad de estos sensores para medir distribuciones microdosimétricas en condiciones clínicas.

The 18 MeV proton beam of the cyclotron has been used to calibrate the second generation of microdetectors with 3D cylindrical geometry developed at the Centro Nacional de Microelectrónica (IMB-CNM, CSIC) (C. Guardiola et al., patent ref: PCT/ES2015/070056). In this facility, the first microdosimetry measurements have been performed using a low-energy proton beam with fluences equivalent to the clinical ones for different energies along the Bragg peak. The results have demonstrated the capability of these sensors to measure microdosimetric distributions under clinical conditions

Dosimetría/Dosimetry

Se han realizado las medidas que han servido como prueba de concepto para un sistema nuevo de medida de la dosis en tiempo real. Esto ha supuesto la participación como inventores de la Dra. M Carmen Jiménez Ramos y del Dr. Javier García López, ambos investigadores del CNA, en la patente correspondiente: DOSIMOEMS: DEVELOPMENT OF REAL-TIME DOSIMETER BASED O MICROOPTO-ELECTROMECHANICAL SYSTEMS. (Ref. Europe Nº21305315.0). La investigadora principal de esta invención es la Dra. Consuelo Guardiola Salmerón, en ese momento investigadora del Centre National de Recherche Scientifique/Université Paris Saclay y también participación del Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM, CSIC) con los investigadores Augusto Márquez y Xavier Muñoz- Berbel. Con la idea propuesta se ha mejorado la aplicación clínica de las películas radiocrómicas desarrollando un sistema de lectura directa de la dosis depositada en las mismas cuando esté expuesta la radiación, superándose así la limitación inherente hasta ahora en el retraso del análisis de películas radiosensibles, por lo que se ha convertido un detector pasivo en uno activo. Este dosímetro permite medir en tiempo real e in situ la dosis administrada en una determinada localización durante tratamientos de radioterapia haciendo uso de películas radiosensibles y un sistema micro-opto-electromecánico. Con este dosímetro se podrán optimizar las verificaciones del tratamiento de radioterapia.

Measurements have been carried out that have served as proof of concept for a new real-time dose measurement system. This has involved the participation as inventors of Dr. M Carmen Jiménez Ramos and Dr. Javier García López, both CNA researchers, in the corresponding patent: DOSIMOEMS: DEVELOPMENT OF REAL-TIME DOSIMETER BASED O MICROOPTO-ELECTROMECHANICAL SYSTEMS (Ref. Europe N°21305315.0). The principal investigator of this invention is Dr. Consuelo Guardiola Salmerón, at that time researcher at the Centre National de Recherche Scientifique/Université Paris Saclay and there is also participation of the Institute of Microelectronics of Barcelona (IMB-CNM, CSIC) with the researchers Augusto Márquez and Xavier Muñoz- Berbel. The proposed idea has improved the clinical application of radiochromic films by developing a system for direct reading of the dose deposited on them when exposed to radiation, thus overcoming the limitation inherent until now in the delay in the analysis of radiosensitive films, converting a passive detector into an active one. This dosimeter makes it possible to measure in real time and in situ the dose delivered at a given location during radiotherapy treatments using radiosensitive films and a micro-opto-electromechanical system. With this dosimeter, radiotherapy treatment verifications can be optimised

Verificación de rango/Range verification

La mejora en la precisión de los tratamientos de radioterapia con partículas cargadas pasa por la monitorización del rango del haz en el cuerpo del paciente. En este contexto se han realizado varios experimentos en colaboración con distintos grupos de investigación. A continuación, se enumeran algunos de los más relevantes: - Con el grupo IRIS del Instituto de Física de Física Corpuscular de Valencia (IFIC) se han realizado varias campañas de medidas para probar las últimas modificaciones en los prototipos que han desarrollado de cámara Compton (MACACO III y MACACOp) así como la electrónica de lectura asociada a los mismos. Los resultados obtenidos se han recogido en dos artículos científicos.

Improving the accuracy of charged particle radiotherapy treatments involves monitoring the range of the beam in the patient's body. In this context, several experiments have been carried out in collaboration with different research groups. Some of the most relevant ones are listed below: With the IRIS group of the Instituto de Física de Física Corpuscular de Valencia (IFIC), several measurement campaigns have been carried out to test the latest modifications in the Compton camera prototypes they have developed (MACACO III and MACACOp) as well as the readout electronics associated with them. The results obtained have been reported in two scientific articles

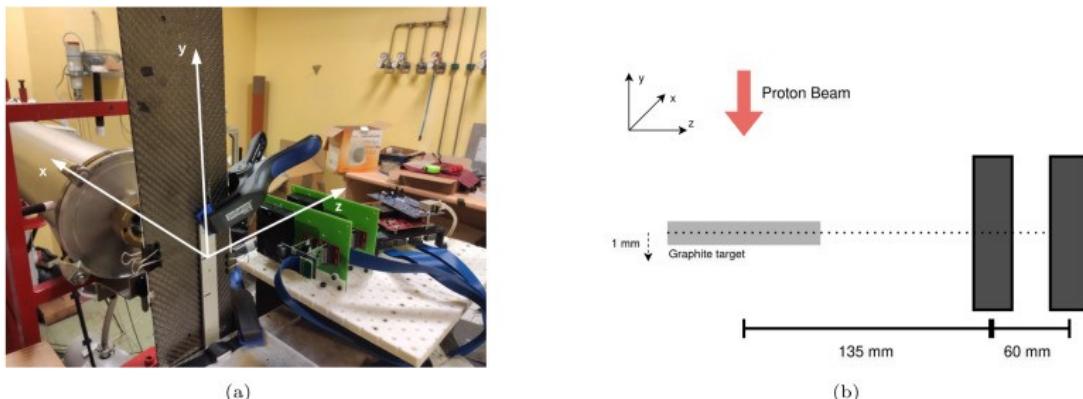


Figura 3.12: (a) Setup of the MACACO prototype at the CNA beam-line. (b) Diagram of the graphite target and Compton camera setup. The distance between the target and the first plane was set to 135 mm and the distance between the first and second plane was set to 60 mm. The graphite target was moved in steps of 1 mm with a linear motorized stage, along the X-direction

En colaboración con Michael Seimetz se han hecho las primeras pruebas de un detector de proto-

nes desarrollado por el Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (i3M, Valencia) siendo uno de los usos previstos de este sensor el formar parte de un sistema de verificación de rango. Es un modelo de laboratorio de un monitor de haz que consiste en una sola capa de fibras centelleantes de 500 μm de grosor. Cada fibra está acoplada a un SiPM; las señales de salida se digitalizan con un ASIC tipo TOFPET2. Con el haz externo del ciclotrón se ha comprobado la capacidad de detectar protones sin amplificación adicional. La tasa de conteo ha sido variada aprovechando el perfil gaussiano del haz hasta alcanzar el nivel de saturación del ASIC. Gracias a la alta resolución temporal ha sido posible distinguir entre los bunches del haz a una escala de nanosegundos. Los resultados se presentaron en la XXXVIII Reunión Bienal de la RSEF. El equipo de Dr. Cesar Domingo Pardo del IFIC ha realizado en el haz externo del ciclotrón la primera prueba de concepto de su detector i-TED (H2020-ERC-CoG-681740) como sistema de verificación de rango a través de la observación tanto de los llamados prompt-gammas como de la actividad beta+ (imagen PET) producida.

In collaboration with Michael Seimetz, the first tests of a proton detector developed by the Institute of Instrumentation for Molecular Imaging (i3M, Valencia) have been performed, and one of the expected uses of this sensor is as part of a range-verification system. It is a laboratory model of a beam monitor consisting of a single layer of 500 μm thick scintillating fibres. Each fibre is coupled to a SiPM; the output signals are digitised with a TOFPET2 type ASIC. With the external beam of the cyclotron, the ability to detect protons without additional amplification has been tested. The count rate was varied by exploiting the Gaussian profile of the beam until the saturation level of the ASIC was reached. Thanks to the high temporal resolution it was possible to distinguish between the beam bunches on a nanosecond scale. The results were presented at the 38th RSEF Biennial Meeting. Dr. Cesar Domingo Pardo's team at IFIC has performed the first proof-of-concept of its i-TED detector (H2020-ERC-CoG-681740) in the external beam of the cyclotron as a range-verification system through the observation of both the so-called prompt-gammas and the beta+ activity (PET image) produced

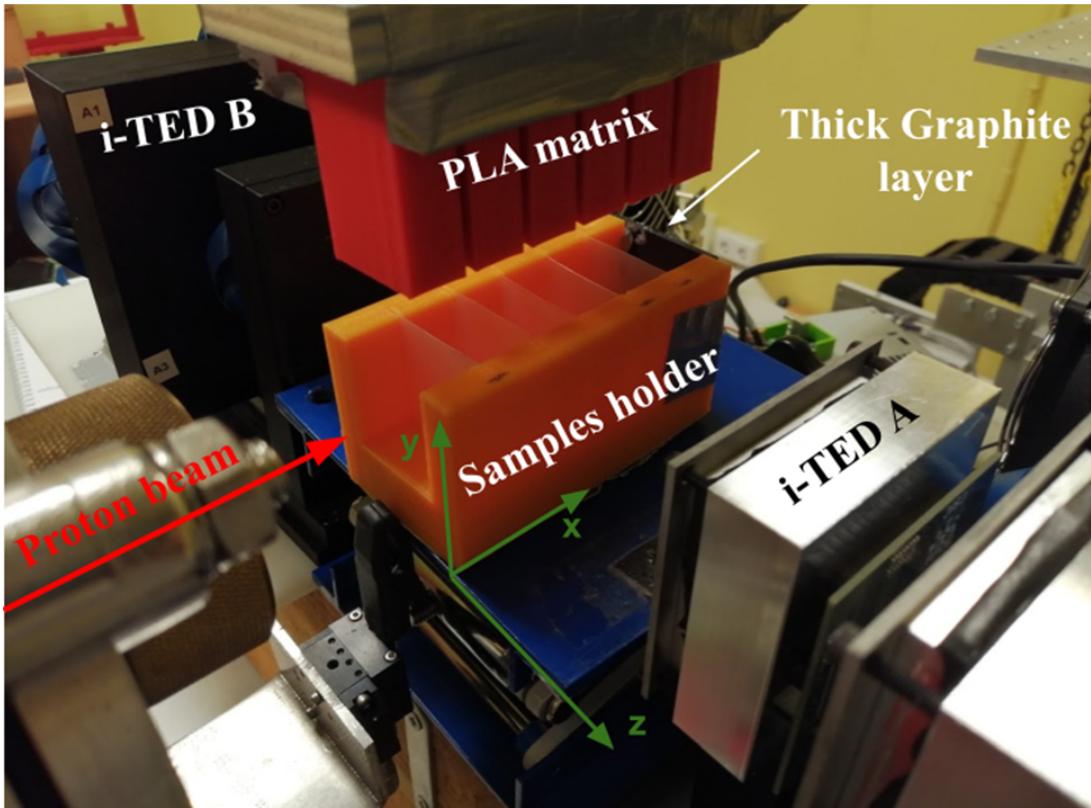


Figura 3.13: Picture of the setup used in the proof-of-concept experiment at CNA. The proton-beam (red arrow) impinges from the left-hand side and punches through five thin plastic foils surrounded by two i-TED modules in front-to-front configuration.

Producción de neutrones para radiografías/Neutron production for radiography

En el contexto del desarrollo de técnicas de imagen complementarias en el CNA (neutrones de HiSPANoS, gammas de RadLab y rayos-X del laboratorio de FRX) se ha realizado un experimento de prueba de concepto en el ciclotrón. Se ha irradiado un blanco de Be con protones de 18 MeV y se ha obtenido imágenes tanto con neutrones rápidos (emitidos por el blanco de Be) como con térmicos (producidos mediante termalización en un castillo de polietileno).

In the context of the development of complementary imaging techniques at the CNA (neutrons from HiSPANoS, gammas from RadLab and X-rays from the XRF laboratory), a proof-of-concept experiment was performed at the cyclotron. A Be target was irradiated with 18 MeV protons and imaged with both fast neutrons (emitted by the Be target) and thermal neutrons (produced by thermalisation in a polyethylene castle).

Radiobiología/Radiobiology

Se han realizado nuevos estudios de radiobiología propuestos por la Dra. Nuria Fuster-Martínez del IFIC y por la Dra. M^a Jesús García Murria de la Universidad de Valencia (UV) en colaboración con la Dra. Sonia Jimeno y el Dr. Pablo Huertas del Centro Andaluz de Biología Molecular y Medicina (CABIMER). El objetivo de las medidas es estudiar a nivel experimental *in vitro* el efecto radiobiológico de protones en combinación con NPs de oro e investigar los mecanismos subyacentes a los efectos observados a nivel físico, químico y biológico.

New radiobiology studies proposed by Dr. Nuria Fuster-Martínez of IFIC and Dr. M^a Jesús García Murria of the University of Valencia (UV) in collaboration with Dr. Sonia Jimeno and Dr. Pablo Huertas of the Andalusian Centre for Molecular Biology and Medicine (CABIMER) have been carried out. The aim of the measurements is to study at an experimental *in vitro* level the radiobiological effect of protons in combination with gold NPs and to investigate the mechanisms underlying the effects observed at the physical, chemical and biological levels.

3.4.2. Radiofarmacia

Validación de producción y control de calidad de [18F]F-DCFPyL

La unidad de Radiofarmacia del CNA ha colaborado con Curium Pharma Spain SA, empresa adjudicataria de la explotación del laboratorio de radiofarmacia asociado al ciclotrón del centro, en la validación analítica para la producción y control de calidad del radiofármaco [18F]F-DCFPyL. Este radiofármaco PET se une con elevada afinidad al dominio extracelular del antígeno prostático específico de membrana (PSMA) y permite la estadificación del cáncer de próstata y la localización de enfermedad metastásica a distancia.

La producción del radiofármaco en las instalaciones de Curium Pharma Spain SA en el CNA tiene como finalidad el desarrollo de un ensayo clínico prospectivo en el que se comparará la tasa de detección, la sensibilidad y especificidad de [18F]F-DCFPyL versus [18F]-FCH. Previamente a la implantación de la producción rutinaria del radiofármaco, se precisa la validación de la producción y de los métodos de control analítico para su posterior registro farmacéutico ante las agencias reguladoras. Con esta finalidad, la unidad de radiofarmacia ha colaborado en la validación del citado radiofármaco.

Se validó la pureza química y radioquímica mediante HPLC, el límite de disolventes residuales y etanol mediante cromatografía de gases, el método cromogénico para la cuantificación de endotoxinas, la determinación de pH mediante uso de tira reactiva, el límite de contenido de tetrabutilamonio (TBA) y el contenido de ión fluoruro ([18F-]) mediante radiocromatografía en capa fina (radioTLC). En cada uno de los protocolos de validación se analizaron estadísticamente los resultados para verificar que

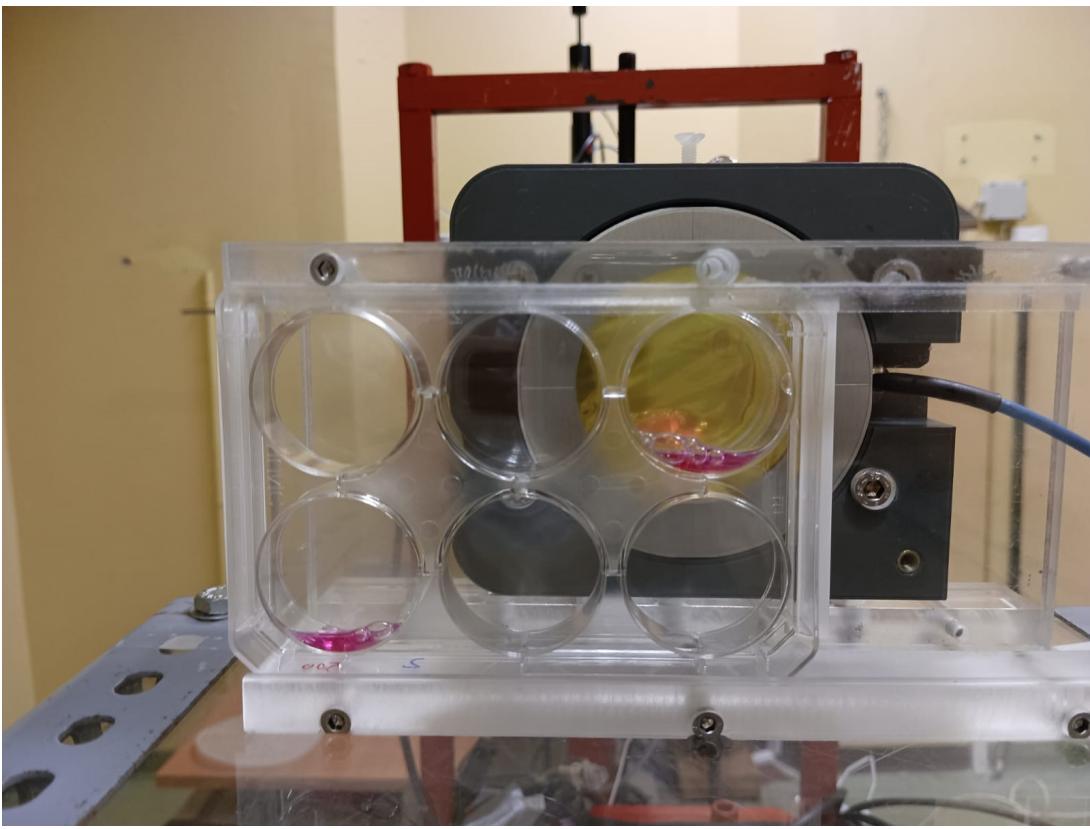


Figura 3.14: Setup de la línea externa para la irradiación de cultivos celulares.

diversos parámetros como la especificidad, linealidad, precisión, exactitud, límites de cuantificación y detección de cada uno de los métodos analíticos cumplían las especificaciones requeridas. Finalmente se validó la producción del radiofármaco y la esterilidad del proceso, utilizando módulos de síntesis automáticos tipo kit.

[18F]F-DCFPyL production and quality control validation

The Radiopharmacy Unit of CNA has collaborated with the awarded company for the operation of the radiopharmacy lab in CNA, Curium Pharma Spain SA, in the analytical validation for the production and quality control of the radiopharmaceutical [18F]F-DCFPyL.

This PET radiopharmaceutical it's able to bind to the extracellular domain of prostate-specific membrane antigen (PSMA) and allows the staging in prostate cancer and localization of associated distant metastatic disease.

Production of this PET radiopharmaceutical by Curium Pharma Spain SA in our center is aimed to develop a prospective clinical trial in which the detection rate, sensitivity and specificity of [18F]F-DCFPyL versus [18F]-FCH will be compared.

Before to the implementation of the routine production of the radiopharmaceutical, validation of production and analytical control methods is required for the subsequent pharmaceutical registration with local regulatory agencies. To this end, the radiopharmacy unit in CNA has collaborated in the validation of the radiopharmaceutical.

Validation of chemical and radiochemical purity using HPLC, residual solvent test and ethanol content by gas chromatography, chromogenic kinetic method for bacterial endotoxins test, pH measurement by reagent strip, TBA content limit test and [18F]-fluoride content by TLC were performed. The results obtained in each validation protocol were statistically analyzed in order to verify that parameters as specificity, linearity, precision, accuracy, limit of quantification and limit of detection met the required specifications.

Finally, production and sterility of the process were validated using automatic synthesis modules.

Instalación de nuevo laboratorio de control de calidad de Radiofarmacia y cualificación de equipos.

Durante el último semestre de 2020 se realizó la construcción y la instalación del nuevo laboratorio de control de calidad de la unidad de radiofarmacia del CNA. Los equipos instalados en el mismo son: radiocromatógrafo, cromatógrafo de gases, cromatógrafo de líquidos de alta resolución, equipo para determinación de endotoxinas, baño ultrasonidos, vitrina de extracción de gases y armario de seguridad para almacenar disolventes orgánicos.

Los equipos considerados críticos en la unidad de Radiofarmacia deben ser cualificados antes de su uso y antes de validar métodos analíticos con los mismos. A través de protocolos de cualificación de instalación y operación de los distintos equipos, se ha completado la cualificación de éstos. En el laboratorio de investigación, se dispone de módulos de síntesis automáticos para la producción de radiofármacos radiomarcados con flúor-18 y con carbono-11.

Dichos equipos requieren una cualificación para asegurar que tanto su instalación como su operación se encuentran dentro de las especificaciones indicadas por el fabricante y que están disponibles para ser utilizados cuando sea requerido. Se ha procedido a cualificar el módulo de síntesis automático de flúor-18 de manera satisfactoria.

Las operaciones efectuadas para la cualificación incluían una verificación y calibración de los sensores de presión, detectores Geiger y funcionamiento del HPLC semipreparativo integrado.

Quality control lab installation and equipment qualification

During the last semester of 2020, the construction and installation of the new quality control lab in the radiopharmacy unit in CNA was carried out. The installation of the new equipment in the lab are: radioTLC, gas chromatograph, high-performance liquid chromatograph, endotoxin determination equipment, ultrasound bath, gas extraction cabinet and safety cabinet to organic solvents store purpose.

Equipment considered as critical in the radiopharmacy unit must be qualified before use and validation of analytical methods with them. Using qualification protocols, installation and operation qualifications were completed in several equipment.

In the research lab, automatic synthesis modules for fluoride-18 and carbon-11 radiopharmaceutical production can be found. These equipment requires also qualification to be sure that installation and operation are agreed with manufacturer's specifications. In the radiopharmacy unit, the fluoride-18 automatic synthesis module was qualified satisfactorily. Qualification operations included verification and calibration of pressure sensors, Geiger detectors and performance of HPLC semipreparative equipment.

3.4.3. Imagen molecular/ Molecular imaging

La investigación del grupo en los años 2021-2022 se concentró en cuatro áreas:

- Terapia de captura de neutrones de boro y planificación del tratamiento de radioterapia.
- Planificación del tratamiento de radiación utilizando datos de PET/CT.
- Nanopartículas para imágenes médicas multimodales.

Desarrollo de nuevos radiotrazadores para la detección precoz de la enfermedad de Alzheimer. Todos estos temas fueron estudiados en colaboraciones nacionales e internacionales.

La terapia de captura de neutrones por boro (BNCT) está ganando un nuevo impulso después de que la producción de neutrones para el tratamiento haya estado cambiando de reactores nucleares a aceleradores dedicados, que por su tamaño se pueden alojar en hospitales. BNCT explora la reacción de $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ cuando los neutrones están en el rango de 10-50 keV. El paciente es irradiado con haz de neutrones después de ser inyectado con un compuesto que contiene boro, que

preferiblemente ingresa a las células tumorales. El boro prácticamente no está presente en las células humanas, pero la reacción antes mencionada tiene una competencia de $^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}$, que debido a una menor sección transversal, pero mayor presencia de nitrógeno impone una concentración mínima de ^{10}B en el tejido como 2 mM o 10^9 átomos de ^{10}B por célula. Actualmente solo hay un compuesto de boro aprobado en 2020 en Japón para el tratamiento: $[^{10}\text{B}]$ boronofenilalanina. Este es un derivado de un aminoácido fenilalanina, también como la tirosina. Ambos son transportados activamente a las células tumorales por transportadores de membrana celular. Las células tumorales usan más aminoácidos que las sanas, pero además de las condiciones de concentración previas. Todos estos requisitos apuntan a la necesidad de conocer un mapa 3D detallado de la concentración ^{10}B . Por el momento se realiza indirectamente mediante la medición PET de $[^{18}\text{F}]$ fluoroboronofenilalanina, que es un análogo cercano del fármaco de tratamiento. Esta medición de PET califica al paciente si puede someterse a un tratamiento con suficiente incorporación de compuestos de boro (3:1) en comparación con el tejido sano de fondo. Existe la necesidad de usar el mismo compuesto para la terapia y el diagnóstico (teranóstica). Aquí hemos entrado con nuestra investigación basada en una publicación nuestra anterior donde $[^{18}\text{F}]\text{NaBF}_4$ se utilizó para estudiar la hiperplasia y los tumores de la glándula tiroides en un modelo de rata. BF_4^- ion es un importador inespecífico de sodio-yodo (NIS) expresado en las células tiroideas que transporta yodo a las células desde el flujo sanguíneo. También puede ser bloqueado por grandes iones negativos como SO_4^{2-} , BF_4^- y otros. De esta manera bloqueado por $[^{18}\text{F}] \text{BF}_4^-$ el trazador puede visualizar NIS. El trazador en sí lleva una gran fracción de BF_4^- no etiquetado, que se considera unión no específica. Lo consideramos como una oportunidad para la medición semi-directa de la concentración de boro. La proporción de concentraciones de etiquetado a BF_4 sin etiquetar-/ $[^{18}\text{F}] \text{BF}_4^-$ es perfectamente conocida en la radiofarmacia. Por lo tanto, midiendo $[^{18}\text{F}] \text{BF}_4^-$ concentración podemos calcular la concentración de boro. Lo hemos demostrado en una publicación basándonos en datos previamente adquiridos. El compuesto NaBF_4 se puede utilizar en el tratamiento potencial de BNCT tiroideo o gástrico, donde se toma con una alta proporción frente a un fondo de más de 10. También se captura allí durante más de una hora en modelo de rata. Para el tratamiento con BNCT es necesario una inyección de aproximadamente 300 mg/kg de $[^{10}\text{B}]\text{NaBF}_4$. Obviamente, hay otros métodos de tratamiento del cáncer de tiroides, pero nuestro método demuestra una prueba de principio. Hay esfuerzos continuos de etiquetado de compuestos que son metabolizados selectivamente por las células tumorales con - fracción - $[^{18}\text{F}, ^{10}\text{B}] \text{BF}_3^-$ para tener un sitio para el etiquetado $[^{18}\text{F}]$ y al mismo tiempo para el sitio ^{10}B necesario para el tratamiento BNCT.

Planificación del tratamiento de radiación utilizando datos de PET/CT. En este trabajo presentamos una metodología capaz de utilizar imágenes armonizadas PET/CT en el enfoque de pintura de dosis por número (DPBN) mediante un sistema de planificación de tratamiento robusto y preciso. El procesamiento de imágenes y la planificación del tratamiento se realizaron mediante el uso de una plataforma basada en Matlab, llamada CARMEN, en la que se incluye una simulación completa de Monte Carlo. Se desarrolló una formulación de programación lineal para una optimización robusta voxel por voxel y se diseñó una optimización específica de apertura directa para una implementación eficiente de radioterapia adaptativa. El enfoque DPBN con nuestra metodología se probó para reducir las incertidumbres asociadas tanto con el valor absoluto como con el valor relativo de la información en la imagen funcional. Para el mismo caso de H&N, se planificó un único tratamiento robusto para los mapas de prescripción de dosis correspondientes a distribuciones estandarizadas de valores de absorción de dos protocolos diferentes de reconstrucción de imágenes: uno para cumplir con la acreditación EARL para la armonización de la imagen PET/CT $[^{18}\text{F}]$ FDG, y el otro para utilizar la resolución espacial más alta disponible. Asimismo, se planificó un tratamiento robusto para cumplir con los mapas de prescripción de dosis correspondientes a ambos enfoques, la pintura de dosis por contorno en función de los volúmenes y nuestro DPBN voxel por voxel. También se llevó a cabo una planificación adaptativa para comprobar la idoneidad de nuestra propuesta. Diferentes planes mostraron solidez para cubrir una gama de escenarios para la implementación de estrategias de armonización utilizando la resolución más alta disponible. Asimismo, se logró robustez asociada al nivel de discretización de la prescripción de dosis según el uso de contornos o números.

Todos los planes mostraron un excelente histograma de índice de calidad y factores de calidad por debajo del 2 %. Se obtuvo una solución eficiente para la radioterapia adaptativa basada directamente en los cambios en la imagen funcional. Demostramos que mediante el uso del enfoque DPBN voxel por voxel es posible superar los inconvenientes típicos relacionados con las imágenes PET/CT, proporcionando al especialista clínico la confianza suficiente para la implementación rutinaria de imágenes funcionales para radioterapia personalizada. Este trabajo se ha realizado en colaboración con el Departamento de Fisiología Médica y Biofísica de USE, Servicio de Radioterapia del Hospital Universitario de USE e Instituto Biomédico de Sevilla (IBIS), España.

Las nanopartículas se utilizan para muchos tipos de tratamiento y diagnóstico en medicina. En colaboración con el Instituto de Ciencia de Materiales (CSIC-US), que inició el proyecto, hemos examinado la aplicación de imágenes por TC de diferentes tipos de nanopartículas para ser utilizadas en imágenes multimodales. Estos esfuerzos se realizaron primero, para imágenes combinadas CT-ópticas utilizando nanopartículas de Eu³⁺:LaF₃ nanopartículas de Eu³⁺:LaF₃ Eu^{3+:(H₃O)Lu₃F₁₀ Nd-Doped LuVO₄(NaLa(XO₄)₂ , X= Mo,W). Luego, se abordaron las nanopartículas multifuncionales para TOMOGRAFÍA computarizada y resonancia magnética de alto campo, incluidas las nanopartículas DyVO₄ y HoVO₄. También se analizaron nanopartículas de núcleo-cáscara para tres modalidades de imagen (TC-imágenes de infrarrojo cercano-resonancia magnética de campo alto). Finalmente, un sistema (BaGdF5) también se etiquetó con éxito con ¹⁸F para imágenes mixtas de MRI-PET. La ganancia en la atenuación por TC expresada en unidades de Hounsfield (HU) para 20 mg/ml de las nanopartículas es de 1,5 a 2,5 veces mayor que para el compuesto de referencia que contiene yodo, el iohexol utilizado como contraste en imágenes médicas, por lo que a 20 mg/ml recibimos alrededor de 300 HU.}

También hemos examinado el agente potencial para **la detección temprana de la enfermedad de Alzheimer en PET** - radiotrazador Amylovis. Los resultados de este trabajo fueron publicados. El trabajo se realizó en colaboración con personal de CENTIS, CNEURO de Cuba y centro uruguayo de Imagen Molecular (CUDIM), Montevideo, Uruguay.

The research of the group in the years 2019-2020 was concentrated in four areas

All these subjects were studied in national and international collaborations.

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) is gaining new momentum after the production of neutrons for treatment has been shifting from nuclear reactors to dedicated accelerators, which by their size can be housed in hospitals. BNCT explores the reaction of ¹⁰B(n,α)⁷Li when the neutrons are in the range of 10-50 keV. The patient is irradiated with neutron beam after being injected with boron-containing compound, which preferably enters tumor cells. Boron is practically not present in human cells, but the above-mentioned reaction has a competing one ¹⁴N(n,p)¹⁴C, which due to lower cross section, but higher presence of nitrogen imposes a minimum concentration of ¹⁰B in the tissue as 2 mM or 109 atoms of ¹⁰B per cell. Currently there is only one boron compound approved in 2020 in Japan for treatment – [¹⁰B]boronophenylalanine. This is a derivative of an amino acid phenylalanine, also like tyrosine. Both are actively transported to tumor cells by cell membrane transporters. Tumor cells use more amino acids than healthy ones, but on top of previous concentration conditions. All of these requirements point to the necessity of knowing detailed 3D map of ¹⁰B concentration. For the moment it is done indirectly by PET measurement of [¹⁸F]fluoroboronophenylalanine, which is a close analogue of treatment drug. This PET measurement qualifies the patient if he/she can undergo treatment with sufficient boron compound incorporation (3:1) compared to background healthy tissue.

There is a need of using the same compound for therapy and diagnostics (theranostics). Here

we have entered with our research based on our previous publication where $[^{18}\text{F}]\text{NaBF}_4$ was used to study hyperplasia and tumors of thyroid gland in a rat model. BF_4^- ion is a non-specific sodium-iodine symporter (NIS) expressed on thyroid cells which transports iodine into the cells from blood flow. It can also get blocked by large negative ions like SO_4^{2-} , BF_4^- and others. This way blocked by $[^{18}\text{F}]\text{BF}_4^-$ the tracer can visualize NIS. The tracer itself carries a large fraction of non-labeled BF_4^- which is considered non-specific binding. We considered it as an opportunity for semi-direct measurement of boron concentration. The proportion concentrations of labeled to unlabeled $\text{BF}_4^-/[^{18}\text{F}]\text{BF}_4^-$ is perfectly known at the radiopharmacy. Hence measuring $[^{18}\text{F}]\text{BF}_4^-$ concentration we can calculate boron concentration. We have demonstrated it in the publication based on previously acquired data. The compound NaBF_4 can be used in potential thyroid or gastric BNCT treatment, where it is taken up with high ratio vs. background of more than 10. It is also captured there for more than an hour in rat model. For BNCT treatment there is a need of injection of about 300 mg/kg of $[^{10}\text{B}]\text{NaBF}_4$. Obviously, there are other method of thyroid cancer treatment, but our method demonstrates proof of principle. There are ongoing efforts of labeling of compound that are metabolized selectively by tumor cells with -moiety $-[^{18}\text{F}, ^{10}\text{B}]\text{BF}_3^-$ to have a site for $[^{18}\text{F}]$ labeling and at the same time for ^{10}B site necessary for BNCT treatment.

Radiation treatment planning using PET/CT data. In this work we present a methodology able to use harmonized PET/CT imaging in dose painting by number (DPBN) approach by means of a robust and accurate treatment planning system. Image processing and treatment planning were performed by using a Matlab-based platform, called CARMEN, in which a full Monte Carlo simulation is included. Linear programming formulation was developed for a voxel-by-voxel robust optimization and a specific direct aperture optimization was designed for an efficient adaptive radiotherapy implementation. DPBN approach with our methodology was tested to reduce the uncertainties associated with both, the absolute value and the relative value of the information in the functional image. For the same H&N case, a single robust treatment was planned for dose prescription maps corresponding to standardized uptake value distributions from two different image reconstruction protocols: One to fulfill EARL accreditation for harmonization of $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ PET/CT image, and the other one to use the highest available spatial resolution. Also, a robust treatment was planned to fulfill dose prescription maps corresponding to both approaches, the dose painting by contour based on volumes and our voxel-by-voxel DPBN. Adaptive planning was also carried out to check the suitability of our proposal. Different plans showed robustness to cover a range of scenarios for implementation of harmonizing strategies by using the highest available resolution. Also, robustness associated to discretization level of dose prescription according to the use of contours or numbers was achieved. All plans showed excellent quality index histogram and quality factors below 2 %. Efficient solution for adaptive radiotherapy based directly on changes in functional image was obtained. We proved that by using voxel-by-voxel DPBN approach it is possible to overcome typical drawbacks linked to PET/CT images, providing to the clinical specialist confidence enough for routinely implementation of functional imaging for personalized radiotherapy . This work was done in collaboration with Department of Medical Physiology and Biophysics of USE, Radiotherapy Service of University Hospital of USE and Biomedical Institute of Seville (*IBIS*), Spain.

Nanoparticles are used for many types of treatment and diagnosis in medicine. In the collaboration with the Institute of Materials' Science (CSIC-US), which initiated the project, we have examined the CT imaging application of different kind of nanoparticles to be used in multimodal imaging. These efforts were done first, for combined CT-optical imaging using nanoparticles of $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$, and other systems with higher stopping power such as $\text{Eu}^{3+}:(\text{H}_3\text{O})\text{Lu}_3\text{F}_{10}$ Nd-Doped LuVO_4 and $(\text{NaLa}(\text{XO}_4)_2, \text{X} = \text{Mo, W})$.

Then, multifunctional nanoparticles for CT and high field MRI imaging were addressed, including DyV_4 and HoVO_4 nanoparticles. Core-shell nanoparticles for three imaging modalities (CT-near infrared imaging-high field MRI) were also analyzed. Finally, a system (BaGdF_5) was also successfully labelled with ^{18}F for mixed MRI-PET imaging. The gain in CT attenuation expressed in Hounsfield

units (HU) for 20 mg/mL of the nanoparticles is from 1.5 to 2.5 times higher than for reference compound containing iodine, iohexol used as a contrast in medical imaging, for which at 20 mg/mL we receive about 300HU.

In years 2015-6 we have examined the potential agent for early detection of Alzheimer's disease in PET - Amyloid radiotracer. The results of this work were extended and published. The work was done in collaboration with personnel of CENTIS, CNEURO from Cuba and Uruguayan Center of Molecular Imaging (CUDIM), Montevideo, Uruguay.

3.4.4. Criopreservación

En los años 2021-22 las investigaciones se han centrado en la criopreservación de muestras biológicas de gran tamaño y su posterior recalentamiento mediante ultrasonidos focalizados de alta intensidad. En las siguientes líneas se describen los proyectos que se están desarrollando.

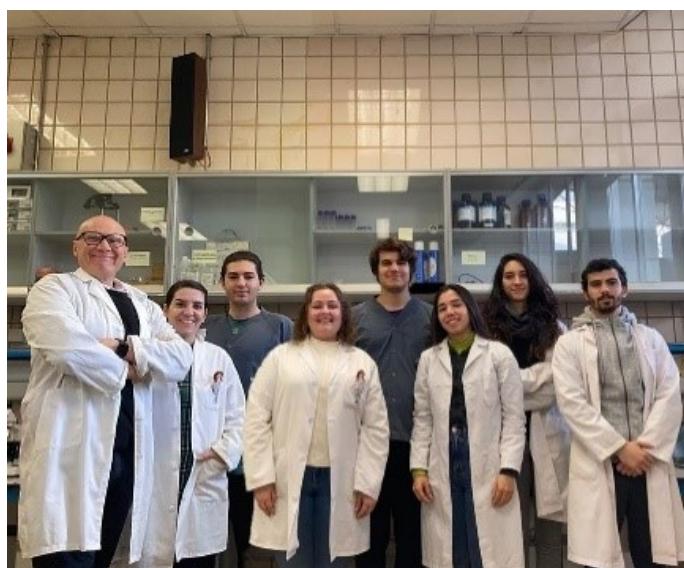


Figura 3.15: Grupo de Criopreservación

En primer lugar se llevó a cabo un Trabajo de Fin de Máster en Ingeniería Biomédica y Salud Digital sobre criopreservación. En concreto, se caracterizó el dispositivo de HIFU para el recalentamiento de muestras almacenadas a -80 °C. La caracterización con termopares permitió diseñar y construir el soporte óptimo para garantizar la repetibilidad y precisión de los experimentos de recalentamiento, y así se pudo aplicar preliminarmente sobre nematodos *Caenorhabditis elegans* preservados en glicerol, con una tasa de recuperación del 90 % para poblaciones de estadios de crecimiento mixtos, incluyendo adultos. Los resultados fueron recogidos en un artículo, aceptado para publicación en *Scientific Reports* con fecha 20 de diciembre de 2022, y publicado el siguiente año. Estos resultados se comunicaron en los congresos de la Society for Low Temperature Biology (SLTB2021) y Society for Criopreservation (CRYO2022), en este último recibiendo el Premio Audrey Smith otorgado por el abstract y la comunicación.

Posteriormente, se aplicó la técnica de recalentamiento por ultrasonidos a anillos de aorta de ratón, de dimensiones superiores a los nematodos, obteniendo también resultados favorables en la recuperación. Se elaboró un modelo mediante elementos finitos para simular la física del calentamiento por ultrasonidos sujeto a las condiciones de nuestros experimentos, para comprender y optimizar el calentamiento. Finalmente, se aplicó una modificación de la técnica a corazones completos de ratón en hipotermia, con resultados igualmente positivos en su aplicación.

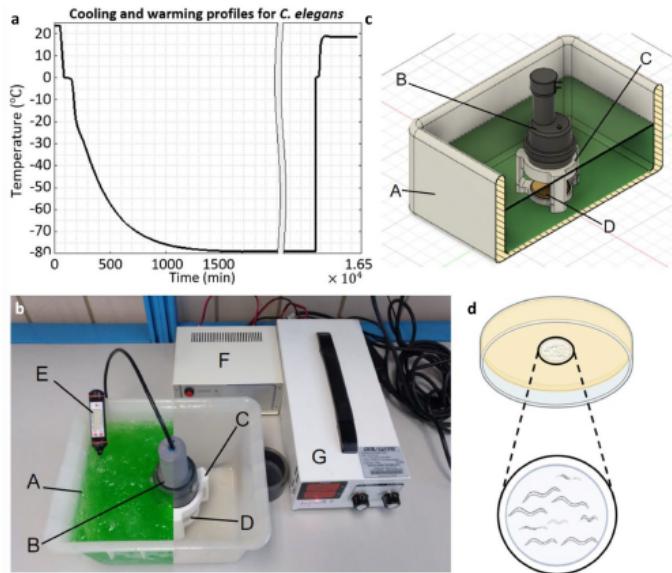


Figura 3.16

De forma paralela, se llevaron a cabo experimentos de impedancia eléctrica para caracterizar crioprotectores con el objetivo de su aplicación a la carga de anticongelante y enfriamiento de muestras biológicas.



Figura 3.17

Un miembro del grupo adquirió conocimientos sobre el uso de Ultrasonidos Focalizados de Alta Intensidad (High Intensity Focused Ultrasound, HIFU) como método de recalentamiento de muestras biológicas. Gracias a dicha especialización, ha establecido nuevos vínculos en el ámbito de la imagen médica, visitando las instalaciones de la empresa Image Guided Therapy (IGT; Burdeos, Francia), líderes europeos en diseño y manufacturación de aparatos de HIFU. Su contribución con esta tecnología novel fue expuesta en el “2022 Webinar Series” de la Society for Cryobiology, donde participó como ponente junto a los profesores Boris Rubinsky (University of California Berkeley, EEUU) e Ido Braslavsky (Hewbrew University of Jerusalem, Israel).

También se ha trabajado en el sistema “Liquidus Tracking”, una técnica de enfriamiento que evita la formación de cristales de hielo en anillos de aorta de ratón. Al cierre del año, inició la construcción de un sistema automático de perfusión y enfriamiento de un sistema destinado a la criopreservación de corazones de ratón.

3.5. Unidad de Investigación en Espectrometría de Masas (AMS)/ Accelerator Mass Spectrometry (AMS) Research Strand

El grupo de investigación Física Nuclear Aplicada de la Universidad de Sevilla (RNM-138) trabaja asiduamente en el Centro Nacional de Aceleradores especialmente en la línea de investigación centrada en la Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS). AMS es una técnica basada en el uso de aceleradores de partículas cuyo objetivo fundamental es la detección de radionúclidos que se encuentran en muy baja concentración en las muestras de interés.

Tradicionalmente, los isótopos radiactivos se han detectado a través de las emisiones que se dan lugar cuando éstos se desintegran. Sin embargo, esto puede ser muy poco eficaz, fundamentalmente porque el ritmo con que se producen las desintegraciones, que es característico del isótopo de que se trate, puede ser en algunos casos extremadamente bajo. Como ejemplo, un cierto número de núcleos de ^{14}C se reduce a la mitad cada 5730 años. En estos casos es más eficiente buscar la manera de detectar estos núcleos directamente, y no a través de su actividad radiactiva. Esto puede hacerse gracias a que tienen una masa distinta a la de sus isótopos estables. La espectrometría de masas permite seleccionar los iones que atraviesan un campo magnético en función de su masa y de su carga, lo cual puede aprovecharse para el objetivo descrito anteriormente. En AMS, se conjunta esta propiedad física con el uso de altas energías a través de la utilización de un acelerador de partículas, lo que dota a la técnica de una sensibilidad altísima.

En el CNA se dispone actualmente de dos sistemas de AMS: uno basado en un acelerador de 200 kV, dedicado exclusivamente a la detección del ^{14}C , y otro de 1 MV, más complejo y que permite la detección de otros radionúclidos como el ^{10}Be , ^{36}Cl , ^{26}Al , ^{129}I , isótopos de Pu, etc. El uso de la Espectrometría de Masas con Aceleradores dentro del grupo de investigación busca ampliar la capacidad de afrontar de una serie de problemas que tradicionalmente han sido estudiados a través de la medida de la radiactividad en este grupo.

La radiactividad se encuentra presente comúnmente en el medio ambiente, y esta radiactividad puede tener un origen artificial o natural. Los isótopos radiactivos pueden generarse en procesos naturales en la atmósfera, en el medio marino o en la litosfera, y lo hacen continuamente. Pero también existen isótopos radiactivos llamados primigenios, que están presentes en el mismo desde la formación de nuestro planeta. Asimismo, es indudable que las actividades nucleares llevadas a cabo por el hombre liberan radiactividad.

El objetivo de nuestra investigación es aprovechar esta radiactividad con varios fines: evaluar el posible impacto en el medio ambiente y en la población general, trazar procesos medioambientales, evaluar las necesidades de la gestión de los residuos radiactivos, etc. Por ejemplo, el estudio de la radiactividad medioambiental puede dar información acerca de la cantidad emitida en accidentes nucleares y esto puede servir para prever su dispersión en posibles accidentes futuros. Por otra parte, los isótopos radiactivos pueden actuar como trazadores, es decir, como testigos de la evolución de procesos como corrientes marinas, corrientes de aire, etc. Esto puede utilizarse como un modo de estudiar, por ejemplo, el cambio climático. Finalmente, dentro de la línea general de investigación que presentamos, se está estudiando cómo ayudar en la caracterización de los residuos nucleares, para prever la gestión y el almacenamiento de los mismos con mayor seguridad.

Aparte de sus aplicaciones, el CNA desarrolla también su labor en Espectrometría de Masas con Aceleradores en el desarrollo de nueva metodología y en la optimización de la ya existente.

Several members of the Applied nuclear Physics research group (RNM-138) work on Accelerator Mass Spectrometry (AMS) at the National Accelerator Center (CNA). AMS is an accelerator technique dedicated to the detection of radionuclides in very low concentration in the samples of interest. Traditionally, radionuclides are detected through the particles emitted when they are disintegrated. However, this can be very inefficient sometimes. The radionuclides disintegrate with a probability which is characteristic of the concrete isotope and that can be very low in many cases. For example,

a certain amount of ^{14}C is reduced to half the initial amount only after 5370 years. In these cases, it makes much more sense to directly detect the nuclei, without waiting for their disintegration. The fact that radioisotopes have a different mass than their stable isotopes gives a possibility to select them. Mass Spectrometry is a technique that separates ions depending on their masses and charges thanks to the different trajectories in a magnetic field. In AMS, this is combined with high energies thanks to the use of a particle accelerator. This provides the technique of a very high sensitivity thanks to the measurement of nuclear physical properties.

At CNA, two AMS systems are currently active. One of them is based on a 200 kV tandem and was specifically designed for ^{14}C detection. The second one uses a 1 MV accelerator and is more complex, being able to detect a wide variety of isotopes: ^{10}Be , ^{36}Cl , ^{26}Al , ^{129}I , Pu isotopes, etc. The use of AMS in our research group permits to face problems that have been traditionally studied through the measurement of radioactivity with more and more powerful tools. Radioactivity is normally present in the environment. It is originated both by natural and artificial processes. Radioactive isotopes are continuously generated in natural processes in the atmosphere, the marine environment and the lithosphere. There are also others that are present in the Earth since its formation. On the other side, it is clear that nuclear artificial activities also release radioactive nuclei to the environment.

Environmental radioactivity is studied in our group with many objectives: evaluation of its impact on the environment and the population, tracing of environmental processes, treatment of nuclear residues, etc. For example, it is possible to get information on the released radioactivity in nuclear accidents to estimate the dispersion in future accidents. Also, radioactive isotopes can trace environmental processes and study the development of marine currents and climate change. Also, the analysis of nuclear residues can help to have a better characterization of them to organize their treatment and long-term storage.

Apart from the applications, our group works also on the development of new methodology for Accelerator Mass Spectrometry.

3.5.1. Determinación de actínidos por AMS / Actinides determination by AMS

Puesta a punto de la instalación de 1 MV de AMS del CNA para la determinación de ^{233}U

El ^{233}U ($T_{1/2} = 0.159$ My) ha despertado mucho interés en los últimos años entre la comunidad científica debido al potencial de la relación isotópica $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ para informar sobre el origen del U antropogénico. El ^{233}U y el ^{236}U ($T_{1/2} = 23,4$ My) se liberaron a escala mundial durante determinadas pruebas termonucleares a cielo abierto en las décadas de 1950 y 1960 (mediante las reacciones $^{235}\text{U}(n, 3n)^{233}\text{U}$ y $^{238}\text{U}(n, 3n)^{236}\text{U}$ por neutrones rápidos). El ^{236}U está también relacionado con los usos civiles de la energía nuclear, por ser el subproducto de la activación neutrónica del ^{235}U . Por lo tanto, la relación $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ informa sobre el origen del U antropogénico. La relación isotópica $^{233}\text{U}/^{238}\text{U}$ esperada en muestras ambientales está en el rango de $10^{-12} - 10^{-6}$. Hasta la fecha, solo unas pocas instalaciones de AMS en el mundo han demostrado su capacidad para abordar la medida de ese rango de cocientes. En el CNA se ha puesto a punto dicha técnica en la instalación de AMS de 1 MV tras un estudio exhaustivo de las condiciones de medida (Chamizo, López-Lora and Christl, 2022). Se han alcanzado fondos para la relación isotópica $^{233}\text{U}/^{238}\text{U}$ del orden de 5×10^{-11} . Los fragmentos moleculares de ^{234}U , ^{235}U y ^{232}Th que se dispersan en la zona de alta energía se han identificado como las principales fuentes de fondo. Por tanto, se hace necesario una eliminación adicional del ^{232}Th durante el procedimiento químico, especialmente en el caso de suelos y sedimentos. Se han analizado las relaciones isotópicas $^{233}\text{U}/^{238}\text{U}$ y $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ en los materiales de referencia del OIEA identificados como Soil-6, 300, 385, 410 y 412. Alícuotas idénticas de las mismas muestras se han medido en el sistema de 600 kV del ETH de Zúrich, a modo de validación de los resultados.

Setting up ^{233}U AMS analysis at the Centro Nacional de Aceleradores.

^{233}U ($T_{1/2} = 0.159$ My) has aroused much interest in the last few years because of the potential of $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ to inform about anthropogenic U sources. ^{233}U was released worldwide during the testing of thermonuclear weapons in the 1950s and 1960s (i.e. through $(n, 3n)$ reactions by fast neutrons on ^{235}U). ^{236}U ($T_{1/2}=23.4$ My), by contrast, was released during to the testing of thermonuclear atomic weapons (i.e. mainly through $(n,3n)$ reactions on ^{238}U) and is also linked to the civil uses of nuclear energy (i.e. it is the neutron activation product of ^{235}U). Thus, the $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ atom ratio depends on the anthropogenic U source terms. To date, only a few AMS facilities in the world have reported ^{233}U results in samples from the general environment. The expected $^{233}\text{U}/^{238}\text{U}$ atom ratios are in the $10-12-10-6$ range. We have demonstrated that $^{233}\text{U}/^{238}\text{U}$ abundance sensitivities at the $5 \times 10-11$ level can be achieved at the 1 MV Accelerator Mass Spectrometry system at the CNA after a thorough adjustment of the measurement parameters. Scattered ^{234}U , ^{235}U and ^{232}Th molecular fragments are identified as the main ^{233}U background contributors. Thus, ^{232}Th needs a further removal during the radiochemical process. $^{233}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ atom ratios have been analysed in the IAEA reference materials coded Soil-6, 300, 385, 410, and 412 at the CNA and at the 600 kV ETH AMS system for intercomparison.

Estudio de la relación isotópica $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ en aguas del Océano Ártico

En este trabajo, abordamos el estudio conjunto de ^{233}U y del ^{236}U en el contexto de la caracterización de masas de aguas en el Océano Ártico. Tanto el ^{233}U como el ^{236}U se introdujeron en el medio ambiente a nivel global durante los ensayos de las pruebas termonucleares atmosféricas realizados en las décadas de 1950 y 1960. El ^{236}U también está relacionado con los usos civiles de la energía nuclear. El Océano Ártico se nutre tanto de aguas de origen Pacífico (a través del estrecho de Bering) y Atlántico (a través del estrecho de Fram y del Mar de Barents). Las aguas del Atlántico transportan la señal tanto de las pruebas nucleares como de los vertidos líquidos de las plantas de reprocesamiento de combustible nuclear de Sellafield (Reino Unido) y La Hague (Francia). Las aguas del Pacífico solo llevan la señal de los ensayos nucleares. El Océano Ártico es una zona muy estratificada en la que las diferentes masas de agua se sitúan en la columna de agua en base a su salinidad, lo que permite caracterizarlas en función de su origen, y estudiar procesos de transporte y mezcla. A través del estudio de 140 muestras de agua de mar tomadas durante la expedición GN01 del proyecto GEOTRACES al Océano Ártico occidental en 2015, demostramos que (Fig. 3.18): i) el uso combinado de la relación isotópica $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ y de la concentración de ^{236}U pueden utilizarse para evaluar la mezcla de masas de agua de origen Pacífico y Atlántico en las aguas superiores del Océano Ártico (aguas polares); ii) las masas de aguas de origen Atlántico están enriquecidas en ^{236}U debido a la influencia de las centrales de reprocesamiento de combustible nuclear europeas, por lo que las relaciones isotópicas $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ son notablemente inferiores; y iii) las masas de aguas más profundas, en las que no se espera la presencia de U de origen antropogénico, exhiben concentraciones extremadamente bajas de ^{233}U y ^{236}U con relaciones isotópicas $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ superiores a las observadas en las masas de agua superiores, lo que se puede explicar teniendo en cuenta la producción natural de ^{233}U y ^{236}U por incidencia de los rayos cósmicos en la superficie de la corteza terrestre. Las medidas se realizaron en el sistema de 1 MV del CNA y en las instalaciones de AMS de 600 kV del ETH de Zürich. La preparación química se llevó a cabo entre el Lamont Doherty Earth Observatory (Universidad de Columbia, Estados Unidos) y el CNA. El trabajo se encuentra publicado en (Chamizo et al., 2022).

Study of the $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ atom ratio in water masses from the Arctic Ocean

In this work, we assess for the first time the potential of the $^{233}\text{U}-^{236}\text{U}$ dual tracer to trace water masses in the Arctic Ocean. Both long-lived manmade U isotopes were introduced worldwide during the open-air testing of nuclear weapons (mainly in the 1950s and 1960s). ^{236}U is also linked to the civil uses of nuclear energy, particularly to the liquid effluents from Sellafield (United Kingdom) and

La Hague (Francia) reprocessing plants (starting in the 1950s). Atlantic Waters flowing into the Arctic Ocean carry both the bomb-tests and the reprocessing plants signals. Pacific Waters entering the Arctic Ocean carry the bomb-tests signal only. Thus, they show different ^{233}U and ^{236}U compositions. Through the study of 120 seawater samples (i.e. including full depth profiles from the Canada and Makarov basins) collected during the GN01 GEOTRACES expedition to the western Arctic Ocean in 2015, we demonstrate that (Fig. 2): i) the $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ ratio and the ^{236}U composition can be used to identify water masses of Pacific and Atlantic origin in the upper waters of the western Arctic Ocean; ii) Deep and Bottom Waters, where an anthropogenic influence is not expected, exhibit extremely low ^{233}U and ^{236}U concentrations but $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ ratios above the ones observed in the upper Arctic Ocean, due to the presence of naturally produced uranium isotopes of lithogenic origin and ; iii) Atlantic Water exhibit an isotopic signature different from surface and deep water masses. This study set the basis for the use of the $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ ratio to distinguish anthropogenic and natural U in the Arctic Ocean and beyond. This work has been the result of a collaborative effort between the Lamont Doherty Earth Observatory (University of Columbia, USA), that carried the sampling of the seawater samples and the first chemical pretreatment of the samples, and the CNA and the ETH Zürich, where the final U extraction and the AMS analysis of ^{233}U and ^{236}U were performed.

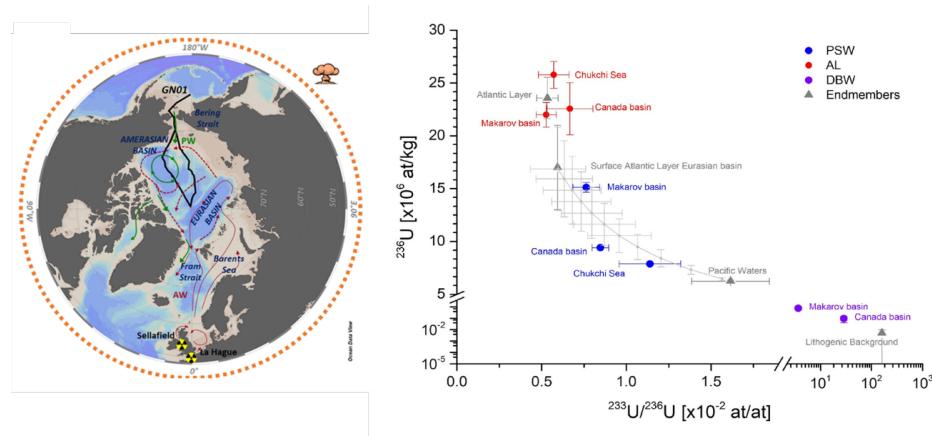


Figura 3.18: Resumen gráfico del trabajo sobre la medida de ^{233}U y ^{236}U en el Océano Ártico Occidental: a la izquierda, situación del transecto donde se tomaron las muestras (código GN01, proyecto GEOTRACES); a la derecha, gráfica que muestra la relación entre la concentración de ^{236}U y la relación isotópica $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ en las diferentes masas de agua que existen en la columna de agua del Océano Ártico (aguas polares (PSW, Polar Surface Waters, en azul), 0-100 m de profundidad; aguas atlánticas (AL, Atlantic Waters, en rojo), 200-400 m de profundidad; aguas profundas (DBW, Deep and Bottom Waters, en morado), por debajo de los 2000 m de profundidad). Figuras tomadas de (Chamizo et al., 2022) / Graphical abstract of the study of ^{232}U and ^{236}U in the western Arctic Ocean: on the left, situation of the GN01 GEOTRACES transect; on the right, plot showing the obtained ^{233}U and ^{236}U results in the different water masses in the Arctic Ocean. Figures taken from (Chamizo et al., 2022).

3.5.2. Determinación de ^{129}I / ^{129}I Measurement

Medida de ^{129}I en testigos de sedimentos marinos del Mar Céltico mediante AMS a través de un proceso de digestión por microondas / ^{129}I in sediment cores from the Celtic Sea by AMS through a microwave digestion process

El impacto de la contaminación radiactiva en los sistemas acuáticos se registra a menudo en los sedimentos. Estos, dependiendo de su comportamiento biogeoquímico, pueden dar información detallada sobre la historia de los vertidos de las fuentes y los procesos ambientales relacionados con el

transporte de los radionucleidos al sedimento. Para radioisótopos de larga vida como el ^{129}I , solo las técnicas de alta sensibilidad como la Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS) son capaces de medir su concentración a niveles ambientales.

Para determinar el ^{129}I en muestras ambientales, se necesita aplicar previamente metodología radioquímica. En el caso concreto de los sedimentos, el yodo puede estar asociado a materia inorgánica u orgánica, y presenta varias formas químicas. Por lo tanto, es necesario un procedimiento diseñado para extraer estas diferentes especies de la matriz, junto con un método radioquímico limpio y que requiera poco tiempo.

En este trabajo, se ha optimizado un método de digestión por microondas para la medida de ^{129}I en sedimentos mediante AMS. Este método está basado en otro publicado previamente en el que se han añadido pasos para optimizar la recuperación del yodo presente en la muestra (Gómez-Guzmán et al., 2010). A través del nuevo método se han analizado dos testigos de sedimentos del Mar Céltico (testigo A y testigo I) para determinar la concentración de yodo-129. Mientras que el testigo I era un sedimento arenoso, el testigo A era fangoso y tenía una alta proporción de materia orgánica. Por esta razón, se adaptó un método convencional de digestión por microondas para una extracción óptima de yodo de la fracción orgánica. El rendimiento de las diferentes opciones consideradas para la extracción de yodo se mostrará en este trabajo. Los resultados muestran concentraciones entre $0,19 \times 10^{12}$ at/kg y $7,16 \times 10^{10}$ at/kg para el testigo A y entre $0,28 \times 10^{12}$ at/kg y $2,40 \times 10^{12}$ at/kg para el testigo I. A pesar de una aparente difusión en las capas profundas, los perfiles de profundidad reprodujeron con muy buena precisión las descargas de Sellafield, permitiendo estimar el tiempo de transporte de las emisiones de Sellafield hasta los puntos de muestreo (unos 6 años) y las tasas de sedimentación en cada uno de los testigos (1,4 y 1,7 cm/año respectivamente).

Este trabajo se ha realizado como colaboración entre investigadores de la Universidad de Sevilla, la Universidad de Perpignan (Francia) y la Universidad de Essex (Reino Unido) y ha sido publicado en Nuclear Instruments and Methods B.

The impact of radioactive contamination on aquatic systems is often recorded in sediments. These, depending on their biogeochemical behavior, can give detailed information on the history of source discharges and environmental processes related to the transport of radionuclides to the sediment. For long-lived radioisotopes such as ^{129}I , only high-sensitivity techniques such as Accelerator Mass Spectrometry (AMS) are capable of measuring their concentration at ambient levels.

To determine ^{129}I in environmental samples, it is necessary to previously apply radiochemical methodology. In the specific case of sediments, iodine can be associated with inorganic or organic matter, and has several chemical forms. Therefore, a procedure designed to extract these different species from the matrix is necessary, along with a clean and time-consuming radiochemical method.

In this work, a microwave digestion method has been optimized for the measurement of ^{129}I in sediments by AMS. This method is based on another previously published method in which steps have been added to optimize the recovery of iodine present in the sample (Gómez-Guzmán et al., 2010). Through the new method, two sediment cores from the Celtic Sea (core A and core I) have been analyzed to determine the concentration of ^{129}I . While core I was a sandy sediment, Core A was muddy and had a high proportion of organic matter. For this reason, the conventional method of microwave digestion was adapted for optimal iodine extraction from the organic fraction. The performance of the different options considered for iodine extraction will be shown in this paper. The results showed concentrations between 0.19×10^{12} at/kg and 7.16×10^{10} at/kg for core A and between 0.28×10^{12} at/kg and 2.40×10^{12} at/kg for core I. Despite an apparent diffusion in the deep layers, the depth profiles reproduced with very good precision the discharges of Sellafield, allowing to estimate the transport time of the Sellafield emissions to the sampling points (about 6 years) and

the sedimentation rates in each of the cores (1.4 and 1.7 cm/year respectively).

This work has been carried out as a collaboration between researchers from the University of Seville, the University of Perpignan (France) and the University of Essex (United Kingdom) and has been published in Nuclear Instruments and Methods B

^{129}I y ^{137}Cs como trazadores duales: del Mar de Japón al Estrecho de Fram / ^{129}I and ^{137}Cs as dual tracers: From Japan Sea to the Fram Strait.

Durante el verano de 2017, el rompehielos chino RV Xuelong navegó desde el Mar de Japón hasta la central nuclear de Fukushima Dai-ichi (FDNPP), el estrecho de Bering y a través del Océano Ártico hasta el estrecho de Fram, para llegar a los mares nórdicos. Se recolectaron muestras en las que se ha medido ^{129}I ($T_{1/2} = 15,7 \times 10^6$ años) y ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,17$ años). Las medidas se realizaron en un total den 61 estaciones de superficie y 23 perfiles en profundidad tanto en el Pacífico Norte como en el Océano Ártico. El ^{129}I fue medido en el CNA de la Universidad de Sevilla por AMS, y ^{137}Cs resultados fueron presentados en (Huang et al., 2020).

Es bien sabido que la mayoría de los ^{129}I descargados por las plantas de reprocesamiento de combustible nuclear (NFRP) de Sellafield y La Hague viajan a través del Mar del Norte, a lo largo de la costa noruega hacia el Ártico. Sin embargo, no hay muchos datos disponibles sobre cómo se transporta este ^{129}I al Océano Pacífico. En el Pacífico, el accidente nuclear de la planta de Fukushima Dai-ichi (FDNPP) liberó al mar cantidades significativas de material radiactivo, incluyendo ^{129}I y ^{137}Cs después del tsunami ocurrido el 11 de marzo de 2011.

En este trabajo hemos utilizado utilizamos ^{129}I y ^{137}Cs como trazadores duales, junto con la relación $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$. El estudio se centra en el estrecho de Bering, donde convergieron las liberaciones de la FDNPP (Pacífico) y las plantas de reprocesamiento del combustible nuclear (NFRP) europeas (Atlántico). Se rastrearon las descargas de la FDNPP a través del Estrecho de Bering hacia el Mar Ártico, mientras que la señal de las NFRP mostró la entrada del Ártico en el Océano Pacífico.

En el mismo trabajo se han actualizado las concentraciones de ^{129}I en las cercanías de Fukushima en 2017 ($9,68 \times 10^6 - 4,83 \times 10^7$ at/kg). Se detectaron concentraciones de ^{129}I y ^{137}Cs por encima de los valores de referencia de fallout global en el transecto desde el Mar de Japón hasta el Estrecho de Bering. Según el análisis de los endmembers (relaciones características entre radioisótopos), estos valores corresponden principalmente a las liberaciones de la FDNPP, pero hay una pequeña contribución de ^{129}I de NFRP en el Mar de Bering, asociada a una pequeña entrada del Ártico en el Océano Pacífico. Esto se confirma por las relaciones $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ de las estaciones en el giro de Beaufort (2,07-41,07) y en el Mar de Chukchi (27,41-567,07).

Este trabajo ha sido realizado como colaboración entre la Universidad de Sevilla y el Laboratory of Marine Isotopic Technology & Environmental Risk Assessment, Xiamen (China).

During the summer of 2017, the Chinese icebreaker RV Xuelong sailed from the Sea of Japan to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (FDNPP), the Bering Strait and across the Arctic Ocean to the Fram Strait, to reach the Nordic seas. Samples were collected in which ^{129}I ($T_{1/2} = 15.7 \times 10^6$ years) and ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.17$ years) were measured. The measurements were made at a total of 61 surface stations and 23 depth profiles in both the North Pacific and the Arctic Ocean. The ^{129}I was measured in the CNA of the University of Seville by AMS, and ^{137}Cs results were presented in (Huang et al., 2020).

It is well known that most of the ^{129}I discharged by the Sellafield and La Hague nuclear fuel re-

processing plants (NFRP) travels across the North Sea, along the Norwegian coast to the Arctic. However, there is not much data available on how this ^{129}I is transported to the Pacific Ocean. In the Pacific, the nuclear accident at the Fukushima Dai-ichi plant (FDNPP) released significant amounts of radioactive material, including ^{129}I and ^{137}Cs into the sea, after the tsunami on March 11, 2011.

In this work we have used ^{129}I and ^{137}Cs as dual tracers, along with the ratio $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$. The study focuses on the Bering Strait, where releases from FDNPP (Pacific) and European (Atlantic) nuclear fuel reprocessing plants (NFRP) converged. FDNPP discharges were tracked through the Bering Strait into the Arctic Sea, while the NFRP signal showed the Arctic water entering the Pacific Ocean.

In the same work, the concentrations of ^{129}I in the vicinity of Fukushima in 2017 have been updated ($9.68 \times 10^6 - 4.83 \times 10^7 \text{ at/kg}$). Concentrations of ^{129}I and ^{137}Cs above the global fallout reference values were detected in the transect from the Sea of Japan to the Bering Strait. According to the analysis of endmembers (characteristic relationships between radioisotopes), these values correspond mainly to releases of FDNPP, but there is a small contribution of ^{129}I of NFRP in the Bering Sea, associated with a small Arctic inflow into the Pacific Ocean. This is confirmed by the $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ ratios of the stations at the Beaufort Turn (2.07-41.07) and at the Chukchi Sea (27.41-567.07).

This work has been carried out as a collaboration between the University of Seville and the Laboratory of Marine Isotopic Technology & Environmental Risk Assessment, Xiamen (China).

^{129}I AMS measurement is systematically affected by the instrumental background, this is complex to determine, and it is mainly due to two factors: the cross contamination that occurs at the source level and other isotopes different than the nucleus of interest that can be able to reach the detector. In samples with very low concentration of ^{129}I , this background is especially critical, it has been observed that some of these samples with low ^{127}I current levels present abnormally high isotopic ratios. However, the measured isotopic ratios and the ^{127}I current of the samples must be independent variables. The fact that we only can observe this phenomenon in samples with very low amount of ^{129}I , beside with the verification that some ^{129}I nuclei have been quantified in cathodes containing only Niobium, it indicates that the extra contribution of ^{129}I counts clearly comes from the crossover contamination at the source.

To solve these problems, a new data analysis method has been proposed. In this method an extra step is added, it consists of a correction based on the fixed number of counts corresponding to those produced by cross contamination at the source. Applying this system, the resulting data are closer to the average value (Figure 3.12), showing an independence between current and ratio, which indicates that the effect of crossover contamination has been reduced.

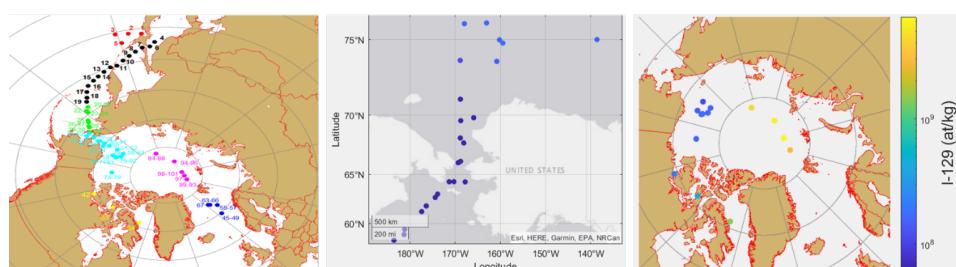


Figura 3.19: Puntos de muestreo y concentraciones superficiales de ^{129}I obtenidas en el Mar de Bering y el Océano Ártico / Sampling points and surface concentrations of ^{129}I obtained in the Bering Sea and the Arctic Ocean.

^{129}I gaseoso y asociado a aerosoles en la atmósfera de Sevilla (España) / Atmospheric gaseous and particulate ^{129}I in Seville (Spain)

El origen del ^{129}I atmosférico en el hemisferio norte está, hoy en día, claramente vinculado a las emisiones de las plantas de reprocesamiento de combustible nuclear (NFRP) de Sellafield y La Hague. Es bien sabido que estas plantas han liberado altas cantidades de ^{129}I tanto en forma líquida como gaseosa. La mayor parte de las descargas líquidas viajan desde ambas plantas al Mar del Norte y luego al Ártico a lo largo de la costa noruega. Sin embargo, el impacto de las descargas líquidas de ^{129}I ya es evidente en todo el Océano Atlántico Norte. Por otro lado, las descargas gaseosas, aunque mucho más bajas que las líquidas, se distribuyen rápidamente por el hemisferio norte.

En los últimos años, ha habido una discusión sobre el origen del ^{129}I atmosférico en Europa. Los últimos estudios realizados en el norte de Europa parecen demostrar que la formación de aerosol marino es el principal responsable del ^{129}I en aerosoles, como se muestra, por ejemplo, en Dinamarca (Zhang et al., 2016). En este trabajo, las relaciones $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ concuerdan bien con las medidas recientemente en el Mar del Norte. Esta y otras pruebas muestran que la superficie del Mar del Norte es responsable de la presencia de ^{129}I en los aerosoles daneses. Este resultado es compatible con los resultados anteriores obtenidos para el norte y centro de Europa.

En este trabajo, presentamos resultados semanales para las concentraciones de ^{129}I y las relaciones $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ medidas en el aire de Sevilla (España) durante el año 2013. Ambas magnitudes se determinaron independientemente mediante AMS en el CNA en filtros de polipropileno para determinarlas en yodo asociado a partículas en suspensión. Además, se midieron concentraciones de ^{129}I en filtros de carbón, que dan información sobre el yodo gaseoso. Los resultados muestran que la presencia de ^{129}I en la forma gaseosa es mucho más importante que la forma de partículas. Las concentraciones de ^{129}I asociado a partículas son típicamente del orden de 104 at/m³, mientras que las concentraciones gaseosas de ^{129}I son al menos un orden de magnitud más altas. Las relaciones $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ en yodo tanto gaseoso como asociado a partículas son del orden de 10^{-9} - 10^{-8} , aunque los valores medios son ligeramente mayores en yodo asociado a partículas. El origen de este ^{129}I no está asociado a la evaporación de la superficie marina como en el norte de Europa, sino que está influido por las emisiones directas de las NFRP, especialmente La Hague. Se ha demostrado recientemente que el agua superficial del Atlántico Norte en latitudes medias presenta relaciones isotópicas de 10^{-10} a bajas 10^{-8} (Vivo-Vilches et al., 2018), ligeramente inferiores a las medidas en nuestro trabajo. Sin embargo, no hay una correlación clara entre el origen del viento occidental en Sevilla durante los períodos de alta concentración de ^{129}I , y sí con el viento procedente de La Hague.

The origin of atmospheric ^{129}I in the Northern Hemisphere is, today, clearly linked to emissions from the Sellafield and La Hague nuclear fuel reprocessing (NFRP) plants. It is well known that these plants have released high amounts of ^{129}I in both liquid and gaseous form. Most of the liquid discharges travel from both plants to the North Sea and then to the Arctic along the Norwegian coast. However, the impact of liquid discharges of ^{129}I is already evident throughout the North Atlantic Ocean. On the other hand, gaseous discharges, although much lower than liquid discharges, are rapidly distributed throughout the northern hemisphere.

In recent years, there has been a discussion about the origin of atmospheric ^{129}I in Europe. The latest studies carried out in northern Europe seem to show that the formation of marine aerosol is mainly responsible for ^{129}I in aerosols, as shown, for example, in Denmark (Zhang et al., 2016). In this paper, the $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratios are well consistent with recent measures in the North Sea. This and other evidence show that the surface of the North Sea is responsible for the presence of ^{129}I in Danish aerosols. This result is compatible with the previous results obtained for northern and central Europe.

In this work, we have analyzed the concentrations of ^{129}I and the $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratios measured in

the air of Seville (Spain) during the year 2013. Both magnitudes were determined independently by AMS in the CNA in polypropylene filters to determine them in iodine associated with suspended particles. In addition, concentrations of ^{129}I were measured in carbon filters, which give information about gaseous iodine. The results show that the presence of ^{129}I in the gaseous form is much more important than the particle form. Particle-associated concentrations of ^{129}I are typically on the order of 104 at/m³, while gaseous concentrations of ^{129}I are at least an order of magnitude higher. The ratios $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ in both gaseous and particle-associated iodine are of the order of 10-9-10-8, although the mean values are slightly higher in particle-associated iodine. The origin of this ^{129}I is not associated with evaporation from the sea surface as in northern Europe, but is influenced by direct emissions from NFRP, especially La Hague. North Atlantic surface water in mid-latitudes has recently been shown to exhibit isotopic ratios of 10-10 to low 10-8 (Vivo-Vilches et al., 2018), slightly lower than those measured in our work. However, there is no clear correlation between the origin of the western wind in Seville during the periods of high concentration of ^{129}I , but with the wind coming from La Hague.

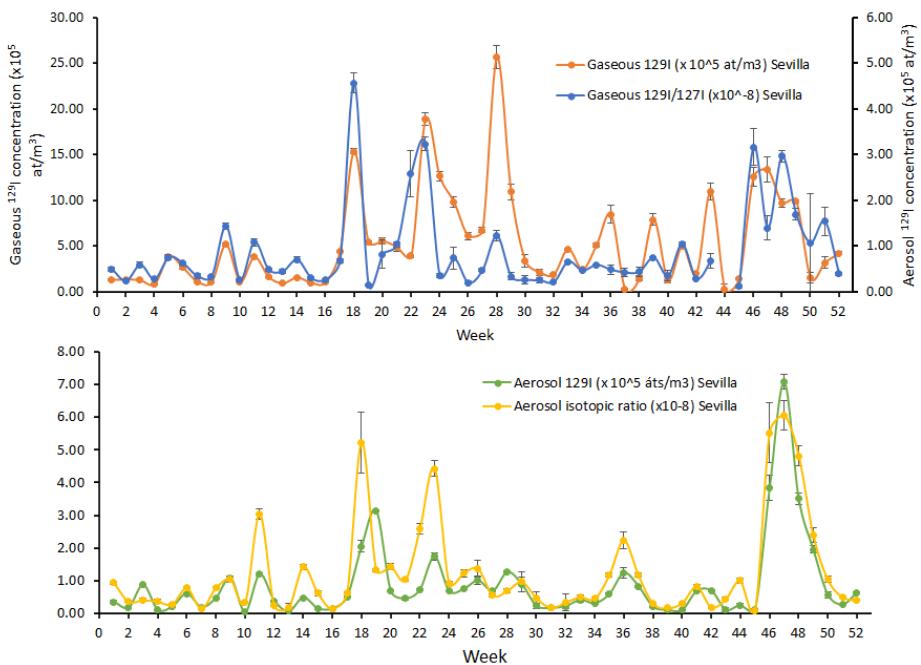


Figura 3.20: Evolución semanal de la concentración de ^{129}I y el cociente isotópico $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ en la atmósfera en Sevilla (España) durante el año 2013 / Weekly evolution of the ^{129}I concentration and the $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ isotopic ratio in the atmosphere in Seville (Spain) during the year 2013.

3.5.3. Medida de ^{14}C / ^{14}C measurements

Durante los años 2021 y 2022 el servicio de datación ha continuado su labor de apoyo a múltiples instituciones. A finales de 2022 el número de dataciones realizadas desde su inauguración es de más de 5100, de las cuales alrededor del 50 % son aplicaciones arqueológicas, y casi un 40 % para aplicaciones medioambientales. Aunque sean estas aplicaciones las que aportan mayor número de muestras, no se le debe quitar importancia al beneficio que obtienen otras aplicaciones como los estudios artísticos, las redes de control radiológico, o estudios forenses.

Se trata por tanto de un servicio consolidado y que supone un gran beneficio para muchos usuarios externos, base de la instalación. Dentro de los usuarios, es destacable la presencia del CSIC (con sus diferentes institutos y centros), al que históricamente le corresponden aproximadamente el 32 % de las dataciones realizadas. Muy relevante es también la Universidad de Sevilla como usuaria, con un 22 % de las dataciones, comparable al resto de las universidades españolas, con un 23 % de dataciones.

Otros centros de investigación, organismos oficiales, y particulares y empresas, conforman el amplio entramado de usuarios que utilizan y se benefician de las instalaciones.

En este bienio se ha dado un impulso importante a un proyecto de investigación sobre el que ya se trabajó en años anteriores. Se trata de explorar la posibilidad de determinar ^{14}C en muestras líquidas, en concreto en los carbonatos disueltos en soluciones acuosas. Se trata de un tipo de muestra compleja, que habitualmente se ataca mediante la disolución directa del carbonato disuelto en la solución. Sin embargo, esto requiere una instrumentación compleja, y una posible alternativa es la precipitación del carbonato en disolución, para posteriormente tratarlo como un carbonato sólido.

En el trabajo ya realizado se han explorado varios de los parámetros que afectan al proceso de precipitado, como son el pH, la sal precipitadora, y el agente alcalinizante, todo ello buscando el mayor rendimiento, y por supuesto, la menor contaminación, lo que se consigue, en parte, trabajando en atmósfera inerte. A día de hoy se sigue trabajando en el procedimiento, que esperamos pueda ser aplicado a campos de investigación ambientales y de gestión de residuos nucleares.

During years 2021 and 2022 the radiocarbon dating service has continued its support work for many different institutions. By the end of 2022, the number of radiocarbon datings provided since the inauguration exceeds 5100, from which about 50 % are related to archaeological studies, and almost 40 % to environmental applications. Although these two are the applications with a higher number of datings, some other applications also benefit from the service, such as artistic studies, radiological control, or forensic applications.

It is a consolidated service, which offers a great benefit for many external users, which are the basis of the service. Among the users, it is remarkable the presence of CSIC (with many different institutes and centres), which is responsible of about 32 % of the datings obtained so far. The University of Seville too has been historically very present, with 22 % of the datings, which is comparable to the sum of the datings provided to the rest of the Universities in Spain, 23 %. Other research centres, official organisms, companies, and particulars, they are all part of the web of users that use and benefit from the installations at CNA.

FDuring this biennium a big impulse has been given to an already existing research project. The idea is to explore the possibility of measuring C14 in a certain kind of liquid samples, more specifically in the dissolved carbonates of aqueous solutions. This is a complex kind of samples, that is usually treated by direct acid dissolution of the carbonates in the solution. But this is a method that requires complex instrumentation, and a possible alternative is the precipitation of carbonates in the solution, to treat them afterwards as a solid carbonate sample.

Several key parameters affecting the precipitation process have already been studied, such as the precipitation salt, the alkalinizer, and the pH of the process, with the objective of maximizing the precipitation yield, and of course, minimize the contamination, which is partly achieved by working under inert atmosphere. We are still working on the development of the procedure, which we expect can be applied to environmental studies and nuclear residues management processes.

CNA y Sociedad/ CNA and Society

Capítulo 4

CNA y Sociedad/ CNA and Society.

4.1. El CNA y la Salud/ CNA and Health.

La vinculación entre CNA y salud es muy diversa. En el acelerador ciclotrón del CNA se producen radiofármacos necesarios para la técnica de imagen PET (tomografía por emisión de positrones). Estos radiofármacos se producen y se distribuyen por todo el Sur de España en colaboración con la empresa Curium. Por otro lado, el CNA dispone de un tomógrafo PET, del que se benefician pacientes del Servicio Andaluz de Salud, para el diagnóstico precoz del cáncer y otras patologías.

En el CNA se desarrollan por otra parte experimentos de radiobiología, en los que se estudia el efecto de la irradiación con haces de protones sobre cultivos celulares. El fin último de estos estudios es poder optimizar el tratamiento del cáncer mediante protonterapia. La protonterapia trata los tumores mediante haces de protones, depositando su energía de forma mucho más localizada, y por lo tanto con mucho más eficacia que la radioterapia convencional, a la vez que produce menores efectos secundarios.

Finalmente indicaremos que en el centro se desarrolla una línea de investigación muy consolidada dedicada al estudio de la criopreservación de órganos utilizando equipos de imagen médica.

The cyclotron at CNA produces radiopharmaceuticals required for PET imaging technique (Positron Emission Tomography). These radiopharmaceuticals are produced and distributed in collaboration with the Curium Company. CNA has also a PET-CT scanner, used to diagnose cancer and other pathologies to patients of the Andalusian Health Service.

Radiobiology experiments are also carried out at CNA to study the effect of proton beam irradiation on cellular cultures. The ultimate goal of this research is to optimize the treatment of cancer through proton therapy. Proton therapy treats tumors by proton beams, which deposit their energy much more localized than conventional radiotherapy, producing less secondary effects.

Finally, it is interesting to indicate that in the center there is a consolidated research line devoted to the cryopreservation of organs using medical image equipment.

4.2. El CNA y el Medio Ambiente/ CNA and Environment.

En el CNA se vienen realizando variadas investigaciones enfocadas en la caracterización de residuos radiactivos en colaboración con la empresa ENRESA (Empresa Nacional de Residuos S.A.) para mejorar su clasificación en los procesos de desmantelamiento de centrales nucleares. Para esta caracterización es necesario proceder a la evaluación del nivel de presencia de determinados elementos

radiactivos mediante la técnica de Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS), técnica que se puede aplicar únicamente en el CNA dentro del territorio español. No hay técnica alternativa que proporcione la sensibilidad y cobertura que da la técnica AMS en la caracterización de esos residuos.

Mediante la utilización de la espectrometría de masas con acelerador, el CNA ha desarrollado también numerosos proyectos de investigación medioambientales centrados en la determinación de cantidades trazas de radionucleidos artificiales bien para evaluar la contaminación existente en algunos compartimentos ambientales o bien usando a los radionucleidos como trazadores de procesos ambientales. En particular, el CNA posee una muy elevada reputación a nivel internacional en la aplicación de estudios de AMS en Oceanografía, siendo reconocido desde 2013 oficialmente como Centro colaborador de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA) en la aplicación de la técnica AMS a estudios marinos.

Dentro de las contribuciones del CNA a la sociedad cabe destacar que el CNA consta como entidad colaboradora del Plan de Acción Español Contra el Tráfico Ilegal y el Furtivismo Internacional de Especies Silvestres (Plan TIFIES). En el marco del proyecto el CNA ha llevado a cabo dataciones de marfiles de especies en peligro de extinción en la lucha contra el tráfico ilegal. El CNA también ha utilizado la medida de C-14 como técnica forense para analitzar posibles fraudes en biodiesel utilizando diesel mineral.

CNA carries out research on radioactive residues in collaboration with the Company ENRESA to improve its classification in the dismantling process of nuclear power stations. For this characterization it is necessary the evaluation of the levels of several long-lived radionuclides through accelerator mass spectrometry (AMS), technique that can be applied in our country only in CNA. There is no alternative technique with the coverage and sensitivity of the AMS technique for the characterization of radionuclide residues.

Through the use of AMS, the CNA has carried out also several environmental research projects centered in the determination of minute amounts of artificial radionuclides. These determinations are carried out either to evaluate the contamination present in some environmental compartments or with the objective of using the radionuclides as tracers of environmental processes. In particular, CAN has a very high international reputation in AMS studies in Oceanography, being recognized since 2013 as an official collaborating center of the IAEA in the application of the AMS technique in marine studies.

Among the contributions of the CNA to society, it should be noted that the CNA is a collaborating entity of the Spanish Action Plan Against Illegal Traffic and International Poaching of Wild Species (TIFIES Plan). Within the framework of the project, the CNA has carried out dating of ivories of endangered species in the fight against illegal trafficking.

4.3. El CNA y el Patrimonio Cultural/ CNA and Cultural Heritage.

El CNA tiene los dos únicos aceleradores en España en los que se aplica la técnica de espectrometría de masas por aceleradores para realizar el fechado por Carbono-14. Se pueden datar muestras geológicas, arqueológicas, artísticas y del patrimonio histórico en general, utilizando una fracción mínima (miligramos) de la muestra en cuestión. Esto ha permitido por ejemplo fechar manuscritos incunables, esculturas, huesos de yacimientos arqueológicos y otras muestras de interés histórico y arqueológico.

Usando por otra parte los aceleradores de partículas, se pueden determinar, de forma no destruc-

tiva y con alta precisión, los elementos que componen objetos de orfebrería, cerámicas, pinturas y otros objetos de interés histórico y artístico. El conocimiento de la composición elemental, sin alterar ni dañar la muestra de interés, permite a los arqueólogos obtener información que permita determinar la procedencia de los distintos objetos arqueológicos. La información generada se complementa con la generada mediante fluorescencia de rayos X

CNA has the only two accelerators in Spain applying AMS (accelerator mass spectrometry) to perform carbon-14 dating. It allows dating geologic, archeologic, artistic and cultural heritage samples, using a minute fraction (milligrams) of the sample. This has been applied to date old books, mummies, bones, sculptures, ice from the Artic and other samples.

Using particle accelerators, on the other hand, the elements that make up metalwork objects, ceramics, paintings and other objects of historical and artistic interest can be determined, non-destructively and with high precision. Knowledge of the elemental composition, without altering or damaging the sample of interest, allows archaeologists to obtain information that allows them to determine the origin of the different archaeological objects. The information generated is complemented by that generated by X-ray fluorescence

4.4. El CNA y la Empresa/ CNA and Business.

El CNA como centro abierto a la sociedad, mantiene colaboraciones estables con diversas empresas. Así, la empresa Curium opera el ciclotrón del CNA para la producción de radiofármacos, y los comercializa. La empresa ALTER Technology utiliza el irradiador de 60Co para la realización de ensayos de componentes aeroespaciales. La empresa ENRESA recurre a servicios de caracterización de residuos radiactivos y las empresas AVS y ATI, colaboran con el CNA para el desarrollo de instrumentación científica. Instituciones como el Consejo de Seguridad Nuclear y la Dirección General de la Guardia Civil también recurren al CNA para la realización de medidas ultrasensibles de radioisótopos en el medio ambiente (CSN) y para medidas y dataciones de C-14 con fines forenses (GC).

El CNA está localizado en el Parque Científico y Tecnológico Cartuja, y participa en las iniciativas del parque y del círculo de empresarios para incrementar la colaboración con las empresas. El CNA participa regularmente en el foro TRANSFIERE, localizado en Málaga, y colabora con la asociación INEUSTAR de industria de la ciencia. El CNA, como instalación Científico-Técnica Singular, está abierto a la colaboración con las empresas, tanto como cliente de la industria de la ciencia, como proveedor de servicios con certificaciones de calidad, o como colaborador estratégico de cara a la participación en grandes proyectos nacionales e internacionales, algunos ejemplos de ellos son TRAD, Airbus, Alter, Tragsatec, Enresa, spacelab Inta, Cesi spa, Everis, Icac SL, Grupo Ceperic, Anecoop, Geotecnia y cimientos, Proyectos y rehabilitaciones Kalam, Arquimea Ingeniería SL entre otras.

CNA maintains stable collaborations with different companies. Curium operates the CNA cyclotron to produce and commercialize radiopharmaceuticals. ALTER uses the Co- 60 irradiator to test aerospace components. ENRESA obtains radioactive element measurements and AVS and ATI collaborate with CNA for the development of scientific instrumentation. Institutions such as Nuclear Security Council (CSN) and the Directorate General of Guardia Civil use CNA for the performance of ultra-sensitive measurements of radionuclides in the environment (CSN) and for C-14 dating with forensics objectives (Guardia Civil).

CNA is placed in Cartuja Scientific and Technological Park, and participates in the initiatives of the park and its entrepreneur circle, to enhance the collaboration with companies. CNA participate actively in the TRANSFIERE forum, and collaborates with the association INEUSTAR of the industry of science.

CNA, as a singular scientific and technical infrastructure, is open to collaboration with companies, as a client of the industry of science, as a provider of quality certified services, and as a strategic partner for large national and international projects. Some examples are TRAD, Airbus, Alter, Tragsatec, Enresa, spacelab Inta, Cesi spa, Everis, Icac SL, Grupo Ceperic, Anecoop, Geotecnica y cimientos, Proyectos y rehabilitaciones Kalam, Arquimea Ingenieria SL...

Cultura Científica/ Outreach

Capítulo 5

Cultura Científica/ Outreach.

5.1. Presentación/ Presentation.

El año 2001 fue el punto de partida para el programa de Divulgación Científica del Centro Nacional de Aceleradores.

Desde entonces, el CNA tiene diseñado como una de sus líneas estratégicas, un programa de Cultura Científica que comprende diversas acciones divulgativas y de comunicación científica en el ámbito de la Física y sus aplicaciones a los Aceleradores de Partículas y la Física Atómica y Nuclear.

Nuestro público objetivo de las acciones son estudiantes de Secundaria, Bachiller, Formación Profesional dentro de la línea Sanitaria, así como estudiantes universitarios y público general.

Los objetivos estratégicos de la Unidad de Cultura Científica y de la Innovación del CNA, UCC+i, son:

- Diseminar la contribución que los Aceleradores de Partículas han aportado a la Ciencia Básica y Aplicada a lo largo de su historia.
- Demostrar la utilidad de los Aceleradores en la resolución de problemas de distinto ámbito científico útiles incluso para la vida cotidiana.
- Contribuir en el ámbito específico de los Aceleradores de Partículas a diseminar en la Sociedad la idea de que la apuesta por la ciencia tiene carácter estratégico para el ser humano.
- Contribuir en el ámbito específico de los Aceleradores de Partículas a la formación científica de la comunidad, necesaria en una Sociedad en la que, cada vez más, la Ciencia, incluso la más lejana a nuestra experiencia diaria, está presente en la vida cotidiana.

The Outreach Programme of the National Centre of Accelerators is working since 2001.

This Scientific Culture Programme is a strategic line for CNA. The different actions carried out are educational activities and scientific communication in the field of Physics and its applications to Particle Accelerators and Atomic and Nuclear Physics.

Our visitors are mainly Secondary and High School, job training of the Sanitary Line students and Universities.

The main objectives of the Scientific and Innovation Culture Unit:

- To illustrate the historical contribution of Particle Accelerators to basic and applied Science.

- To show how Particle Accelerators have helped in the resolution of scientific problems and their applications to daily life.
- To explain the strategic importance of Particle Accelerators.
- To promote scientific knowledge, within the Particle Accelerators field. This is essential in our modern society, where science is particularly involved in daily life.

5.2. Actividades/ Activities.

Las acciones divulgativas que se llevan a cabo en el CNA son las siguientes:

Programa anual de visitas guiadas al CNA “Visítanos y Conciénciate”. Con carácter semanal y durante todo el año académico, los miembros de la Unidad de Cultura Científica y de Innovación del CNA muestran los distintos aceleradores de que disponemos en el CNA: Acelerador Tándem Van de Graaff de 3 MV, Ciclotrón, un sistema AMS de baja energía (1 MV), sistema ultracompacto para datación por ^{14}C llamado MiCaDaS, así como la sala PET/TAC de humanos y la sala del microPET y microCT de investigación preclínica. La actividad consta de la visita a los distintos aceleradores, laboratorios y otras instalaciones del CNA, la charla “Investigación en el CNA” y por último, se desarrolla el Taller de Estructura de la Materia, Óptica y Electromagnetismo “Experimenta con nosotros”.

Jornadas de puertas abiertas de la Semana de la Ciencia “Acelera y Conócenos”. Con motivo de la Semana de la Ciencia, el CNA celebra en el mes de noviembre la actividad “Acelera y Conócenos”, desde sus inicios en el año 2001, consistente en unas jornadas de puertas abiertas donde todo el público puede, mediante reserva previa, visitar nuestro Centro y conocer un poco más de cerca el mundo de los Aceleradores de Partículas.

Exposición “Aceleradores para la Vida, la Ciencia y la Tecnología” (CNA). Con el fin de dar continuidad a la exposición inaugurada en el Parque de las Ciencias de Granada en 2011, se montó dicha exposición en el CNA, con motivo de la Semana de la Ciencia de noviembre del 2012.

Dado el gran éxito de la exposición entre el público asistente a la misma, la muestra ha quedado instalada con carácter fijo en las instalaciones del Centro Nacional de Aceleradores.

Los elementos fundamentales de esta muestra son la Tecnología con la presentación de elementos tan característicos de los aceleradores como son detectores de partículas, bombas de vacío, medidores de vacío o la Sala de Control del Acelerador Tándem de 3 MV.

Asimismo, también cobra especial importancia en esta exposición la presentación de la investigación desarrollada en el CNA y la interacción con el público a través de simples experimentos y simulaciones donde el asistente podrá conocer el funcionamiento de determinadas partes de los aceleradores del CNA.

Feria de la Ciencia de Sevilla “Acelerando la Ciencia”. El CNA participa, desde la primera feria de la Ciencia en el año 2003, con un stand en la Feria de la Ciencia. Ésta se lleva a cabo todos los años en el mes de mayo en Sevilla.

Nuestro centro participa en la feria con la exposición “Acelerando la Ciencia” consistente en videos, presentaciones y experimentos. En definitiva, muestra la Ciencia e Investigación desarrollada en el CNA al público en general.

Página Web de Divulgación Científica. También se incluye en nuestro proyecto de divulgación la realización de una página web dirigida a niños y jóvenes, cuyo objetivo es presentar de forma amena y didáctica los fundamentos y aplicaciones de la investigación con Aceleradores de Partículas y la Física Atómica y Nuclear, <http://institucional.us.es/uccicna/>

Social Media “Redescna”. Uno de los objetivos del CNA, a nivel divulgativo, es el de acercar la investigación que se desarrolla en el centro a través de distintas redes sociales, tales como G+, Prenser, Facebook, Twitter, Instagram, Flicker o CANALCNA en YouTube.

Comunicación de la investigación. En los últimos años, se ha dado desde el Centro Nacional de Aceleradores un impulso a la comunicación de la investigación desarrollada en el Centro y por sus investigadores mediante notas de prensa con difusión en medios locales, autonómicos y nacionales.

The outreach activities carried out in the center are:

Programme of annual visits “Visítanos y Conciénciate”. Weekly, the Outreach group shows the different CNA accelerators: 3 MV Tandem Accelerator, Cyclotron with 18 MeV protons and 9 MeV deuterons, an AMS low energy system (1 MV), MiCaDaS (Mini radioCarbon Dating System), scanner PET/CT and microPET and microCT laboratory. In this activity, the visitants go to the differents facilities of CNA. Also it is given the conference “Research at CNA” and the experimental workshop “Experiment with us”.

Open doors during Science Week “Acelera y Conócenos”. Since 2001, CNA carries out the activity “Acelera y Conócenos”. During Science Week, which is held annually in November, our center carries out open conferences where anyone, who wants to learn a little more about the world of particle accelerators, can visit us.

Sevilla Science Fair “Acelerando la Ciencia”. CNA participates with a stand at the Science Fair which takes place every year in May since 2003. Our center participates in the fair exposing videos, presentations, doing experiments, in order to approach science to young people.

Exhibition “Aceleradores para la Vida, la Ciencia y la Tecnología” (CNA). CNA set up the exhibition in its hall with the aim to continue the exhibition of Granada “Partículas para la Vida, la Ciencia y la Tecnología” in 2011.

This exhibition started in November with the Science Week. Due to the success of the exhibition, CNA has installed the exhibition with immovable character for the visits from all persons who are interested.

The elements of this show are the technology with the introduction of characteristic elements such as accelerators, particle detectors, vacuum pumps, vacuum gauges or Control Room of 3 MV Tandem Accelerator. Also it is particularly important in this exhibition the research developed in the CNA. The visitors interact through simple experiments and simulations where the public can learn how certain parts of the accelerators of CNA work.

CNA Outreach website. The outreach program has a website devoted to children and young people, to show research with Particle Accelerators and Atomic and Nuclear Physics, <http://institucional.us.es/>

Social networks. The different activities of CNA are shown in the social networks such as Xing, Linkedin, G+, Prenser, Facebook, Twitter, Instagram, Flicker or CANALCNA in YouTube.

Research Communication. In recent years, there has been from the Centro Nacional de Aceleradores boost the communication of research carried out at the Centre and for its researchers through

press notes to local, regional and national media diffusion.

5.3. Impacto de Actividades/ Activities Impact.

5.3.1. Visitantes de las instalaciones por año/ Annual visitors



Figura 5.1: En esta gráfica podemos encontrar el número de visitantes recibidos en el transcurso de los años.

5.3.2. Procedencia de los centros visitantes/ Origin of visitant centers

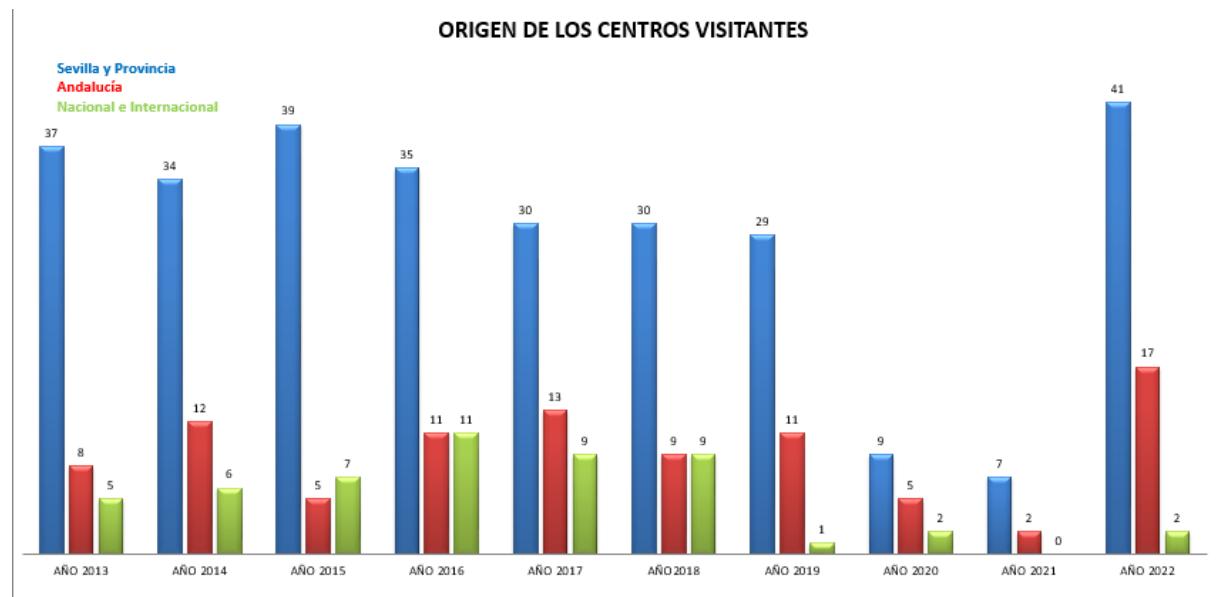


Figura 5.2: En esta gráfica podemos encontrar la procedencia de los distintos visitantes al centro. Cabría destacar y como se puede comprobar en la gráfica siempre hay una mayor presencia de centros tanto sevillanos como andaluces.

5.3.3. Visitantes a exposiciones y ferias / Visitants of exhibitions

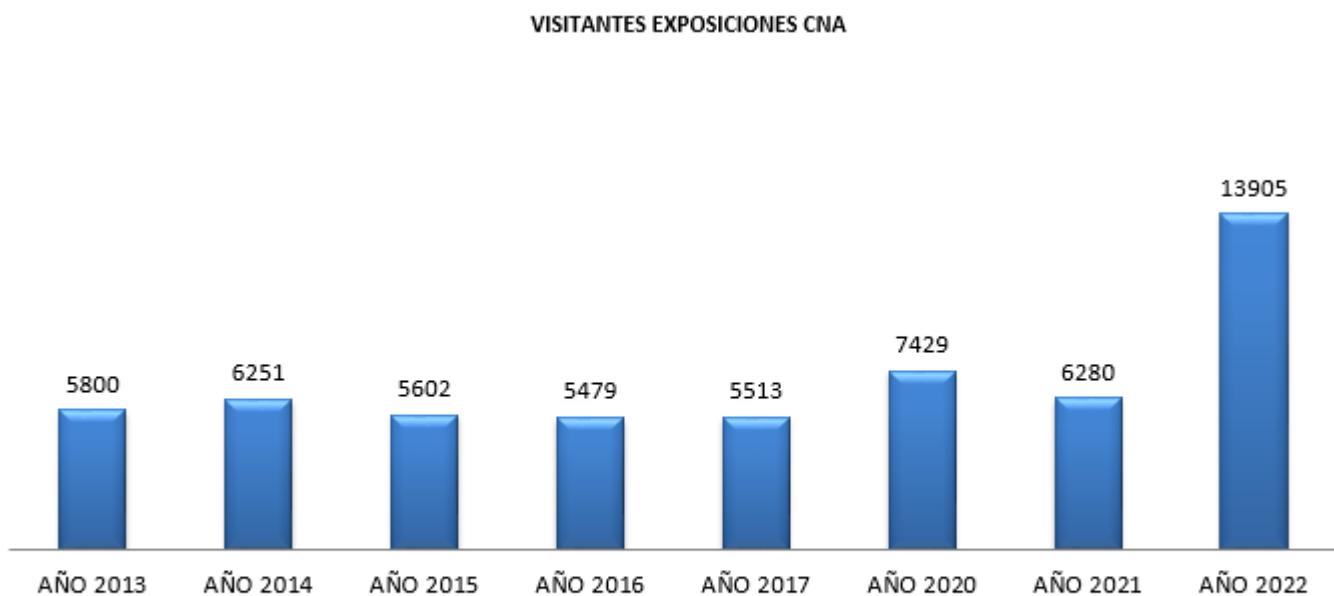


Figura 5.3: En esta gráfica podemos apreciar el número de visitantes totales que recibe el centro tanto a nivel de exposiciones como de ferias. En esta gráfica cabría destacar dos puntos. El primero es la falta de datos de los años 2018 y 2019 que por motivos ajenos al Centro no pudimos acceder a los datos aunque se estima que la afluencia de visitantes de estos dos años ronda las 5000 personas.

Producción Científica/ Scientific Production.

Capítulo 6

Producción Científica/ Scientific Production.

6.1. Participación en Proyectos, Convenios y Contratos/ Research Projects, Agreements and Contracts.

6.1.1. Proyectos Internacionales

- “Coordinated Research project on radionuclide transfer factors in Arid Environments”
IAEA, Universidad de Sevilla y 20 más
Rafael García-Tenorio
01/01/2021-31/12/2024
- “Recyclable Materials Development at Analytical Research Infrastructures (ReMade-at-ARI)”
Comisión Europea. Horizonte 2020.
Rafael García-Tenorio.
01/01/2022-31/12/2025.
- “WPSA: Preparation and Exploitation of JT-60SA”
CFP-IPH-Awp19-SA-05-CIEMAT-01.
Comisión Europea. Horizonte 2020.
Manuel García Muñoz y Juan Manuel Ayllón Guerola.
01/01/2019-31/12/2022.
- “Accelerator and Research Reactor Infrastructures for Education and Learning” – ARIEL.
H2020-847594.
Comisión Europea. Proyecto Ayuda Horizonte 2020.
Carlos Guerrero Sánchez.
01/09/2019-31/08/2023.
- “Supplyng Accurate Nuclear Data for Energy and non-energy Applications” – SANDA.
H2020-847552.
Comisión Europea. Ayuda Horizonte 2020.
Carlos Guerrero Sánchez.
01/09/2019-31/08/2023.

- “RADiation facility Network for the EXploration of effects for indusTry and Research”.
101008126.
Comisión Europea. Yolanda Morilla García.
01/06/2021-01/06/2024.

6.1.2. Proyectos Nacionales y Autonómicos

- “Hermorrage Outcome Predictor”.
CI19-00068.
Obra Social Fundación La Caixa.
Marcin Balcerzyk
01/04/2020-31/12/2021.
- “Desarrollo del Laboratorio de Estudios Avanzados de DEtectores de Radiación. LEADER”.
US-1380791
Junta de Andalucía (Consejería de Economía, Conocimiento, Empresas y Universidad)
María del Carmen Jiménez Ramos y Javier García López.
01/01/2022-31/12/2022.
- “Impacto del flujo de cizalladura en el transporte de partículas en plasmas de fusión confinados magnéticamente”.
PID2020-116822RB-I00
Ministerio de Ciencia e Innovación
Eleonora Viezzer.
01/09/202-31/08/2024.
- “Desarrollo de procedimientos de actuación de los laboratorios de laRed de Vigilancia Radiológica Ambiental del CSN en situaciones especiales”.
Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)
Rafael García-Tenorio
01/01/2021-31/12/2023
- “Graphene-enhanced radiatin detector on silicon carbide for hash environment (GRACE)”.
RTC-2017-6369-3.
Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad.
María del Carmen Jiménez Ramos y Javier García López.
01/01/2018-31/12/2021.
- “La Consolidación de las sociedades Neolíticas en el Mediterraneo Central. El Asentamiento Lacustre de la Marmotta (Roma, Italia)”.
201918010.
Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.CSIC
Juan Francisco Gibaja
01/01/2020-31/12/2021.
- “Neutrones, Instrumentación Nuclear e Investigación Relacionada con Terapia con Protones en el CNA e Instalaciones Internacionales”.

RTI2018-098117-B-C21.

Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Plan Estatal 2017-2020 Retos – Proyectos I+D+I.

Joaquín Gómez Camacho y José Manuel Quesada Molina.

01/01/2019-31/12/2021.

- “Buscando los Límites en Espectrometría de Masas con Aceleradores de Baja Energía (LEAMS) en el Centro Nacional de Aceleradores: Métodos y Aplicaciones”.
PGC2018-094546-B-100.
Ministerio Ciencia, Investigación y Universidades. Programa Promoción General del Conocimiento.
Rafael García-Tenorio y José M^a López Gutiérrez.
01/01/2019-31/12/2021.
- “Rompiendo el ¹²C: Una Sonda Hacia la Evolución de las Estrellas y el Origen de la Vida”.
PGC2018-096996-B-C21.
Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.
Juan Pablo Fernández García y Marcos A. González Álvarez.
01/01/2019-31/12/2021.
- “Proyecto MACNA: Mejora de equipamiento asociado a las Instalaciones del Centro Nacional de Aceleradores”.
Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.
Rafael García-Tenorio y Joaquín Gómez Camacho.
28/08/2019-31/12/2021.
- “Actualización de las líneas del haz del tandem y detectores de radiación para los aceleradores tandem y ciclotrón (beamdetec)”.
ICTS-2020-02-US-4.
Ministerio de Ciencia e Innovación.
Javier García López.
01/09/2019-31/12/2021.
- “Nuclear Physics Developments for Proton Therapy: delivering the right effective dose to the right place (NucPhysPT)”.
P18-RT-1900.
Proyecto Ayuda PAIDI2020. I+D+I. Junta de Andalucía (Consejería de Economía y Conocimiento)
Miguel Antonio Cortés Giraldo y Carlos Guerrero.
01/01/2020-31/12/2022.
- “Protocolo de Caracterización in Situ de Obras Pictóricas mediante Técnicas Nucleares no Destructivas y Otras Técnicas no Invasivas: Aplicación a las Colecciones del Arzobispado y Catedral de Sevilla, así Como a Otras Obras de Alto Valor Artístico y Patrimonial”.
P18-RT-1877.
Consejería de Economía, Conocimiento, Empresas y Universidad de la Junta de Andalucía.
PAIDI 2020. Proyectos I+D+I.
Miguel Ángel Respaldiza Galisteo y Francisco José Ager Vázquez.

01/01/2020-31/12/2022.

- “Equipo de espectrometría Alpha-Analyst, 8 cámaras con detectores PIPS”.
IE17-5843-8.
Consejería Economía, Conocimiento, Empresas y Universidades. Proyecto Infraestructura de la Junta Andalucía.
Rafael García tenorio.
01/01/2020-31/12/2021.
- “Equipamiento del laboratorio de radiofarmacia en el Centro Nacional de Aceleradores”.
EQC2019-005679-P.
Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.
Rafael García-Tenorio.
01/01/2020-31/12/2021.
- “Efectos Radiobiológicos de pulsos ultra-cortos de iones en células vivas”.
AICO/2020/207.
Generalitat Valenciana.
Michael Seimetz. (Participa M^a Carmen Jiménez Ramos).
31/01/2020-31/12/2021.
- “AMS and radiometrically determined radionuclides as tracers of natural processes in the Arctic and Southern Oceans”.
US-1263369.
Consejería de Economía y Conocimiento. Proyectos I+D+I FEDER Andalucía 2014-2020.
María Villa Alfageme y José M^a López Gutiérrez.
01/02/2020-31/01/2022.
- “Actualización de las instalaciones del Centro Nacional de Aceleradores”.
IE17-5662.
Consejería de Economía, Conocimiento, Empresas y Universidad. Junta de Andalucía.
Javier García López.
15/02/2020-14/02/2022
- “Predicción del Comportamiento Eléctrico de Dispositivos Electrónicos bajo Radiación (PRECEDER)”
2020/00000158.
Junta Andalucía. Fondos (FEDER.).
Yolanda Morilla García.
01/03/2020-30/09/2021
- “Puesta en marcha y explotación de la línea de tiempo de vuelo en el CNA”.
US-1261006.
Consejería de Economía y Conocimiento. I+D+I FEDER Andalucía
Begoña Fernández Martínez.
16/03/2020-15/03/2022.

- “Diseño y Verificación de Sistemas en Chip Heterogéneos de Computación para Aplicaciones Espaciales y Terrestres bajo Radiación (RENASER4)”.
PID2019-106455GB-C21.
Agencia Estatal de Investigación. Fondos FEDER.
Mario García Valderas y Luis Entrena Arrontes. (Participa Yolanda Morilla).
01/06/2020-31/05/2023.
- “Aproximación Estructural a las Técnicas Shift y a la Predicción de la Fiabilidad en Sistemas On Chip Heterogéneos (RENASER4)”.
PID2019-106455GB-C22.
Agencia Estatal de Investigación. Fondos FEDER.
Sergio Antonio Cuenca Asensi y Antonio Martínez Álvarez. (Participa Yolanda Morilla).
01/06/2020-31/05/2023.

6.2. Artículos publicados/ Published Articles.

6.2.1. Artículos ISI

- “Optimisation of a Batch Thermal Combustion Method using a tube furnace oxidation system(Pyrolyser)and LSC for carbon-14 determination in environmental matrices”.
D’Souza, R.S.; Nayak, S.R.; Mohan, M.P.; Bharath, S.; Krishnan, K.A.; Kamath, S.; Diéguez, A.; Agulló, L.; Gómez-Martínez, I.; Santos-Arévalo, F.J.; García-Tenorio, R.; Ravi, P.M.; Karunakara, N.
Journal of Environmental Radioactivity. 106345,226 (2021).
- “Research facilities and highlights at the Centro Nacional de Aceleradores”.
Gómez-Camacho, J.; García-López, J.; Guerrero, C.; López-Gutiérrez, J.M.; García-Tenorio, R.; Santos-Arévalo, F.J.; Chamizo, E.; Ferrer, F.J.; Jiménez-Ramos, M.C.; Balcerzyk, M.; Fernández, B.
The European Physical Journal Plus 273, 136 (2021).
- “The mortars from rock-cut hydraulic structures of AS-SILA (SELA) in southern Jordan: Mineralogical Characterization and radiocarbon dating”.
Da Riva, R.; Santos-Arévalo, F.J.; Madrid i Fernández, M.
Mediterranean Archaeology and Archaeometry. 2, 21 (2021).
- “Clinical Viability of Boron Neutron Capture Therapy for Personalized Radiation Treatment”.
Skwierawska, D.; Lopez-Valverde, J.A.; Balcerzyk, M.; Leal, A
Cancers (Basel)(2022).
- “Production yields at the distal fall-off of the β^+ emitters ^{11}C and ^{13}N for in-vivo range verification in proton therapy.”.
Rodríguez-González, T.; Guerrero, C.; Jiménez-Ramos, M.d.C.; Lerendegui-Marco, J.; Millán-Callado, M.d.l.Á.; Parrado, Á.; Gómez, J.; Quesada, J.M
Radiation Physics and Chemistry 109759, 190(2022).
- “Implications of the Harmonization of [(18)F]FDG-PET/CT Imaging for Response Assessment of Treatment in Radiotherapy Planning”.
Jimenez-Ortega, E.; Aguera, R.; Ureba, A.; Balcerzyk, M.; Wals-Zurita, A.; Garcia-Gomez, F.J.; Leal, A
Tomography 1097-1112, 8(2022).
- “Neodymium doped lanthanide fluoride nanoparticles as contrast agents for luminescent bio-imaging and X-ray computed tomography.”.
González-Mancebo, D.; Becerro, A.I.; Calderón-Olvera, R.M.; Cantelar, E.; Corral, A.; Balcerzyk, M.; de la Fuente, J.M.; Ocaña, M.
Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio S40-S49, 61(2022).
- “Organotrifluoroborate Sugar Conjugates for a Guided Boron Neutron Capture Therapy: From Synthesis to Positron Emission Tomography”.
Confalonieri, L.; Imperio, D.; Erhard, A.; Fallarini, S.; Compostella, F.; Del Grossio, E.; Balcerzyk, M.; Panza, L.

- “Theranostics in Boron Neutron Capture Therapy”.
Sauerwein, W.A.G.; Sancey, L.; Hey-Hawkins, E.; Kellert, M.; Panza, L.; Imperio, D.; Balcerzyk, M.; Rizzo, G.; Scalco, E.; Herrmann, K.; et al
Life (Basel) 330, 11(2021).
- “Dysprosium and Holmium Vanadate Nanoprobes as High-Performance Contrast Agents for High-Field Magnetic Resonance and Computed Tomography Imaging”.
Gomez-Gonzalez, E.; Nunez, N.O.; Caro, C.; Garcia-Martin, M.L.; Fernandez-Afonso, Y.; de la Fuente, J.M.; Balcerzyk, M.; Ocana, M.
Inorg Chem 152-160, 60(2021).
- “• Materials and techniques of mural paintings attributed to Johannes Aquila in Central Eastern Europe around 1400”.
A. Kriznar
The European Physical Journal Plus 525, 136(2021).
- “• An approach to the metallic composition of the Carthage mint coins from the tetrarchic hoard of Tomares ”.
S. Scrivano, R. Pliego, B. Gómez-Tubío, J. Moreno-Soto, E. García Vargas, M.A. Respaldiza, F. Chaves Tristán
Journal of Archaeological Science 103509, 44(2022).
- “Exposure to fluoride during the intrauterine and lactation period promotes changes in the offspring’s alveolar bone”.
Maria Karolina Martins Ferreira, Deiweson Souza-Monteiro, Leonardo Oliveira Bittencourt, José Mário Matos-Sousa, Victória Santos Chemelo, Vinicius Ruan Neves Santos, Paula Beatriz Oliveira Nunes, Gabriela de Souza Balbinot, Alejandro Ferraz Prado, Fabricio Mezzomo Collares, Francisco José Ager, Inés Ortega-Feliu, Miguel Angel Respaldiza, Sofia Pessanha, Rafael Rodrigues Lima
Chemosphere(2022).
- “Characterization of Castellani nineteenth-century gold jewellery by in situ micro-XRF spectroscopy”.
R. Manca, S. Scrivano, C. Manfriani, F. J. Ager Vázquez, I. Ortega-Feliu, M. Ferretti, M.A. Respaldiza & M. Benvenuti
Scientific Reports 7813, 12 (2022).
- “Electromagnetic VDE and disruption analysis in the SMART Tokamak”.
Mancini, A. ; Doyle, S. J.; Segado-Fernández, J.; Ayllón-Guerola, J.; Cruz-Zabala, D.; García-Domínguez, J.; García-Munoz, M.; Viezzer, E.; Buxton, P. F.; Chung, K. J.; Gryaznevich, M. P.; Hwang, Y. S.; García-López, J.
IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE 4187-4192, 11(2022).

- “Oxygen diffusion coefficient and characterization of leachant in UO₂ corrosion studied by new methods”.
L.J. Bonales, N. Rodríguez-Villagra, A. Milena-Perez, M.C. Jimenez Ramos, J. García Lopez, J. Cobos
Solid State Ionics 115922, 380(2022).
- “In-out charge exchange measurements and 3D modelling of diagnostic thermal neutrals to study edge poloidal impurity asymmetries”.
D J Cruz-Zabala, E Viezz, U Plank, R M McDermott, M Cavedon, E Fable, R Dux, P Cano-Megias, T Pütterich, A Jansen van Vuuren, M Garcia-Munoz, J Garcia Lopez and the ASDEX Upgrade Team
Plasma Physics and Controlled Fusion 64, 4 (2022).
- “Characterization of scintillator screens under irradiation of low energy ¹³³Cs ions”.
Toledo-Garrido, J. J.; Galdon-Quiroga, J.; Viezz, E.; Birkenmeier, G.; Olevskaia, V.; Balden, M.; Garcia-Lopez, J.; Jimenez-Ramos, M. C.; Rodriguez-Ramos, M.; Anda, G.; Videla-Trevin, M.; Garcia-Munoz, M.
Journal of Instrumentation 1748-0221, 17(2022).
- “Study of Ionization Charge Density-Induced Gain suppression in LGADs”.
M.C. Jiménez-Ramos, J. García López, A. García Osuna, I. Vila, E. Currás, R. Jaramillo, S. Hidalgo and G. Pellegrini
Sensors 1080, 22(2022).
- “Microdosimetry in low energy proton beam at therapeutic-equivalent fluence rate with silicon 3D-cylindrical microdetectors.”.
Guardiola, Consuelo; Bachiller-Perea, Diana; Prieto-Pena, Juan; Jiménez-Ramos, M. C.; García-López, Javier; Esnault, Cedric; Fleta, Celeste; Quirión, David; Gómez, Faustino
Physics in Medicine and Biology 114001, 66(2021).
- “Magnetic equilibrium design for the SMART tokamak”.
S.J. Doyle, D. Lopez-Aires, A. Mancini, M. Agredano-Torres, J.L. García Sanchez, J. Segado-Fernandez, J. Ayllon-Guerola, M. Garcia-Munoz, E. Viezz, C. Soria Hoyo, J. Garcia-Lopez, G. Cunningham, P.F. Buxton, M.P. Gryaznevich, Y.S. Hwang, K.J. Chung.
Fusion Engineering and Design 112706, 171(2021).
- “Dosimetry with gafchromic films based on a new micro-opto-electro-mechanical system ”.
C. Guardiola, A. Márquez, M. C. Jimenez-Ramos, J. Garcia-Lopez, A. Baratto-Roldán, X. Muñoz-Berbel
Sci Rep 10414, 11(2021).
- “Upgrade and absolute calibration of the JET scintillator-based fast-ion loss detector”.
J. F. Rivero-Rodriguez, C. Perez Von Thun, M. Garcia-Muñoz, P. Beaumont, V. Kiptily, J. Garcia-Lopez, V. Goloborodko, M. C. Jimenez-Ramos, M. Rodriguez-Ramos, K. Schoepf, V. Yavorskij, and JET Contributors.
Sci. Instrum 043553, 92(2021).

- “Mechanical and electromagnetic design of the vacuum vessel of the SMART tokamak”.
A. Mancini, J. Ayllon-Guerola, S.J. Doyle, M. Agredano-Torres, D. Lopez-Aires, J. Toledo-Garrido, E. Viezzer, M. Garcia-Munoz, P.F. Buxton, K.J. Chung, J. Garcia-Dominguez, J. Garcia-Lopez, M.P. Gryaznevich, J. Hidalgo-Salaverri, Y.S. Hwang, J. Segado-Fernandez
Fusion Engineering and Design 117542, 171(2021).
- “Characterization of the Charge Collection Efficiency in Silicon 3-D-Detectors for Microdosimetry”.
D. Bachiller-Perea, J. García López, M.C. Jiménez Ramos, F. Gómez, C. Fleta, D. Quirón, A. García Osuna and C. Guardiola
IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement 6005211, 70(2021).
- “74 Ge(n, γ) cross section below 70 keV measured at n_TOF CERN”.
Lederer-Woods, C. Guerrero, C.; Gunsing, F.; Harada, H.; Heftrich, T.; Heinitz, S.; Heyse, J.; Jenkins, D. G.; Jericha, E.; Käppeler, F.; Kadi, Y.; Katabuchi, T.; Kavrigin, P.; Ketlerov, V.; Khryachkov, V.; Kimura, A.; Kivel, N.; Kokkoris, M.; Krčíčka, M.; Leal-Cidoncha, E.; Leeb, H.; Lerendegui-Marco, J.; Meo, S. Lo; Lonsdale, S. J.; Losito, R.; Macina, D.; Marganiec, J.; Martínez, T.; Massimi, C.; Mastinu, P.; Mastromarco, M.; Matteucci, F.; Maugeri, E. A.; Mendoza, E.; Mengoni, A.; Milazzo, P. M.; Mingrone, F.; Mirea, M.; Montesano, S.; Musumarra, A.; Nolte, R.; Oprea, A.; Patronis, N.; Pavlik, A.; Perkowski, J.; Porras, I.; Praena, J.; Quesada, J. M.; Rajeev, K.; Rauscher, T.; Reifarth, R.; Riego-Perez, A.
EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL A 58, 12(2022).
- “Constraints on the dipole photon strength for the odd uranium isotopes”.
Moreno-Soto, J.; Guerrero, C.; Heinitz, S.; Heyse, J.; Jenkins, D. G.; Junghans, A.; Käppeler, F.; Kadi, Y.; Kimura, A.; Knapová, I.; Kokkoris, M.; Kopatch, Y.; Kurtulgil, D.; Ladarescu, I.; Lampoudis, C.; Lederer-Woods, C.; Lonsdale, S. J.; Macina, D.; Manna, A.; Martínez, T.; Masi, A.; Massimi, C.; Mastinu, P.; Mastromarco, M.; Maugeri, E. A.; Mazzone, A.; Mendoza, E.; Mengoni, A.; Michalopoulou, V.; Milazzo, P. M.; Mingrone, F.; Musumarra, A.; Negret, A.; Nolte, R.; Ogállar, F.; Oprea, A.; Patronis, N.; Pavlik, A.; Perkowski, J.; Piersanti, L.; Petrone, C.; Pirovano, E.; Porras, I.; Praena, J.; Quesada, J. M.
PHYSICAL REVIEW C 024618, 15 (2022).
- “High accuracy, high resolution 235U(n,f) cross section from n_TOF (CERN) from 18 meV to 10 keV”.
Mastromarco, M.; Amaducci, S. ; Colonna, N.; Finocchiaro, P.; Cosentino, L.; Barbagallo, M.; Aberle, O.; Andrzejewski, J.; Audouin, L.; Bacak, M.; Balibrea, J.; Bečvář, F.; Berthoumieux, E.; Billowes, J.; Bosnar, D.; Brown, A.; Caamaño, M.; Calviño, F.; Calviani, M.; Cano-Ott, D.; Cardella, R.; Casanovas, A.; Cerutti, F.; Chen, Y. H.; Chiaveri, E.; Cortés, G.; Cortés-Giraldo, M. A.; Damone, L. A.; Diakaki, M.; Domingo-Pardo, C.; Diacono, D.; Dressler, R.; Dupont, E.; Durán, I.; Fernández-Domínguez, B.; Ferrari, A.; Ferreira, P.; Furman, V.; Göbel, K.; García, A. R.; Gawlik, A.; Gilardoni, S.; Glodariu, T.; Gonçalves, I. F.; González-Romero, E.; Griesmayer, E.; Guerrero, C.
EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL A 147, 58(2022).
- “Hybrid in-beam PET- and Compton prompt-gamma imaging aimed at enhanced proton-range verification”.
Balibrea-Correa, J.; Lerendegui-Marco, J.; Ladarescu, I.; Guerrero, C.; Rodríguez-González, T.; Jiménez-Ramos, M. C.; Fernández-Martínez, B.; Domingo-Pardo, C.

- “Production yields at the distal fall-off of the β^+ emitters ^{11}C and ^{13}N for in-vivo range verification in proton therapy”.

Rodríguez-González, Teresa; Guerrero, Carlos ; Jiménez-Ramos, María del Carmen; Lerendegui-Marco, Jorge; Millán-Callado, María de los Ángeles; Parrado, Ángel; Gómez, Joaquín; Quesada, Jose Manuel

RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY 109759, 190(2022).

- “Zr 92 (n,?) and (n,tot) measurements at the GELINA and n_TOF facilities”.

Tagliente, G.; Kopecky, S.; Heyse, J.; Krticka, M.; Massimi, C.; Mengoni, A.; Milazzo, P. M.; Plompen, A. J.M.; Schillebeeckx, P.; Valenta, S.; Wynants, R.; Altstadt, S.; Andrzejewski, J.; Audouin, L.; Bécares, V.; Barbagallo, M.; Bečvář, F.; Belloni, F.; Berthoumieux, E.; Billowes, J.; Boccone, V.; Bosnar, D.; Brugger, M.; Calviño, F.; Calviani, M.; Cano-Ott, D.; Carrapiço, C.; Cerutti, F.; Chiaveri, E.; Chin, M.; Colonna, N.; Cortés, G.; Cortés-Giraldo, M. A.; Cristallo, S.; Diakaki, M.; Domingo-Pardo, C.; Dressler, R.; Durán, I.; Eleftheriadis, C.; Ferrari, A.; Fraval, K.; Furman, V.; Göbel, K.; Gómez-Hornillos, M. B.; Ganesan, S.; García, A. R.; Giubrone, G.; Gonçalves, I. F.; González-Romero, E.; Goverdovski, A.; Griesmayer, E.; Guerrero, C.

PHYSICAL REVIEW C 025805, 105(2022).

- “A first prototype of C6D6 total-energy detector with SiPM readout for neutron capture time-of-flight experiments”.

Balibrea-Correa, J.; Lerendegui-Marco, J.; Calvo, D.; Caballero, L.; Babiano, V.; Ladarescu, I.; López Redondo, M.; Tain, J. L.; Tolosa, A.; Domingo-Pardo, C.; Calvino, F.; Casanova, A.; Tarifeño-Saldivia, A.; Alcayne, V.; Cano-Ott, D.; Martinez, T.; Guerrero, C.; Barbagallo, M.; Macina, D.; Bacak, M.

NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATOR SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT 164709, 985(2021).

- “Destruction of the cosmic γ -ray emitter Al 26 in massive stars: Study of the key Al 26 (n,p) reaction”.

Lederer-Woods, C.; Woods, P. J.; Davinson, T.; Kahl, D.; Lonsdale, S. J.; Aberle, O.; Amaducci, S.; Andrzejewski, J.; Audouin, L.; Bacak, M.; Balibrea, J.; Barbagallo, M.; Bečvář, F.; Berthoumieux, E.; Billowes, J.; Bosnar, D.; Brown, A.; Caamaño, M.; Calviño, F.; Calviani, M.; Cano-Ott, D.; Cardella, R.; Casanova, A.; Cerutti, F.; Chen, Y. H.; Chiaveri, E.; Colonna, N.; Cortés, G.; Cortés-Giraldo, M. A.; Cosentino, L.; Cristallo, S.; Damone, L. A.; Diakaki, M.; Domingo-Pardo, C.; Dressler, R.; Dupont, E.; Durán, I.; Fernández-Domínguez, B.; Ferrari, A.; Ferreira, P.; Ferrer, F. J.; Finocchiaro, P.; Furman, V.; Göbel, K.; García, A. R.; Gawlik, A.; Gilardoni, S.; Glodariu, T.; Gonçalves, I. F.; González-Romero, E.; Griesmayer, E.; Guerrero, C.

PHYSICAL REVIEW C L022803, 104(2021).

- “Destruction of the cosmic γ -ray emitter Al 26 in massive stars: study of the key Al 26 (n, α) reaction”.

Lederer-Woods, C.; Woods, P. J.; Davinson, T.; Estrade, A.; Heyse, J.; Kahl, D.; Lonsdale, S. J.; Paradela, C.; Schillebeeckx, P.; Aberle, O.; Amaducci, S.; Andrzejewski, J.; Audouin, L.; Bacak, M.; Balibrea, J.; Barbagallo, M.; Bečvář, F.; Berthoumieux, E.; Billowes, J.; Bosnar, D.; Brown, A.; Caamaño, M.; Calviño, F.; Calviani, M.; Cano-Ott, D.; Cardella, R.; Casanova, A.;

Cerutti, F.; Chen, Y. H.; Chiaveri, E.; Colonna, N.; Cortés, G.; Cortés-Giraldo, M. A.; Cosen-tino, L.; Cristallo, S.; Damone, L. A.; Diakaki, M.; Domingo-Pardo, C.; Dressler, R.; Dupont, E.; Durán, I.; Fernández-Domínguez, B.; Ferrari, A.; Ferreira, P.; Ferrer, F. J.; Finocchiaro, P.; Furman, V.; Göbel, K.; García, A. R.; Gawlik, A.; Gilardoni, S.; Glodariu, T.; Gonçalves, I. F.; González-Romero, E.; Griesmayer, E.; Guerrero, C.

PHYSICAL REVIEW C L032803, 104(2021).

- “First results of the $^{140}\text{Ce}(\text{N},\gamma)^{141}\text{Ce}$ cross-section measurement at n_tof”.
Amaducci, Simone; Colonna, Nicola; Cosentino, Luigi; Cristallo, Sergio; Finocchiaro, Paolo; Krticka, Milan; Massimi, Cristian; Mastromarco, Mario; Mazzone, Annamaria; Mengoni, Alberto; Valenta, Stanislav; Aberle, Oliver; Alcayne, Victor; Andrzejewski, Józef; Audouin, Laurent; Babiano-Suarez, Victor; Bacak, Michael; Barbagallo, Massimo; Bennett, Samuel; Berthoumieux, Eric; Billowes, Jon; Bosnar, Damir; Brown, Adam; Busso, Maurizio; Caamaño, Manuel; Caballero-Ontanaya, Luis; Calviño, Francisco; Calviani, Marco; Cano-Ott, Daniel; Casanovas, Adria; Cerutti, Francesco; Chiaveri, Enrico; Cortés, Guillem; Cortés-Giraldo, Miguel; Damone, Lucia Anna; Davies, Paul John; Diakaki, Maria; Dietz, Mirco; Domingo-Pardo, Cesar; Dressler, Rüdiger; Ducasse, Quentin; Dupont, Emmeric; Durán, Ignacio; Eleme, Zinovia; Fernández-Domínguez, Beatriz; Ferrari, Alfredo; Furman, Valter; Göbel, Kathrin; Garg, Ruchi; Gawlik, Aleksandra; Gilardoni, Simone; Gonçalves, Isabel; González-Romero, Enrique; Guerrero, Carlos
Universe 2218-1997(2021).

- “Imaging neutron capture cross sections: i-TED proof-of-concept and future prospects based on Machine-Learning techniques”.
Babiano-Suárez, V.; Lerendegui-Marco, J.; Balibrea-Correa, J.; Caballero, L.; Calvo, D.; Ladrásco, I.; Real, D.; Domingo-Pardo, C.; Calviño, F.; Casanovas, A.; Tarifeño-Saldivia, A.; Alcayne, V.; Guerrero, C.; Millán-Callado, M. A.; Rodríguez-González, T.; Barbagallo, M.; Aberle, O.; Amaducci, S.; Andrzejewski, J.; Audouin, L.; Bacak, M.; Bennett, S.; Berthoumieux, E.; Billowes, J.; Bosnar, D.; Brown, A.; Busso, M.; Caamaño, M.; Calviani, M.; Cano-Ott, D.; Cerutti, F.; Chiaveri, E.; Colonna, N.; Cortés, G.; Cortés-Giraldo, M. A.
EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL A 197, 57(2021).

- “Measurement of the $^{76}\text{Ge}(\text{n},\gamma)$ cross section at the n_TOF facility at CERN”.
Gawlik-Ramiega, A.; Lederer-Woods, C.; Krticka, M.; Valenta, S.; Battino, U.; Andrzejewski, J.; Perkowski, J.; Aberle, O.; Audouin, L.; Bacak, M.; Balibrea, J.; Barbagallo, M.; Barros, S.; Bécares, V.; Beinrucker, C.; Berthoumieux, E.; Billowes, J.; Bosnar, D.; Brugger, M.; Caamaño, M.; Calviño, F.; Calviani, M.; Cano-Ott, D.; Cardella, R.; Casanovas, A.; Castelluccio, D. M.; Cerutti, F.; Chen, Y. H.; Chiaveri, E.; Colonna, N.; Cortés, G.; Cortés-Giraldo, M. A.; Cosentino, L.; Damone, L. A.; Diakaki, M.; Dietz, M.; Domingo-Pardo, C.; Dressler, R.; Dupont, E.; Durán, I.; Fernández-Domínguez, B.; Ferrari, A.; Ferreira, P.; Finocchiaro, P.; Furman, V.; Göbel, K.; García, A. R.; Glodariu, T.; Goncalves, I. F.; González-Romero, E.; Goverdovski, A.; Griesmayer, E.; Guerrero, C.
PHYSICAL REVIEW C 044610, 104(2021).

- “Measurement of the $^{72}\text{Ge}(\text{n},\gamma)$ cross section over a wide neutron energy range at the CERN n_TOF facility”.
Dietz, M.; Lederer-Woods, C.; Tattersall, A.; Battino, U.; Gunsing, F.; Heinitz, S.; Krtička, M.; Lerendegui-Marco, J.; Reifarth, R.; Valenta, S.; Aberle, O.; Amaducci, S.; Andrzejewski, J.; Audouin, L.; Bacak, M.; Balibrea, J.; Barbagallo, M.; Bečvář, F.; Berthoumieux, E.; Billowes, J.; Bosnar, D.; Brown, A.; Caamaño, M.; Calviño, F.; Calviani, M.; Cano-Ott, D.; Cardella, R.; Casanovas, A.; Cerutti, F.; Chen, Y. H.; Chiaveri, E.; Colonna, N.; Cortés, G.; Cortés-Giraldo, M. A.; Cosentino, L.; Damone, L. A.; Diakaki, M.; Domingo-Pardo, C.; Dressler, R.; Dupont, E.; Durán, I.; Fernández-Domínguez, B.; Ferrari, A.; Ferreira, P.; Finocchiaro, P.; Furman, V.; Göbel, K.; García, A. R.; Gawlik, A.; Gilardoni, S.; Glodariu, T.; Gonçalves, I. F.; González-Romero, E.; Griesmayer, E.; Guerrero, C.
PHYSICAL REVIEW C 045809, 103(2021).
- “Multiscale modelling for fusion and fission materials: The M4F project”.
Malerba, L.; Caturla, M. J.; Gaganidze, E.; Kaden, C.; Konstantinović, M. J.; Olsson, P.; Robertson, C.; Rodney, D.; Ruiz-Moreno, A. M.; Serrano, M.; Aktaa, J.; Anento, N.; Austin, S.; Bakaev, A.; Balbuena, J. P.; Bergner, F.; Boioli, F.; Boleininger, M.; Bonny, G.; Castin, N.; Chapman, J. B.J.; Chekhonin, P.; Clozel, M.; Devincre, B.; Dupuy, L.; Diego, G.; Dudarev, S. L.; Fu, C. C.; Gatti, R.; Gélibart, L.; Gómez-Ferrer, B.; Gonçalves, D.; Guerrero, C.
Nuclear Materials and Energy 101051, 29(2021).
- “Physical mechanisms and parameters for models of microstructure evolution under irradiation in Fe alloys – Part I: Pure Fe”.
Malerba, L.; Anento, N.; Balbuena, J. P.; Becquart, C. S.; Castin, N.; Caturla, M. J.; Domain, C.; Guerrero, C.; Ortiz, C. J.; Pannier, B.; Serra, A.
Nuclear Materials and Energy 101069, 29(2021).
- “Radiative neutron capture cross-section measurement of ge isotopes at n_TOF CERN facility and its importance for stellar nucleosynthesis”.
Gawlik, A.; Lederer-Woods, C.; Andrzejewski, J.; Perkowski, J.; Battino, U.; Ferreira, P.; Gunsing, F.; Heinitz, S.; Krtička, M.; Massimi, C.; Mingrone, F.; Reifarth, R.; Tattersall, A.; Valenta, S.; Weiss, C.; Aberle, O.; Audouin, L.; Bacak, M.; Balibrea, J.; Barbagallo, M.; Barros, S.; Bécares, V.; Bečvář, F.; Beinrucker, C.; Berthoumieux, E.; Billowes, J.; Bosnar, D.; Brugger, M.; Caamaño, M.; Calviño, F.; Calviani, M.; Cano-Ott, D.; Cardella, R.; Casanovas, A.; Castelluccio, D. M.; Cerutti, F.; Chen, Y. H.; Chiaveri, E.; Colonna, N.; Cortés, G.; Cortés-Giraldo, M. A.; Cosentino, L.; Damone, L. A.; Diakaki, M.; Dietz, M.; Domingo-Pardo, C.; Dressler, R.; Dupont, E.; Durán, I.; Fernández-Domínguez, B.; Ferrari, A.; Finocchiaro, P.; Furman, V.; Göbel, K.; García, A. R.; Glodariu, T.; Gonçalves, I. F.; González-Romero, E.; Goverdovski, A.; Griesmayer, E.; Guerrero, C.
Acta Physica Polonica. A 383-388, 139(2021).
- “Fate of anthropogenic radionuclides (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am) in seawater in the northern Benguela upwelling system off Namibia”.
M. Rozmaric, E. Chamizo, D.C. Louw, M. López-Lora, O. Blinova, I. Levy, B. Mudumbi, A.K. van der Plas, R. Garcia Tenorio, P. McGinnity, I. Osvath
Chemosphere. 131514, 286 (2021).

- “The Potential of $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ as a Water Mass Tracer in the Arctic Ocean”.
E. Chamizo, M. Christl, M. López-Lora, N. Casacuberta, A. -M. Wefing, T.C. Kenna
J. Geophys. Res. Ocean. 127 (2022).
- “Performance of the 1 MV Accelerator Mass Spectrometry system at the Centro Nacional de Aceleradores for the analysis of ^{233}U at environmental levels” .
E. Chamizo, M. López-Lora, M. Christl
Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms 533 (2022).
- “Compositional gradients at the nanoscale in substoichiometric thin films deposited by magnetron sputtering at oblique angles: A case study on SiO_x thin films” .
A. Garcia-Valenzuela, A.M. Alcaide, V. Rico, F.J. Ferrer, G. Alcalá, T.C. Rojas, R. Alvarez, A.R. Gonzalez-Elipe, A. Palmero
Plasma Processes and Polymers 2100116, 19 (2022).
- “Destruction of the cosmic γ -ray emitter ^{26}Al in massive stars: Study of the key $^{26}\text{Al}(\text{n},\alpha)$ reaction” .
C. Lederer-Woods, P. J. Woods, T. Davinson, A. Estrade, J. Heyse, D. Kahl, S. J. Lonsdale, C. Paradela, P. Schillebeeckx, O. Aberle, S. Amaducci, J. Andrzejewski, L. Audouin, M. Bacak, J. Balibrea, M. Barbagallo, F. Becvár, E. Berthoumieux, J. Billowes, D. Bosnar, A. Brown, M. Caamaño, F. Calviño, M. Calviani, D. Cano-Ott, R. Cardella, A. Casanovas, F. Cerutti, Y. H. Chen, E. Chiaveri, N. Colonna, G. Cortés, M. A. Cortés-Giraldo, L. Cosentino, S. Cristallo, L. A. Damone, M. Diakaki, C. Domingo-Pardo, R. Dressler, E. Dupont, I. Durán, B. Fernández-Domínguez, A. Ferrari, P. Ferreira, F. J. Ferrer et al.
Physical Review C L032803, 104 (2021).
- “One-reactor vacuum and plasma synthesis of transparent conducting oxide nanotubes and nanotrees: from single wire conductivity to ultra-broadband perfect absorbers in the NIR” .
Javier Castillo-Seoane, Jorge Gil-Rostra, Víctor López-Flores, Gabriel Lozano, F. Javier Ferrer, Juan P. Espinós, Kostya (Ken) Ostrikov, Francisco Yubero, Agustín R. González-Elipe, Ángel Barranco, Juan R. Sánchez-Valencia and Ana Borrás
Nanoscales 13882-13895, 13 (2021).
- “Destruction of the cosmic γ -ray emitter ^{26}Al in massive stars: Study of the key $^{26}\text{Al}(\text{n},\text{p})$ reaction” .
C. Lederer-Woods, P. J. Woods, T. Davinson, D. Kahl, S. J. Lonsdale, O. Aberle, S. Amaducci, J. Andrzejewski, L. Audouin, M. Bacak, J. Balibrea, M. Barbagallo, F. Becvár, E. Berthoumieux, J. Billowes, D. Bosnar, A. Brown, M. Caamaño, F. Calviño, M. Calviani, D. Cano-Ott, R. Cardella, A. Casanovas, F. Cerutti, Y. H. Chen, E. Chiaveri, N. Colonna, G. Cortés, M. A. Cortés-Giraldo, L. Cosentino, S. Cristallo, L. A. Damone, M. Diakaki, C. Domingo-Pardo, R. Dressler, E. Dupont, I. Durán, B. Fernández-Domínguez, A. Ferrari, P. Ferreira, F. J. Ferrer et al.
Physical Review. C L022803, 104 (2021).
- “The radioactivity of thorium incandescent gas lantern mantles” .
H.J. Hassan, S. Hashim, M.S.M. Sanusi, D.A.Bradley, A. Alsubaie, R. García-Tenorio, N. F. Bakri and R.M.Tahar
Applied Sciences 1311, 11 (2021).

- “The Enhanced Naturally Occurring Radioactivity of Negative Ion Clothing and Attendant Risk”.
H.J. Hassan, S. Hashim, M.S.M. Sanusi, D.A.Bradley, A. Alsubaie, R. García-Tenorio and R.M.Tahar
Applied Sciences 5412, 12 (2021).
- “Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction”.
Calderón-Morales, B.R.S., García-Martínez, A., Pineda, P., García-Tenório, R.
Journal of Building Engineering 102506, 44 (2021).
- “The naturally occurring radioactivity of ‘scalar energy’ pendants and concomitant radiation risk”.
H. J. Hassan, S. Hashim, M S M Sanusi, ,M H Jamal , S A Hassan ,D A Bradley , R García-Tenorio , R M Tahar
Plos One e0250528, 16 (2021).
- “Assessment of measurement accuracy in ^{210}Pb dating sediment methods”.
Schirone, A., Rožmarić, M., Barsanti, M., ...García-Tenorio, R.
Quaternary Geochronology 101255, 69 (2022).
- “Radiation hazard assessment from NORM-added paint products in Malaysia”.
Abu Hanifah, N.Z.H., Hashim, S., Hassan, H.J., García-Tenorio, R., Tahar, R.M.
Journal of King Saud University - Science 101850, 34 (2022).
- “Natural radioactivity and element characterization in pit lakes in Northern Sweden”.
Thomas, R., Mantero, J., Cánovas, C.R., ...García-Tenorio R.,Forssell-Aronsson, E., Isaksson, M.
Plos One e0266002, 17 (2022).

6.2.2. Artículos No ISI

- “Early progress on the study of the Tomares hoard”.
Ortega-Feliu, F. J. Ager, M. A. Respaldiza, N. Conejo, F.J. Sánchez
Arqueológicos de Oeiras 29, Oeiras, Câmara Municipal 0872-6086, 41-48 (2021).
- “Pigments and Inks Applied in Juan Vespucci’s Portolan Chart (1520)”.
A. Kriznar, F. Ager, L. Robles Macías, I. Ortega-Feliu, B. Gómez-Tubío, M.A. Respaldiza
Colorants 1 411-423(2022).
- “Clinical Viability of Boron Neutron Capture Therapy for Personalized Radiation Treatment”.
Skwierawska, D.; Lopez-Valverde, J.A.; Balcerzyk, M.; Leal, A
Cancers (Basel)(2022).

- “Clinical Viability of Boron Neutron Capture Therapy for Personalized Radiation Treatment”. Skwierawska, D.; Lopez-Valverde, J.A.; Balcerzyk, M.; Leal, A
Cancers (Basel)(2022).
- “Clinical Viability of Boron Neutron Capture Therapy for Personalized Radiation Treatment”. Skwierawska, D.; Lopez-Valverde, J.A.; Balcerzyk, M.; Leal, A
Cancers (Basel)(2022).
- “Clinical Viability of Boron Neutron Capture Therapy for Personalized Radiation Treatment”. Skwierawska, D.; Lopez-Valverde, J.A.; Balcerzyk, M.; Leal, A
Cancers (Basel)(2022).

6.3. Participación en Congresos/ Congress Participations

6.3.1. Congresos Internacionales

- “Changes in fossil CO₂ emissions in Mexico City during the Covid-19 lockdown deduced from atmospheric radiocarbon concentrations.”
Beramendi Orosco, L., González Hernández, G., Cienfuegos, E., Otero, F., Santos Arévalo, F.J., Gómez-Martínez, I.
24th International Radiocarbon Conference.
Suiza (2022).
- “Fifteen years of the Centro Nacional de Aceleradores (CNA) radiocarbon facility.”
Beramendi Orosco, L., González Hernández, G., Cienfuegos, E., Otero, F., Santos Arévalo, F.J., Gómez-Martínez, I.
24th International Radiocarbon Conference.
Suiza (2022).
- “LnVO₄ (Ln = Dy, Ho) dual probes for high field MRI and CT bioimaging applications”
E. Gómez-Gonzalez, N. O. Núñez, C. Caro, M.L. Gracia Martin, Y. Fernández-Alonso, J. M. de la Fuente, M. Balcerzyk, M. Ocaña.
Chemical Nanosciences and Nanotechnology Early Career
Online (2021).
- “Non-destructive nuclear analytical techniques on Cultural Heritage Science at CNA (Seville, Spain)”
Non-destructive nuclear analytical techniques on Cultural Heritage Science at CNA (Seville, Spain).
International Workshop “Heritage Science today -From Archaeological Sites to Museums
Pais Vasco (2021).
- “Gamma ray transmission technique with a barium source for the study of copper-based archaeological objects”
I. Ortega-Feliu, B. Gómez-Tubío, M. A. Respaldiza, F. J. Ager, S. Scrivano
Applied Nuclear Physics Conference

Praga (2021).

- “Pigments and inks applied in Juan Vespucci’s portolan chart (1520)”.
A. Kriznar, F. J. Ager, L. Robles Macías y M. A. Respaldiza.
A. Kriznar, F. J. Ager, L. Robles Macías y M. A. Respaldiza
Lisboa (2021).
- “Technical and Material Aspects of Mural Paintings”
A. Kriznar.
Medieval Murals in Virtual Space
Brujas (2021).
- “Style, painting procedures, techniques and materials as tools for the attribution of selected mural paintings in Eastern Europe (1/3 of 15th Century)”
A. Kriznar.
Symposium XXII for the Study of Underdrawing and Technology in Painting (CODART)
Brujas (2021).
- “Interdisciplinary approach to the material analysis of a 17th century banner”
A. Kriznar, A. Gómez Morón, A. Ángel Gómez, J.M. Santos Madrid, y M.A. Respaldiza.
ISA 2020 – 43rd International Symposium on Archeometry
Lisboa (2022).
- “Alloys and superficial silvering in the nummi from the Thomares hoard”
S. Scrivano, F.J. Ager, B. Gómez-Tubío, J. Moreno Soto, A. Paúl
International workshop on the Tomares hoard in the context of Tetrarchy-period coinage assemblages
Sevilla (2022).
- “Gold or golden coins: Non-destructive technique to distinguish them”
Inés Ortega-Feliu, Blanca Gómez-Tubío, Francisco J. Ager, Simona Scrivano, Miguel Ángel Respaldiza and Francisca Chaves-Tristan
European Conference on X-ray Spectrometry (EXRS 2022)
Brujas (2022).
- “Material and imaging analysis procedure for the investigation of paintings by anonymous authors in the archbishop’s palace of Seville”
J. Moreno Soto, A. Križnar, F.J. Ager, A. Gamero Osuna, A. Martín de Soto, M.A. Respaldiza
European Conference on X-ray Spectrometry (EXRS 2022)
Brujas (2022).
- “In-situ μ XRF analysis of 19th-century revivalist gold jewels”
R. Manca, S. Scrivano, C. Manfriani, F. J. Ager, I. Ortega-Feliu, M. Ferretti, M. A. Respaldiza and M. Benvenuti
European Conference on X-ray Spectrometry (EXRS 2022)
Brujas (2022).

- “Material and technical analysis of La Inmaculada by Francisco Pacheco”
A. Kriznar, J. Moreno-Soto, A. Gamero-Osuna, A. Martín de-Soto, M. A. Respaldiza
InArt 2020: 4th International conference on Innovation in Art Research and Technology
Paris (2022).
- “Analysis of Materials and Painting Techniques of Mediaeval Mural Paintings until 1380 in Slovenia”
S. Scrivano, F.J. Ager, B. Gómez-Tubío, J. Moreno Soto, A. Paúl
Corpus Picturarum Muralium Medii Aevi
Ljubljana (2022).
- “Analysis of semiconductor detectors using MeV ion beams”
J. García-López; M.C. Jimenez Ramo; A. García Osuna
European Nuclear Physics Conference (EuNPC 2022)
Santiago de Compostela (2022).
- “Dynamics of radiation effects in silicon diodes studied by IBIC”
J. García-López; M.C. Jimenez Ramo; A. García Osuna, F.J. Ferrer, T. Schenkel , E. Vittone
M. Rodriguez Ramo.
Final IAEA Research Coordination Meeting on “Ion beam induced spatio-temporal structural evolution of materials: Accelerators for a new technology era (CRP F11020)
Berkely (2022).
- “The $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ atom ratio as a tool to distinguish anthropogenic U sources and its application as an oceanographic tracer in the Arctic Ocean.”
E. Chamizo, M. Christl, M. López-Lora, N. Casacuberta, A.-M. Wefing, T.C. Kenna.
6th International Conference on Environmental Radioactivity ENVIRA2021
Online (2021).
- “Identifying water masses in the western Arctic Ocean using ^{233}U and ^{236}U .”
E. Chamizo, M. Christl, M. López-Lora, N. Casacuberta, A.-M. Wefing, T.C. Kenna.
Technical Meeting on Developments in Non-Radiocarbon Accelerator Mass Spectrometry Techniques and Relevant Applications
Online (2021).
- “Sources of Antrhopogenic and natural radioactivity in the marine environment.”
R. García-Tenorio.
Training on measurement techniques for natural and artificial radionuclides in marine environment and radiochemical methods fror their determination
Malaysia (2021).
- “Natural radionuclides in the Geosphere and NORM industries.”
R. García-Tenorio.
Training on measurement techniques for natural and artificial radionuclides in marine environment and radiochemical methods fror their determination

Malaysia (2021).

- “Caracterización: metrología y muestreo de materiales NORM”
R. García-Tenorio.
Reunión Virtual Regional sobre Gestión Segura de Escenarios de Exposición del Público frente a Residuos de Industrias No nucleares con Presencia de Materiales Radiactivos Naturales (gas, petróleo y minería)
Latino America Online (2021).
- “Identifying water masses in the western Arctic Ocean using ^{233}U and ^{236}U .”
E. Chamizo, M. Christl, M. López-Lora, N. Casacuberta, A.-M. Wefing, T.C. Kenna.
Technical Meeting on Developments in Non-Radiocarbon Accelerator Mass Spectrometry Techniques and Relevant Applications
Online (2021).
- “Radioecology study of a former feldspar mine in Sweden”
R. Thomas, J. Mantero, E. Holm, F. Piñero, I. Vioque, R. García-Tenorio, E. Forssell-Aronsson and M. Isaksson
TCRER Conference
Oslo (2022).
- “AMS as a tool in marine radioactivity investigations.”
Mercedes López-Lora, Mats Eriksson, Grzegorz Olszewski, Elena Chamizo, Per Törnquist, Håkan Pettersson, Marie Karlsson, Patric Lindahl, Victoria Lérida, José María López-Gutiérrez..
Technical Meeting on Developments in Non-Radiocarbon Accelerator Mass Spectrometry Techniques and Relevant Applications
Online (2021).
- “Application of Accelerator Mass Spectrometry to the characterization of nuclear residues”
.Mª. López-Gutiérrez, E. Chamizo, R. García-Tenorio, D. Sánchez-Jiménez, J.I. Peruchena
Technical Meeting on Developments in Non-Radiocarbon Accelerator Mass Spectrometry Techniques and Relevant Applications
Online (2021).
- “Possibilities of the 1 MV AMS system at the Centro Nacional deAceleradores (CNA, Seville, Spain) to analyse ^{233}U in natural samples.”
Elena Chamizo, Mercedes López-Lora, Marcus Christl.
15th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry
Online (2021).
- “Advances in actinides radiochemistry at the Centro Nacional de Aceleradores”
Mercedes López Lora, Elena Chamizo, Grzegorz Olszewski, Isabelle Levy, Victoria Lérida, Mats Eriksson.
15th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry
Online (2021).

- “New insights into actinides sources to the Baltic Sea.”
Mercedes López-lora, Mats Eriksson, Grzegorz Olszewsk, Elena Chamizo, Per Törnquist, Håkan Pettersson, Marie Karlsson, Patric Lindahl, Victoria Lérida, José María López-Gutiérrez.
15th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry
Online (2021).
- “First results from the Zurich Sea Water (ZSW) U-236 intercomparison sample.”
Marcus Christl, Arne Bratkic, Núria Casacuberta, Maxi Castrillejo, Elena Chamizo, Laura Fantozzi, Karin Hain, Joze Kotnik, Mu Lin, Mercedes López-Lora, Jixin Qiao, Hans-Arno Synal, Anne-Marie Wefing.
15th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry
Online (2021).
- “Semitransparent ITO nanostructured electrodes synthesized by plasma and vacuum one-reactor configuration”
J. Castillo Seoane, J. Gil Rostra, V. López Flores, G. Lozano-Barbero, F.J. Ferrer et. al.
International Conference on Advances in Energy Harvesting Technology 2021
Ottawa (2021).
- “Enhanced stability of dopant-free crystalline Spiro-OMeTAD layers by vacuum sublimation”
A. Barranco, M.C. Lopez-Santos, J. Idigoras, F.J. Aparicio, J. Obrero-Perez, V. Lopez-Flores, L. Contreras-Bernal, V. Rico, F.J. Ferrer, J.P. Espinos, A. Borras, J.A. Anta, J.R. Sanchez-Valencia
Organic Materials in Perovskites-based Otoelectronic Devices (OrgMatPerPV)
Online (2021).
- “Compositional Gradients at the Nanoscale in Sub-stoichiometric Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering at Oblique Angles: a Case Study on SiOx Thin Films.”
A. Garcia-Valenzuela, A. M. Alcaide, V. Rico, F.J. Ferrer, G. Alcala, T.C. Rojas, R. Alvarez, A.R. Gonzalez-Elipe, A. Palmero
Iberian Vacuum online meeting Riva 2021
Online (2021).
- “Solid ^3He target for nuclear reactions: differential cross-section of $\text{H} + ^3\text{He}$ elastic scattering from 1.5 to 4.5 MeV”
F.J. Ferrer, A. Fernández, J.P. Fernández-García, D. Hufschmidt, B. Fernández-Martínez .
15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology
Online (2022).
- “Development of multi-layered CrAlN/Al₂O₃ tandem coating using HiPIMS for solar selective applications”
Miriam Sánchez-Pérez, T. Cristina Rojas, F. Javier Ferrer, Gabriel Lozano, Ángel Morales, Sonia Mato, Ramón Escobar-Galindo, Juan Carlos Sánchez-Lopez
18th International Conference on Plasma Surfaces Engineering
Erfurt (2022).

- “Transfer of I-129 to fish within the Fukushima and Chernobyl exclusion zones”
Teien H-C. Wada T., Kashparov V., Lopez-Gutierrez J.M., Garcia-Tenorio R., Hinton T., Levchuk S., Kashparova E., Protsak V., Salbu B.
ICRER Conference
Oslo (2022).

- “The role of metal mining in the circular economy: Radiation protection considerations from Spain’s experience ”
M. Herbella, J. Mantero, M. García-Talavera, G. Manjón, R. García-Tenorio, C. Marchán
NORM X Conference
Utrecht (2022).

- “Coal mining legacy and NORM radionuclides in a restored area from Southern Spain”
J. Mantero, A. Lopez-Fuentes, G. Manjón and R. García-Tenorio
NORM X Conference
Utrecht (2022).

- “Characterization of actinide particle exposure within biota using Synchroton X-ray based imaging techniques”
Lind, O.C.; Brede, D.A.; Byrnes, I.T); Garcia-Tenorio, R.; Janssens, K.; Nuyts, G.; Reinoso-Maset, E.; Rossbach, L.; Salbu, B.
MARC Conference
Hawai (2022).

- “Radioactivity in the Living Environment: A Need for Harmonization of Legislative Control”
Halmat Jalal Hassan, Suhairul Hashim, Nor Zati Abu Hanifah, Mohamad Syazwan Sanusi, David Bradley, Rafael García-Tenorio
International Conference on the Safety and Security of Radioactive Sources: Accomplishments and Future Endeavours (CN-295)
Viena (2022).

- “Non conventional applications of Accelerator Mass Spectrometry at CNA”
Rafael Garcia-Tenorio
European Nuclear Physics Conference
Santiago de Compostela (2022).

- “Improvement of Slow Freezing protocol for adult *Caenorhabditis elegans*.”
Encabo, Laura, Barroso, Fatima, Canatelli Mallat, Martina, Alcalá, Enrique, Risco, Isabel, et. al.
Joint Meeting of the Society for Cryobiology and Society for Low Temperature Biology (CRYO2022)
Dublin (2022).

- “Experimental proof of ice recrystallization inhibition on the *C. elegans* model based on a scalable warming approach by means of high intensity focused ultrasound.”
Enrique Alcalá, Laura Encabo, Fátima Barroso, Isabel Risco, Ramón Risco..
Joint Meeting of the Society for Cryobiology and Society for Low Temperature Biology (CRYO2022)

Dublin (2022).

6.3.2. Congresos Nacionales

- “Lanthanide vanadate based nanoparticles as contrast agents for high-field magnetic resonance imaging and X-ray computed Tomography”
E. Gómez-Gonzalez, N. O. Núñez, C. Caro, M.L. Gracia Martin, Y. Fernández-Alonso, J. M. de la Fuente, M. Balcerzyk, M. Ocaña.
Spanish Conference on Biomedical Applications of Nanomaterials Online (2021)
- “La ceca de Cartago en el tesoro de Tomares”
B. Gómez-Tubío, M.A. Respaldiza, S. Scrivano, R. Pliego, J. Moreno-Soto, E. García-Vargas, F. Chaves Tristán
XIV Congreso Ibérico de Arqueología
Tarragona (2022).
- “Nuevas técnicas de imagen en el CNA y sus aplicaciones en patrimonio cultural”
M.A. Millán-Callado, E. M. García-Zamora, M.A. Respaldiza, F.J. Ager, B. Fernández, C. Guerrero, M.C. Jiménez-Ramos, P. Martín-Holgado, Y. Morilla, D. Pascual-Álvarez, T. Rodríguez-González
XIV Congreso Ibérico de Arqueología
Tarragona (2022).
- “Estudios no invasivos mediante gammagrafías y CT aplicados a la intervención de los dos efebos romanos de Pedro Abad (Córdoba)”
Auxiliadora Gómez Morón, M.A. Millán-Callado, E. M. García-Zamora, Alberto Sánchez Canseco, M.A. Respaldiza, F.J. Ager, Sandra Isabel Asín Lozoya, Constanza Rodríguez Segovia, Reyes Ojeda Calvo
XIV Congreso Ibérico de Arqueología
Tarragona (2022).

6.4. Tesis Doctorales y Trabajo Fin de Máster/ Thesis and Final Master Projects

6.4.1. Tesis

- “Edge poloidal impurity asymmetry studies using gas puff based charge exchange recombination spectroscopy at the ASDEX Upgrade tokamak ”
Directores: Dra. Eleonora Viezzer y Dr. Javier Garcia Lopez
D. Diego José Cruz Zabala (Sobresaliente “Cum Laude” por unanimidad. Mención Internacional.)
Junio (2022).
- “Study and Characterisation of Semiconductor Radiation Detectors using the IBIC Technique”
Directores: Dra. María del Carmen Jiménez Ramos y Dr. Javier Garcia Lopez
D. Adrián García Osuna (Sobresaliente)

Diciembre (2022).

- “Biotic and Abiotic transformation processes”
Directores: Rafael García-Tenorio y Guillermo Manjón
D. José Antonio Galván Moreno (Sobresaliente “Cum Laude”)
Junio (2022).
- “²¹⁰Po: contaminante y trazador natural en compartimentos ambientales de las lagunas de Castillos y Briozzo en el departamento de Rocha.”
Directores: Rafael García-Tenorio y Laura Fornaro
Dña. Cristina Bañobre (Sobresaliente “Cum Laude”)
Julio (2022).
- “Simulaciones biofísicas mediante elementos finitos de procesos de criopreservación y recalentamiento en material biológico”
Director: Ramón Risco.
D. Pablo Barroso Rodríguez
Junio (2022).

6.5. Otros Méritos / Other Merits

- “Predicting the risk of death or vasospasm in a patient with a subarachnoid hemorrhage”
Juan José Egea Guerrero, Marcin Wojciech Balcerzyk
United States Patent US11344260B2 (2022)
- “DOSIMOEMS: DEVELOPMENT OF REAL-TIME DOSIMETER BASED ON MICRO-OPTO-ELECTROMECHANICAL SYSTEMS”
Consuelo GUARDIOLA SALMERÓN (CNRS/Université Paris-Saclay); Augusto MÁRQUEZ (IMB/CSIC); Xavier MUÑOZBERBEL (IMB/CSIC), María DEL CARMEN JIMÉNEZ-RAMOS (Centro Nacional de Aceleradores); Javier GARCÍA LÓPEZ (Universidad de Sevilla)
Patente Europea 21305315.0 (2021)
- “NATURAL AND ARTIFICIAL U IN THE ARCTIC OCEAN 233U/236U as a tool to identify U sources in the Western Arctic Ocean”
E. Chamizo, M. Christl, M. López-Lora, N. Casacuberta, A.M Wefing, T.C. Kenna
LIP Annual report 2021
- “U AND PU ISOTOPES IN NATURAL SAMPLES New results on 241Pu/239Pu and 233U/236U in IAEA reference materials”
E. Chamizo, M. López-Lora, M. Christl
LIP Annual report 2021

Estadísticas de uso de Aceleradores y Usuarios/ Accelerators Analytics and Users

Capítulo 7

Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios/ Accelerators Analytics and users.

7.1. Estadísticas de uso de las instalaciones del CNA/ CNA Facilities use Analytics.

El Centro Nacional de Aceleradores, CNA, es un centro mixto de la Universidad de Sevilla, Junta de Andalucía y CSIC. Se trata de una Instalación Científico-Técnica Singular, ICTS, dedicada a la investigación interdisciplinar y por tanto abierta a usuarios externos. Para ello se emplean 6 distintas instalaciones: un acelerador Tándem Van de Graaff de 3 MV, un Ciclotrón que proporciona protones de 18 MeV y deuterones de 9 MeV, un acelerador tipo Tándem Cockcroft-Walton de 1 MV, utilizado como espectrómetro de masas, un escáner PET/CT para personas, un nuevo sistema de datación por radiocarbono llamado MiCaDaS, y un Irradiador de 60Co.

La aplicación de estas 6 infraestructuras cubre campos tan variados como ciencias de materiales, impacto medioambiental, física nuclear y de partículas, instrumentación nuclear, tratamiento de imágenes médicas, investigación biomédica e imagen molecular preclínica o datación, diagnóstico por imagen médica en pacientes, datación por ^{14}C e irradiación en muestras de interés tecnológico y biológico, entre otras.

En este apartado se muestran estadísticamente los distintos usuarios de las instalaciones del CNA atendiendo a su origen institucional y geográfico en el bienio 2021/2022.

National Center of Accelerators, CNA, is a joint center of the University of Seville, Junta de Andalucía and CSIC. It is a Unique Scientific-Technical Facility, ICTS, dedicated to interdisciplinary research and therefore opens to external users. To do this, 6 different installations are used: a Van de Graaff 3 MV Tandem accelerator, a 18/9 MeV Cyclotron accelerator, an Accelerator 1MV Mass Spectrometer, a PET / CT scanner, a new radiocarbon dating system called MiCaDaS, and a 60Co Irradiator.

The application of these 6 infrastructures covers fields as diverse as material sciences, environmental impact, nuclear and particle physics, nuclear instrumentation, medical imaging, biomedical research and preclinical molecular imaging or dating, medical imaging in patients, ^{14}C and irradiation in samples of technological and biological interest, among others.

In this section, the different users of the CNA facilities are shown statistically according to their institutional and geographical origin in the 2021/2022 biennium.

Usuarios año 2022/ Users year 2022

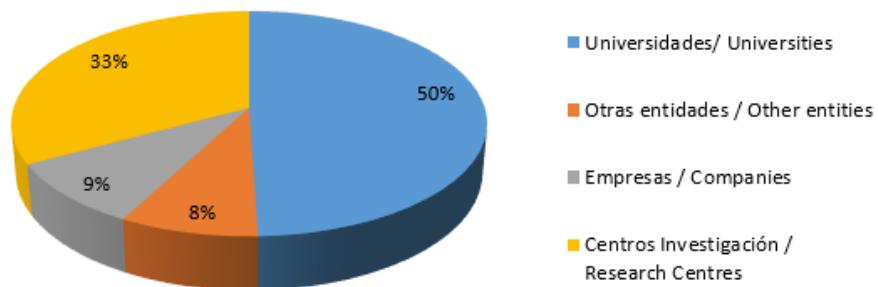


Figura 7.1: Usuarios según tipo de entidad / Users according to type of entity

Origen usuarios / Origin users

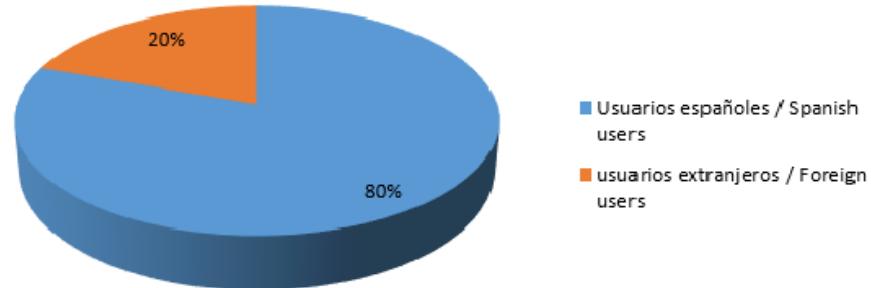


Figura 7.2: Usuarios según su origen / Users according to origin

USO DE INSTALACIONES / USE OF FACILITIES

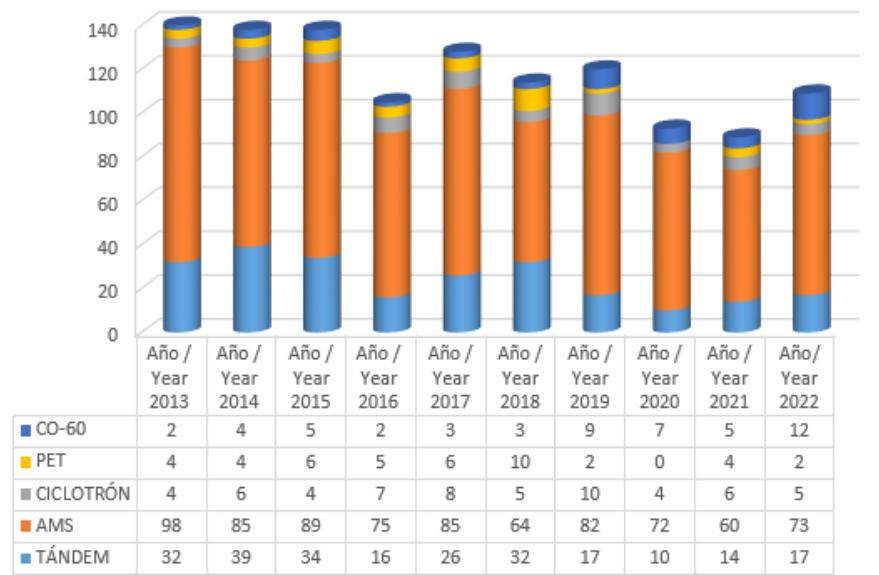


Figura 7.3: Evolución histórica del número de solicitudes de uso / Evolution of the number of beam time requests

Uso de las instalaciones/Use of facilities

Las solicitudes en estos años han sido las siguientes:

Uso de instalaciones año 2021/ Use of facilities 2021

- 1) Tándem: 14 solicitudes.
- 2) AMS(Incluye MICADAS): 60 solicitudes.
- 3) Ciclotrón: 6 solicitudes.
- 4) PET: 4 solicitudes.
- 5) Co-60: 5 solicitudes.

Uso de instalaciones año 2022/ Use of facilities 2022

- 1) Tándem: 17 solicitudes.
- 2) AMS(Incluye MICADAS): 73 solicitudes.
- 3) Ciclotrón: 5 solicitudes.
- 4) PET: 2 solicitudes.
- 5) Co-60: 12 solicitudes.

7.2. Usuarios de las Instalaciones del CNA/ CNA Facilities users.

A continuación se detallan los usuarios de las instalaciones del CNA en el 2021-2022 se resumen en los siguientes:

The CNA Facilities users, in 2021-2022, are shown in the following section.

Universidades / Universities:

- 1) Universidad de Sevilla.
- 2) Universidad del Desarrollo de Santiago de Chile.
- 3) Universidad Autónoma de Barcelona.
- 4) Universidad de Barcelona.
- 5) Universidad de Extremadura.
- 6) Universidad de París.
- 7) Universidad de Cádiz.
- 8) Universidad Carlos III Madrid.
- 9) Pontificia Universidad Católica del Perú.
- 10) Universidad de Oviedo.
- 11) Universidad Autónoma de Madrid.
- 12) Universidad Santiago de Compostela.
- 13) Universidad de Málaga.
- 14) Universidad de Extremadura.
- 15) Universidad de Murcia.
- 16) Universidad Lund.
- 17) Universidad de Huelva.
- 18) Universidad de Granada.
- 19) University of life Sciences.
- 20) University of Linköping.

Centros de Investigación / Research centers:

- 1) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (Csic).
- 2) Institució Milá Y Fontanals (Csic).
- 3) Instituto Ciencias Materiales de Sevilla. (Csic).
- 4) Instituto Física Corpuscular (Csic).
- 5) Nuclear Science and Technology Research Institute.
- 6) Instituto Nacional Técnica Aeroespacial (INTA).
- 7) Instituto Arqueología (Csic).
- 8) Estación Experimental del Zaidín (Csic).
- 9) CENIEH.
- 10) Instituto de Microelectrónica Sevilla (Csic).
- 11) Instituto Microelectrónica Barcelona (Csic)
- 12) IFCA (Csic).
- 13) CABIMER (Csic)
- 14) CMAM

Otras entidades / Others entities:

- 1) Sociedad de Ciencias Aranzadi.
- 2) Museo de Ciencias Naturales de Tenerife.
- 3) Gestión Cultural Larrate.
- 4) Ayuntamiento de Bornos.
- 5) “Particulares”.
- 6) CSN.
- 7) IAEA.

Empresas / Business:

- 1) Alter.
- 2) Geotecnia y Cimientos SL.
- 3) Grupo Ceperic SL.
- 4) Proyectos y Rehabilitaciones Kalam.
- 5) Tragsatec.
- 6) Icac SL.
- 7) Arquimea Ingeniería SL.
- 8) Anecoop. Sociedad Cooperativa.
- 9) Everis.
- 10) Air Bus.
- 11) Enresa.
- 12) Spacelab INTA.
- 13) TRAD.
- 14) Cesi Spa.

Calidad/ Quality.

Capítulo 8

Calidad/ Quality.

El Centro Nacional de Aceleradores tiene definida una clara y bien conocida política de calidad. Uno de los objetivos del CNA es la continua mejora con el fin de lograr altos niveles de calidad y excelencia en la gestión y ejecución de los proyectos tecnológicos y de investigación así como en la provisión de servicios.

Con el propósito de diseminar e implementar una Cultura de la Calidad en el CNA, ha sido creada la Unidad de Calidad, de acuerdo a la política de calidad y directrices establecidas por la Universidad de Sevilla, la Junta de Andalucía y el CSIC. Este compromiso con la Calidad nos ha permitido ser reconocido como un centro de referencia que responde a las necesidades actuales de la comunidad científica y la Sociedad en general.

El trabajo de esta unidad se centra en la implementación de los sistemas y herramientas de una gestión de calidad en los servicios generales y laboratorios del CNA. Otro de sus objetivos es el de garantizar la máxima fiabilidad de los procedimientos y los resultados de los análisis. Con el fin de asegurar la reproducibilidad de todos sus servicios, el CNA tiene establecidos y publicados los procedimientos en detalle.

El CNA ha obtenido y tiene implementadas las certificaciones estándar ISO 9001 e ISO 27001, además de la certificación en materia de Prevención de Riesgos según la OSHAS 18001.

Las normas ISO han sido desarrolladas por la organización internacional ISO para gestionar la calidad de las empresas e instituciones como el CNA para mejorar sus prácticas, rendimiento, y finalmente para alcanza el éxito.

La ISO 9001:2008 es una norma de gestión de calidad global, utilizada para establecer y actualizar el sistema de gestión de calidad de la organización (QMS). Esto permite a las organizaciones tanto de productos y servicios lograr los estándares de calidad que son reconocidos y respetados en todo el mundo.

La norma se basa en una serie de principios de gestión de calidad, incluyendo un fuerte enfoque en el cliente, la motivación y la implicación de la dirección, la aproximación al proceso y la mejora continua. Esto ayuda a asegurar que los clientes reciben, productos consistentes, de buena calidad y servicios, que a su vez trae muchos beneficios para el negocio.

El alcance de la norma ISO 9001 es: El Centro Nacional de Aceleradores dispone de un sistema de gestión de calidad conforme a la norma UNE-EN ISO 9001:2005 para la prestación del servicio de análisis de materiales con aceleradores de partículas mediante técnicas AMS (Accelerator Mass Spectrometry) y técnicas IBA (Ion Beam Analysis).

La norma ISO / IEC 27001:2005 es una norma de gestión de información de seguridad global, que se utiliza para establecer y certificar el sistema de gestión de seguridad de la información (SGSI). Se especifican claramente los procesos para permitir a una organización establecer, implementar, revisar y supervisar, gestionar y mantener un SGSI eficaz. Su aplicación da confianza a los clientes y proveedores de que la seguridad de información se toma en serio dentro de las organizaciones que la cumplen, porque tiene instaurados los procesos para hacer frente a las amenazas de seguridad de la información.

El alcance de la norma ISO 27001 es: Los sistemas de información que dan soporte a las actividades del Centro Nacional de Aceleradores relativas a las investigaciones y la tecnología aplicada para el diseño de instrumentación y las pruebas con aceleradores, tanto propias como externas según la declaración de aplicabilidad de edición 1.

Ambas normas ISO implican la comprobación de que el sistema funciona de tal modo que el CNA debe realizar auditorías internas para comprobar cómo funciona su sistema de gestión de la calidad. Dos organizaciones independientes diferentes (AENOR y BUREAU VERITAS) verifican y certifican anualmente que se cumple ambas normas.

CNA has defined a clear and well known quality policy. One of the objectives of CNA is the continuous improvement in order to achieve high levels of quality and excellence in the management and implementation of research and technological projects and the provision of services.

With the purpose of disseminating and implementing a quality culture at the CNA a Quality management Unit has been set up, according to the quality policy and the guidelines established by the University of Seville, Junta de Andalucía and CSIC. This commitment to quality has helped us to be recognized as a reference center that meets the current needs of the scientific community and society in general.

The effort of this Unit focuses on the implementation of systems and tools of quality management on general services and laboratories of the CNA, so as to ensure maximum reliability of the procedures and results of the analysis. In order to ensure the reproducibility of all services CNA has established and published detailed.

CNA has also implemented and obtained standard ISO certifications as ISO 9001 and ISO 27001, in addition to the certification in matters of Risk Prevention according to OSHAS 18001.

The ISO standards have been developed by ISO International organization to manage the quality of companies and institutions such as CNA to improve their practices, to enhance their performance, and finally to achieve success.

The ISO 9001:2008 is a global quality management standard, used to establish and to update the organization's quality management system (QMS). It helps both product and service organizations to achieve standards of quality that are recognized and respected throughout the world.

The standard is based on a number of quality management principles including a strong customer focus, the motivation and implication of top management, the process approach and continual improvement. It helps ensure that customers get consistent, good quality products and services, which in turn brings many business benefits.

ISO 9001 scope: Centro Nacional de Aceleradores for the following field of activities: Materials analysis services with particle accelerators using IBA (Ion Beam Analysis) and AMS (Accelerator Mass Spectrometry) techniques, has implemented and maintains a quality management system which fulfills the requirements of the standard ISO 9001:2008.

The ISO/IEC 27001:2005 is a global information security management standard, used to establish and certify the information security management system (ISMS). It clearly specifies the processes for enabling an organization to establish, implement, review and monitor, manage and maintain an effective ISMS. Its implementation will reassure customers and suppliers that information security is taken seriously within the organizations they deal with because the latter have in place state-of-the-art processes to deal with information security threats and issues.

ISO 27001 scope: Information systems that give support to Centro Nacional de Aceleradores activities involving investigations and the applied technology for hardware development and internal as well as external test with accelerators according to the statement of applicability ED.1.

Both ISO standards imply checking that the system works so that CNA must perform internal audits to check how its quality management system is working. Two different independent organizations (AENOR and BUREAU VERITAS) verify and certify annually that it is in conformity to the standards.

8.1. Componentes de la Unidad de Calidad/ Quality Unit Members.

- Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Coordinador de la Unidad de Calidad
- Dr. Celestino Ignacio Sánchez Angulo, Miembro
- D. Miguel Calderón Reyes, Miembro
- D. Francisco Calle Blanco, Miembro
- D^a. Isabel Gómez Martínez, Miembro
- Dra. Yolanda Morilla García, Miembro
- D. Juan Ignacio Peruchena Fernández, Miembro
- Dra. Elena Chamizo Calvo, Miembro
- Dra. Inés Ortega Feliu, Miembro