



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE
INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA



Trabajo Fin de Grado

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

Design of an underground nuclear waste storage facility in
Spain.

Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos

Autora: Marina Floranes Cuesta

Directora: Raquel Martínez Torre

Convocatoria: Julio 2024

A mi madre, que sé que estaría muy orgullosa de mí.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. ALCANCE Y OBJETIVOS.....	9
2.1. ALCANCE	9
2.2. OBJETIVOS.....	9
3. ESTADO DEL ARTE.....	10
3.1. TIPOS DE RESIDUOS NUCLEARES Y SU CLASIFICACIÓN	10
3.2. ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS NUCLEARES: CONCEPTOS Y TECNOLOGÍAS	10
3.3. LEGISLACIÓN Y REGULACIÓN EN ESPAÑA SOBRE RESIDUOS NUCLEARES	13
3.4. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EN EL DISEÑO DE ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS NUCLEARES.....	14
3.4.1. Residuos de baja actividad, baja y media actividad	14
3.4.2. Combustible gastado, residuos de alta actividad y residuos especiales..	16
3.5. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA	17
3.6. PROYECTOS Y PROPUESTAS ANTERIORES DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS NUCLEARES.....	20
3.6.1. Residuos de muy baja, baja y media actividad.....	20
3.6.2. Combustible gastado, residuos de alta actividad y residuos especiales..	22
3.7. REQUISITOS PARA LA INSTALACIÓN DE UN ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS NUCLEARES	24
3.7.1. Residuos de muy baja, baja y media actividad.....	25
3.7.2. Combustible gastado, residuos de alta actividad y residuos especiales: AGP	28
4. METODOLOGÍA.....	33
4.1. TIPO DE ALMACÉN A DISEÑAR.....	33
4.2. PASOS PARA LA REALIZACIÓN DEL DISEÑO	34
4.2.1. Paso 1: Fase de factibilidad	34
4.2.2. Paso 2: Fase de demostración	34
4.2.3. Paso 3: Fase de ejecución	34
4.2.4. Estado actual en España	34
4.3. RECOLECCIÓN DE DATOS Y FUENTES DE INFORMACIÓN	35
4.3.1. Recolección de datos.....	35
4.3.2. Fuentes de información.....	36
4.4. REQUISITOS Y CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO	37

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

4.4.1.	Selección del emplazamiento	37
4.4.2.	Diseño de la superficie	39
4.4.3.	Diseño de las galerías	40
4.4.4.	Áreas de almacén	41
5.	DISEÑO DEL ALMACÉN DE RESIDUOS NUCLEARES.....	42
5.1.	SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO ADECUADO.....	42
5.2.	DISEÑO CONCEPTUAL DEL ALMACENAMIENTO	45
5.2.1.	Accesos en superficie	45
5.2.2.	Accesos a excavación.....	46
5.2.3.	Áreas centrales	46
5.2.4.	Galerías	48
5.2.5.	Áreas de almacenamiento.....	50
5.3.	TECNOLOGÍAS Y MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN	53
5.3.1.	Excavación	53
5.3.2.	Cápsula de almacenamiento	53
5.3.3.	Sistema de hidratación	55
5.3.4.	Material de relleno y sellado	57
5.3.4.	Sistema de calefacción	58
6.	ASPECTOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD	61
6.1.	EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.....	61
6.1.1.	Objetivos del estudio de impacto ambiental	61
6.1.2.	Identificación de impactos	61
6.1.3.	Criterios de evaluación adoptados.....	66
6.1.4.	Definición de indicadores de impacto	67
6.1.5.	Matriz de valoración de impactos	68
6.1.6.	Conclusiones y medidas adicionales	73
6.2.	GESTIÓN DE RIESGOS Y SEGURIDAD EN EL ALMACENAMIENTO.....	75
6.2.1.	Objetivos de seguridad.....	75
6.2.2.	Concepto básico de seguridad	76
6.2.3.	Gestión de riesgos	77
6.3.	PROTECCIÓN RADIOLÓGICA Y SALUD PÚBLICA.....	78
6.3.1.	Principios generales de protección radiológica.....	78
6.3.2.	Indicadores de seguridad	79
6.3.3.	Protección radiológica individual en el AGP.....	80
6.3.4.	Salud pública.....	80

6.4.	CONCLUSIONES.....	80
7.	VIAVILIDAD ECONÓMICA Y FINANCIERA.....	81
7.1.	COSTOS ASOCIADOS AL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN	81
7.1.1.	Costos directos	81
7.1.2.	Costos indirectos	81
7.1.3.	Presupuesto.....	82
7.2.	FUENTES DE FINANCIAMIENTO Y MODELOS DE NEGOCIO	95
7.2.1.	Fondo para la financiación de las actividades del PGRR	95
7.2.2.	Fondo para la financiación de las actividades de I+D de Enresa.....	98
8.	CONCLUSIONES.....	100
9.	BIBLIOGRAFÍA	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación internacional de los residuos radiactivos OIEA (izquierda) y la clasificación española. Fuente OIEA.	10
Figura 2: Interior El Cabril. Fuente El Diario.	11
Figura 3: ATI Cofrentes. Fuente Revista Nuclear España.	12
Figura 4: Diseño ATC. Fuente CSN.	12
Figura 5: Esquema barreras AGP. Fuente CSN.	13
Figura 6: Instalaciones internacionales de almacenamiento definitivo para RBMA. Fuente MITECO.	15
Figura 7: Países con programas de repositorios geológicos. Fuente MITECO.	17
Figura 8: Organigrama del control institucional. Fuente MITECO.	19
Figura 9: Vista aérea El Cabril. Fuente El Diario de Córdoba.	21
Figura 10: Instalación complementaria para el almacenamiento de RBBA. Fuente The Objective.	22
Figura 11: Sistema de almacenamiento El Cabril. Fuente MITECO.	26
Figura 12: Bidones El Cabril. Fuente El Español.	27
Figura 13: Sistema multibarrera AGP. Fuente ENRESA.	29
Figura 14: Blindaje AGP. Fuente Jóvenes Nucleares.	31
Figura 15: Enfoque gradual y sistemático en el proceso de diseño del AGP. Fuente ENRESA.	34
Figura 16: Localización geográfica Hoja 123. Fuente IGME.	44
Figura 17: Posible emplazamiento.	45
Figura 18: Cápsula de almacenamiento de RAA. Fuente FEBEX.	54
Figura 19: Sobreenvase de blindaje radiológico para las capsulas de RAA. Fuente FEBEX.	55
Figura 20: Esquema general del sistema de control de calentadores (HCS). Fuente FEBEX.	60
Figura 21: Caracterización cualitativa de los impactos. Fuente Universidad de Cantabria.	70
Figura 22: Esquema de financiación de las actividades del PGRR. Fuente MITECO.	98
Figura 23: Participación en el desarrollo del 7º plan de I+D de Enresa. Fuente Enresa.	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de identificación de impactos (fase de construcción) 1/3.	65
Tabla 2: Matriz de identificación de impactos (fase de construcción) 2/3.	65
Tabla 3: Matriz de identificación de impactos (fase de construcción) 3/3.	66
Tabla 4: Matriz de identificación de impactos (fase de explotación).	66
Tabla 5: Matriz evaluación de impactos (fase construcción).	72
Tabla 6: Matriz evaluación de impactos (fase explotación).	72

1. INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de los residuos nucleares representa un gran reto para los países que emplean la energía nuclear como fuente de electricidad. En el panorama español, donde la energía nuclear posee un papel bastante controversial, una gestión segura y eficiente de dichos residuos ayudaría a atenuar la hostilidad de la población frente a la energía nuclear.

Actualmente, España tiene una fecha límite a partir de la cual comenzará con el desmantelamiento de todas las centrales nucleares, eliminando el papel de la energía nuclear en el mix energético español. Por ello, todos los residuos radiactivos presentes en estas instalaciones nucleares tendrán que ser almacenado en algún lugar.

Aunque España cuenta con un contrato con Francia por el cual Francia se hace cargo de almacenar los residuos radiactivos de alta actividad de España. Este contrato, al igual que la clausura de las centrales nucleares, también tiene un fin. Lo que conlleva la devolución de estos residuos a España.

El diseño de un almacén subterráneo de residuos nucleares se presenta como una solución ingenieril y ambiental válida para una gestión de residuos y una protección de la población a largo plazo.

En este trabajo se analizan las bases y aspectos cruciales para el diseño de un almacén subterráneo de residuos nucleares en el contexto español, tratando los aspectos técnicos, ambientales y económicos para su ejecución sin riesgos.

2. ALCANCE Y OBJETIVOS

2.1. ALCANCE

Este trabajo tiene la finalidad de realizar el diseño conceptual de un almacén geológico profundo en España, teniendo en cuenta varios detalles como las facetas técnicas, ambientales y económicas. Se enfocará detalladamente en; la infraestructura, tanto la superficial como la subterránea, la evaluación de impacto ambiental y la aproximación del presupuesto requerido para su construcción y mantenimiento.

2.2. OBJETIVOS

1. Diseño del AGP:

- Crear un diseño conceptual completo del AGP, incluyendo la disposición de las galerías, los accesos, las áreas de almacenamiento, los accesos, los talleres...
- Evaluar las características geológicas del emplazamiento y las tecnologías más apropiadas y avanzadas para almacenar de manera segura los residuos radiactivos.

2. Evaluación de impacto ambiental:

- Efectuar estudios y análisis para valorar el impacto del proyecto en el medio natural y humano.
- Identificar medidas de mitigación y manejo ambiental para minimizar los impactos negativos durante la construcción y operación del almacén.

3. Presupuesto y viabilidad económica:

- Estimar el presupuesto total necesario para la construcción, operación y mantenimiento del AGP.
- Evaluar la viabilidad económica del proyecto, considerando costos directos e indirectos y realizar un análisis aproximado de recuperación de la inversión.

Este proyecto busca garantizar un diseño y ejecución seguros, eficientes y sostenibles para la implementación del AGP, cumpliendo con las normativas vigentes ambientales y promoviendo la gestión responsable de los residuos radiactivos en España.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. TIPOS DE RESIDUOS NUCLEARES Y SU CLASIFICACIÓN

La Unión Europea clasifica los residuos nucleares según su almacenamiento definitivo, para ello se deben tener en cuenta los siguientes parámetros; periodo de semidesintegración (tiempo en el cual los isótopos radiactivos reducen su actividad a la mitad) y la proporción de emisores alfa que contienen [1].

Los residuos nucleares se clasifican en tres grupos:

1. Residuos de Muy Baja Actividad (RBBA): se incluyen dentro del grupo de los de baja y media actividad. Debido a su bajo contenido radiactivo demandan menos exigencias para su almacenamiento. Se declaran exentos después de un periodo menor de 5 años. Este tipo de residuos procede de desmantelamiento de las centrales nucleares [2].
2. Residuos de Baja y Media Actividad (RBMA): poseen un periodo de semidesintegración menor de 30 años. Pueden proceder de ropa de trabajo, herramientas y materiales utilizados en hospitales, laboratorios de investigación y centrales nucleares [2].
3. Residuos de Alta Actividad (RAA): proceden del combustible gastado de las centrales nucleares y de otros materiales con altos niveles de actividad [2].

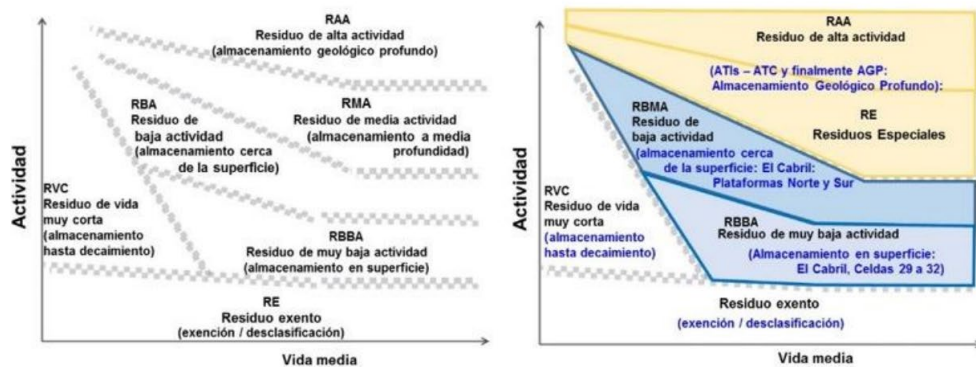


Figura 1: Clasificación internacional de los residuos radiactivos OIEA (izquierda) y la clasificación española. Fuente OIEA.

La mayor parte de los residuos nucleares en España son de baja y media actividad, un elevado porcentaje pertenece al desmantelamiento de centrales nucleares [2].

3.2. ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS NUCLEARES: CONCEPTOS Y TECNOLOGÍAS

La finalidad de la gestión de los residuos nucleares [3] es preservar la seguridad de los seres humanos y del medio ambiente.

Los residuos de baja y media actividad se almacenan de forma definitiva, en España, en el almacén centralizado de El Cabril (Córdoba), este tipo de almacenamiento cuenta con varias etapas [4]:

- Los residuos se almacenan en estado sólido en bidones o contenedores metálicos. Estos se fabrican en El Cabril.
- Los bidones (no compactables) se ingresan en contenedores de hormigón armado de alta calidad. En un contenedor se admiten 18 bidones.
- Una vez lleno el contenedor se inyecta mortero para crear un bloque compacto.
- Los contenedores compactos se trasladan a las celdas de almacenamiento, donde quedan definitivamente depositados. En cada celda se admiten 320 contenedores.
- En cuanto se completan las celdas, estas se cubren para proporcionar el aislamiento preciso.



Figura 2: Interior El Cabril. Fuente El Diario.

En relación con los residuos de alta actividad, estos cuentan con dos etapas previas a su almacenamiento definitivo [5]:

- Almacenamiento inicial: el combustible gastado se almacena en las piscinas de las centrales nucleares durante cuatro años.
- Almacenamiento intermedio: el combustible gastado puede mantenerse en la piscina de la central nuclear a medio o largo plazo (20 - 60 años) o puede traspasarse a contenedores secos como son el Almacén Temporal Individualizado (ATI) situado en la misma central o el Almacén Temporal Centralizado (ATC) independiente a la central.

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA



Figura 3: ATI Cofrentes. Fuente Revista Nuclear España.

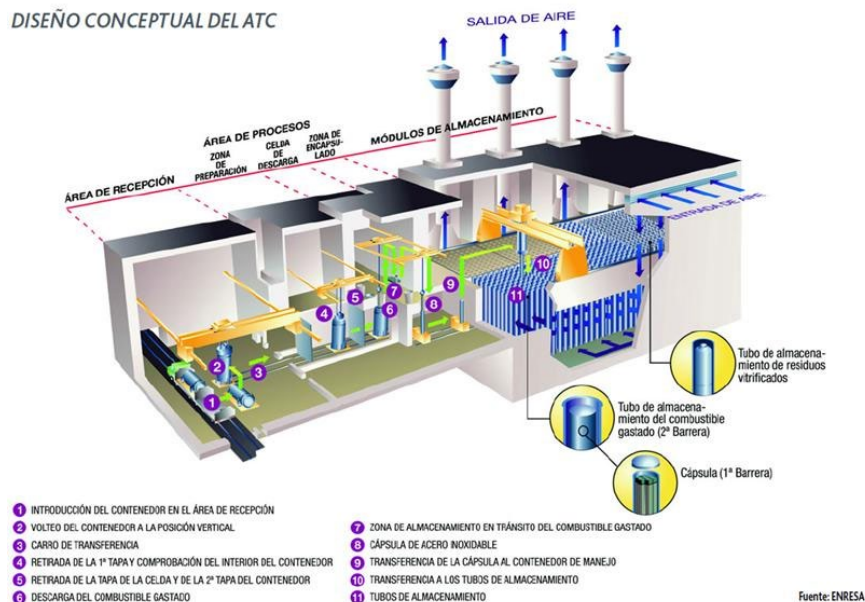


Figura 4: Diseño ATC. Fuente CSN.

- Almacenamiento definitivo: debido al largo periodo de actividad que poseen estos residuos, se emplea el Almacenamiento Geológico Profundo [5]. Este tipo de almacenamiento está compuesto por dos modelos de barreras; barreras artificiales y barreras naturales. Las barreras artificiales corresponden a las construcciones ingenieriles como las cápsulas metálicas de almacenamiento y los materiales de relleno y sellado. En cuanto a las barreras naturales, no son elaboradas por el ser humano pero si seleccionadas por este bajo una serie de requisitos esenciales para garantizar el correcto funcionamiento de las barreras artificiales y del complejo. Estas barreras representan formaciones geológicas, donde se ubican los repositorios, conformadas por formas geológicas, rocas y minerales [5].

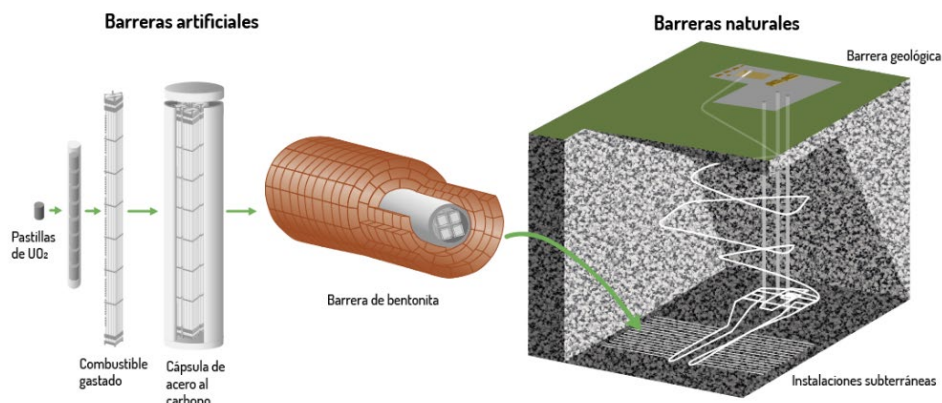


Figura 5: Esquema barreras AGP. Fuente CSN.

3.3. LEGISLACIÓN Y REGULACIÓN EN ESPAÑA SOBRE RESIDUOS NUCLEARES

La Ley 25/1964 [6], de 29 de abril, referente a la energía nuclear (LEN), estipula en su artículo 38 bis que la gestión de Residuos Radiactivos (RR) y Combustible Gastado (CG), así como el desmantelamiento y clausura de Instalaciones Nucleares (IINN), constituyen un servicio público esencial reservado a la titularidad del Estado. Se encarga a la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A., S.M.E. (Enresa) la gestión de dicho servicio público, cuyas actividades y sistema de financiación se encuentran actualmente regulados por el Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del CG y los RR. Además, la disposición adicional sexta de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, modificado por la Ley 11/2009, de 26 de octubre, sobre Sociedades Anónimas Cotizadas de Inversión en el Mercado Inmobiliario y declarada vigente por la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, establece el sistema de financiación de este servicio público, consistente en un sistema de cuatro tasas a cargo de los productores de RR.

El artículo 38 bis de la LEN [6] también establece que es responsabilidad del Gobierno definir la política de gestión de los RR, incluyendo el CG, así como el desmantelamiento y cierre de las IINN. Esto se logra mediante la aprobación del Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR), el cual será presentado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) después de recibir un informe del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y consultar a las Comunidades Autónomas (CCAA) en materia de ordenación del territorio y medio ambiente. Finalmente, este plan será reportado a las Cortes Generales para su consideración.

Además, el Real Decreto 102/2014 [6], emitido el 21 de febrero para asegurar una gestión responsable y segura del CG y los RR, especifica que en la elaboración del Plan se promoverá la participación pública. Este proceso se llevará a cabo conforme a lo establecido en la Ley 27/2006 del 18 de julio, que regula los derechos de acceso a la información, participación ciudadana y acceso a la justicia en temas ambientales, así como en la Ley 21/2013 del 9 de diciembre, relacionada con la evaluación ambiental.

Por otro lado, la Directiva 2011/70/Euratom del Consejo, fechada el 19 de julio de 2011, establece [6] un marco comunitario destinado a la gestión responsable y segura del CG y los RR. Esta directiva, que ha sido incorporada al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto 102/2014 del 21 de febrero, requiere que los Estados miembros desarrollen un programa nacional para implementar la política de gestión del CG y los RR.

Asimismo, esta Directiva establece que cada Estado miembro debe garantizar la implementación de dicho programa nacional, el cual abarcará todos los tipos de CG y RR dentro de su jurisdicción [6], así como todas las etapas de su gestión, desde su generación hasta su almacenamiento final. Además, se requiere que este programa nacional sea revisado y actualizado de forma periódica, teniendo en cuenta los avances científicos y tecnológicos pertinentes, así como las recomendaciones, lecciones aprendidas y buenas prácticas derivadas de los procesos de revisión entre pares contemplados en la propia Directiva.

Dentro del sistema de gestión de RR en España, el Plan de Gestión de Residuos Radiactivos (PGRR) representa el documento oficial que abarca las estrategias, acciones requeridas y soluciones técnicas a implementar a corto, medio y largo plazo. Este plan está diseñado para asegurar una gestión adecuada de los RR, así como el desmantelamiento y cierre tanto de IINN como de las Instalaciones Radiactivas (IIRR), además de otras actividades vinculadas [6]. Asimismo, el PGRR contempla las proyecciones económicas y financieras necesarias para llevar a cabo estas acciones.

Asimismo, el marco regulatorio establece que Enresa debe enviar al MITECO, durante el primer semestre de cada año, un análisis económico-financiero actualizado del costo de las actividades contempladas en el PGRR, así como la adaptación de los mecanismos financieros existentes a este costo [6]. De esta manera, las acciones planificadas en el PGRR y sus respectivos costos están sujetos a un proceso continuo de revisión y actualización, a menos que ocurran cambios significativos en las políticas y estrategias en los diversos aspectos del plan.

3.4. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EN EL DISEÑO DE ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS NUCLEARES

3.4.1. Residuos de baja actividad, baja y media actividad

A nivel global, la gestión definitiva de los RBMA [6] se considera un proceso industrialmente establecido, con numerosos ejemplos de sistemas de gestión en funcionamiento durante varias décadas. Varios países ya cuentan con instalaciones de almacenamiento definitivo o tienen planes para su construcción. Aunque el almacenamiento definitivo en instalaciones en la superficie o cercanas a ella es la estrategia común, algunos países, como Suecia, Finlandia, Corea, Hungría, Alemania, Suiza y Canadá, han optado o están considerando el almacenamiento definitivo en instalaciones a profundidades de entre 50 y 100 metros. El Centro de Almacenamiento de El Cabril sigue el primer enfoque, con barreras de ingeniería para los RBMA y trincheras para los materiales radiactivos de alta actividad (RBBA).

El Centro de Almacenamiento de El Cbril, que inició su operación en 1992, ha aprovechado en sus primeras fases la experiencia adquirida en instalaciones extranjeras con características similares, las cuales sirvieron como modelos de referencia. En la actualidad, El Cbril es reconocido a nivel internacional como un ejemplo de cómo abordar el almacenamiento definitivo de los RBMA y RBBA [6]. Esto ha generado un gran interés por parte de numerosas delegaciones extranjeras, que lo visitan, y su enfoque está siendo adoptado en el diseño y construcción de instalaciones en otros países.

En el futuro cercano, se espera que la situación internacional en cuanto a soluciones para los RBMA experimente cambios mínimos significativos. Aunque persisten algunos casos específicos por resolver en Alemania, Bélgica y Suiza, donde la implementación de sus instalaciones de almacenamiento se ha retrasado debido a preocupaciones sobre la aceptación pública, todo sugiere que en los próximos años aumentará el número de estas instalaciones en funcionamiento. Además, las instalaciones existentes evolucionarán y se adaptarán para satisfacer las necesidades operativas de la gestión de RBMA, optimizando así las capacidades técnicas y económicas [6]. Esto se refleja en el desarrollo y la construcción de nuevas celdas de almacenamiento en Francia, China y Japón, la ampliación de la capacidad de acceso para los recursos radiactivos de desmantelamiento en los silos-almacén en Suecia, y el diseño y construcción de instalaciones específicas para el almacenamiento permanente de RBMA y RBBA de desmantelamiento en Lituania, Bulgaria y Eslovaquia.

País	Tipo de almacenamiento definitivo	Localización	Estado
Alemania	Mina	Konrad	En construcción
Bélgica	Superficie	Dessel	En licenciamiento
Bulgaria	Superficie	Radiana	En construcción
Canadá	Caverna	Kincardine	En licenciamiento
Corea del Sur	Caverna	Wolseong	Operativo
Eslovaquia	Superficie	Mohovce	Operativo
Estados Unidos	Superficie	Richland (WA)	Operativo
	Superficie	Barnwell (SC)	Operativo
	Superficie	Andrews (TX)	Operativo
	Superficie	Clive (UT)	Operativo
Finlandia	Caverna	Olkiluoto	Operativo
	Caverna	Loviisa	Operativo
Francia	Superficie	La Manche	Clausurado
	Superficie	L'Aube	Operativo
Francia	Superficie	Morvilliers	Operativo
	Superficie	Morvilliers	Operativo
Hungria	Superficie	Püspökszilág	Operativo
	Caverna	Bátaapáti	Operativo
Japón	Superficie	Rokkasho Mura	Operativo
Lituania	Superficie	Visaginas	En construcción
República Checa	Superficie	Dukovany	Operativo
	Mina	Richard	Operativo
	Mina	Bratrstvi	Clausurado
Reino Unido	Superficie	Drigg	Operativo
	Superficie	Dounreay	Operativo
Suecia	Caverna	Forsmark	Operativo

Figura 6: Instalaciones internacionales de almacenamiento definitivo para RBMA.

Fuente MITECO.

3.4.2. Combustible gastado, residuos de alta actividad y residuos especiales

Hoy en día, existe un consenso generalizado a nivel internacional sobre la efectividad del AGP [6] como la opción más adecuada para la gestión permanente CG y los RAA.

Desde la aprobación 6ª PGR en 2006, se han registrado eventos significativos en los programas de almacenamiento geológico de los países líderes en esta estrategia [6].

En Finlandia, la entidad responsable de la gestión ha comenzado la excavación y edificación de un depósito geológico que se espera entre en funcionamiento alrededor del año 2025 [6]. Este proyecto será el primer depósito operativo en el mundo diseñado para RAA con generación de calor [6].

En Suecia, la compañía a cargo presentó la solicitud de permiso para construir su depósito geológico en el año 2022. Una vez que el municipio que albergará la instalación apruebe el proyecto, el siguiente paso será obtener la aprobación por parte del Gobierno [6].

Finalmente, Francia, habiendo designado un sitio específico, presentó su solicitud de construcción a principios del año 2023 [6].

Además, hay un grupo de países que han iniciado programas de selección de sitios, que están actualmente en curso, aunque aún no han identificado ubicaciones específicas para construir sus instalaciones permanentes. Canadá y el Reino Unido son ejemplos destacados dentro de este segundo grupo de países [6]. Ambos están involucrando activamente a las comunidades potencialmente interesadas en albergar un AGP en su territorio, mientras llevan a cabo una labor intensiva de investigación y planificación técnica [6].

Además, la implementación de la Directiva 2011/70/Euratom del Consejo, adoptada el 19 de julio de 2011 [6], ha avivado el interés de otros países europeos, ya sea con o sin CCNN, en la búsqueda de soluciones para la gestión definitiva de RAA y de vida larga a través de opciones geológicas en profundidad. En ciertos casos, especialmente en países con programas nucleares pequeños y territorios limitados, la opción de soluciones compartidas sigue siendo objeto de atención prioritaria, aunque se prevé que su implementación genere desafíos significativos en términos de aceptación pública.

Además de los esfuerzos dirigidos al almacenamiento definitivo de los RAA, varios países siguen investigando las posibilidades de utilizar tecnologías de separación y transmutación para lograr reducciones significativas en volumen y radiotoxicidad de estos residuos. Sin embargo, el progreso en estas áreas avanza gradualmente debido a los complejos requisitos tecnológicos y financieros asociados con el desarrollo de estos sistemas nucleares [6]. La estrecha relación entre la separación y la transmutación con los procesos de reprocesamiento, por un lado, y con las tecnologías avanzadas de generación nuclear, por otro lado, impulsa la participación de países con políticas nucleares sólidas y una infraestructura nuclear desarrollada en la investigación y desarrollo de estas tecnologías.

En cuanto a cómo las tecnologías de separación y transmutación afectan a la necesidad de instalaciones de almacenamiento definitivo, hay un consenso general entre los expertos y organismos internacionales de que estas tecnologías no eliminarán la necesidad de contar con almacenes geológicos en profundidad [6].

País	Programa actual	Laboratorio subterráneo
Alemania	En marcha proceso de selección de emplazamiento Selección de emplazamiento (previsto): 2031	
Bélgica	Investigación detallada en laboratorio subterráneo de Mol Estudios para el repositorio Propuesta de Plan de Búsqueda de Emplazamientos al Gobierno pendiente de decisión	Mol
Canadá	Inicio de proceso de designación de emplazamiento: 2010 Expresiones de interés con 21 comunidades: 2012 Reducción expresiones de interés a 5 comunidades: 2018 Selección de emplazamiento (previsto): 2024 Inicio operación (previsto): 2043	
Estados Unidos	Investigación viabilidad emplazamiento Yucca Mountain Recomendación del emplazamiento: 2002 Solicitud de licencia: 2008 Decisión de paralización del proyecto: 2010 Elección de emplazamiento (previsto): 2026 Finalización diseño y licenciamiento (previsto): 2042 Inicio de operaciones (estimado): 2048	Yucca Mountain
Finlandia	Investigación detallada en cuatro emplazamientos: 1983-2000 Aprobación gubernamental a la decisión en principio: 2000 Ratificación parlamentaria y designación de emplazamiento (Eurajoki): 2001 Inicio estudios laboratorio: 2006 Solicitada licencia construcción: 2012 Concedida autorización de construcción: 2015 Inicio de construcción instalaciones subterráneas: 2021 Entrada en operación (estimada): 2025	Onkalo (en operación, se integrará en el futuro repositorio)
Francia	Ley de investigación: 1991-2006 Inicio construcción laboratorio: 2000 Informe resultados: 2006 Emplazamiento designado: 2011 Solicitud de autorización de construcción del repositorio: 2023 Construcción (previsto): 2025-2035 (Primera fase) Inicio operaciones (estimado): 2035	Bure
Reino Unido	Programa revisado de designación de emplazamientos: 2018	-----
Suecia	Presentación emplazamientos voluntarios (7): 2001 Programa de investigaciones: 2001-2007 Propuesta de emplazamientos: 2007 Selección de emplazamiento (Östhammar): 2009 Solicitud autorización construcción: 2022 Aprobación del municipio: 2022 Decisión del Gobierno Inicio operaciones (previsto): 2033	Aspö
Suiza	Demostración de concepto: 2006 Inicio de Plan Sectorial: 2008 Selección emplazamiento 2022 Operación (previsto): 2050 para RBMA y 2060 para RAA/CG	Grimsel Mt. Terri

Figura 7: Países con programas de repositorios geológicos. Fuente MITECO.

3.5. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

España dispone de infraestructura y recursos en los campos administrativos, técnicos y económicos para gestionar los RR y el CG y, de igual manera para llevar a efecto el desmantelamiento y la clausura de las IINN [6].

En términos administrativos, la normativa que rige la gestión CG y los RR [6] se enmarca dentro del amplio y desarrollado marco legal y reglamentario que regula la energía nuclear en España, ajustado a los estándares regulatorios internacionales en constante evolución. Este marco establece las responsabilidades de los distintos actores involucrados, así como la asignación de funciones entre las diversas autoridades

competentes. Los protocolos fundamentales del marco normativo de la energía nuclear, los cuales especifican cómo se distribuyen las responsabilidades administrativas entre las autoridades pertinentes, son [6]:

- Procedimiento de autorización: La responsabilidad de otorgar las autorizaciones correspondientes a las IINN y a las IIRR, excepto en el caso de las IIRR de 2ª y 3ª categoría, recae en el MITECO, salvo que dicha competencia haya sido transferida a las Comunidades Autónomas (CCAA) que lo hayan solicitado. Para cualquier autorización relacionada con una instalación nuclear o radiactiva, es imprescindible contar con el informe del CSN, único organismo competente en seguridad nuclear y protección radiológica, independiente del Gobierno. Este informe, de carácter obligatorio, resulta vinculante en caso de ser negativo y en lo referente a los límites y condiciones establecidos en materia de seguridad nuclear y protección radiológica si es positivo. Asimismo, corresponde al MITECO aprobar tanto la Declaración Ambiental Estratégica como la Declaración de Impacto Ambiental relacionadas con los planes y proyectos de esta índole [6].
- Procedimiento normativo: La responsabilidad de aprobar los desarrollos reglamentarios de las leyes aprobadas por el Parlamento corresponde al Gobierno, siendo actualmente el MITECO el ministerio encargado de llevar a cabo la tramitación y elevar las propuestas normativas relacionadas con la energía nuclear. Cuando estas propuestas se refieren a aspectos que puedan afectar a la seguridad nuclear o la protección radiológica, la iniciativa la tiene el CSN, quien envía las propuestas al MITECO para su tramitación ante el Gobierno. El CSN tiene la facultad de establecer su propia normativa mediante la aprobación de Instrucciones, que son regulaciones técnicas relacionadas con la seguridad nuclear y la protección radiológica. Estas instrucciones se integran en el ordenamiento jurídico interno y son vinculantes para los sujetos afectados una vez notificadas o publicadas en el Boletín Oficial del Estado. El incumplimiento de estas normas está tipificado legalmente como infracción administrativa y es sancionable según el régimen sancionador de la LEN. Además, el CSN puede emitir Instrucciones Técnicas Complementarias, que son actos administrativos vinculantes destinados para garantizar el mantenimiento de las condiciones de seguridad de las instalaciones y actividades. Por último, el CSN emite Circulares y Guías, que son documentos técnicos e informativos respectivamente, y que no tienen carácter vinculante [6].
- Procedimiento de vigilancia y control: La competencia de analizar y valorar la seguridad nuclear y la protección radiológica de las IINN e IIRR, así como de inspeccionarlas, corresponde íntegramente al CSN, como único ente con competencia en seguridad nuclear y protección radiológica. En cuanto a otros ámbitos, como la seguridad física, los planes de emergencias y el impacto radiológico ambiental, se ejecutan en colaboración con las instituciones de otros departamentos ministeriales o autonómicos que también tienen autoridad en el campo[6].
- Procedimiento sancionador: la Dirección General de Política Energética y Minas

del MITECO es la encargada de dirigir los protocolos de sanción relacionados con las IINN y las IIRR, excepto en el caso de las instalaciones de 2ª y 3ª categoría cuya competencia haya sido transferida a las CCAA. Además, este organismo se encarga de proponer las penalizaciones correspondientes a la autoridad competente de acuerdo con la gravedad de la infracción. En situaciones que implican infracciones relacionadas con la seguridad nuclear o la protección radiológica, el CSN es quien propone al MITECO la apertura del expediente sancionador. En lo que concierne a la protección física, tanto el Ministerio del Interior como el CSN tienen la autoridad de sugerir la apertura de expedientes sancionadores por incumplimiento del marco normativo de energía nuclear. Además, el CSN tiene la facultad legal de enviar apercibimientos a los titulares, especificando las medidas correctivas, en ciertas circunstancias contempladas en la LEN. Si los titulares no atienden a estos avisos, el CSN puede imponer sanciones obligatorias según lo establecido en la legislación vigente [6].

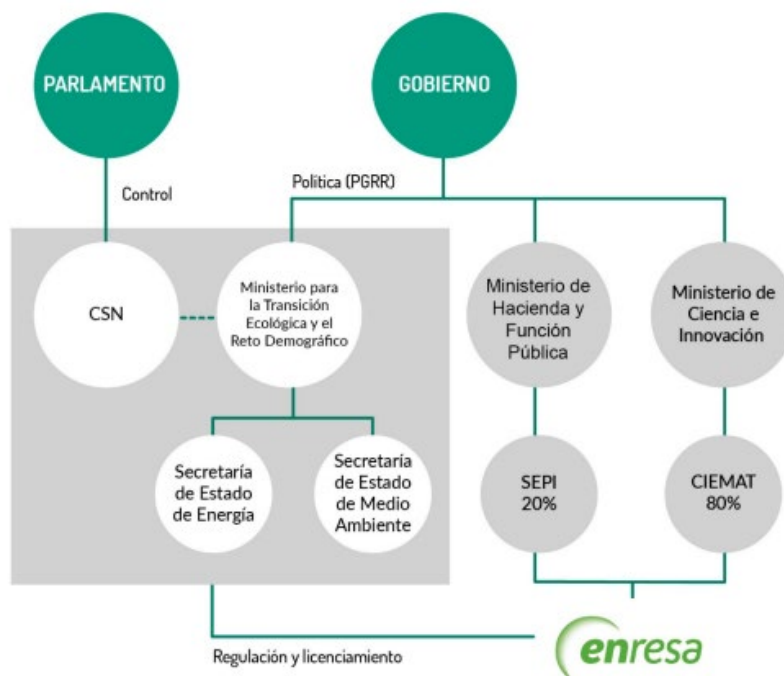


Figura 8: Organigrama del control institucional. Fuente MITECO.

En relación a los recursos técnicos y financieros para la gestión de los RR y el CG en España, desde 1984, esta responsabilidad corresponde a Enresa. El marco jurídico vigente dicta que la financiación de este servicio público se llevará a cabo mediante un sistema de contribuciones económicas a cargo de los productores de RR. En cuanto a los RBMA y los RBBA, existe un sistema de gestión ratificado, en el que destaca la Central de Almacenamiento de El Cabril, que sirve como instalación centralizada para el almacenamiento definitivo de estos tipos de residuos [6].

En cuanto al CG, se cuenta con infraestructuras para su almacenamiento temporal tanto en las piscinas de las CCNN como en ATIs dentro de estas mismas [6].

Además, se ha adquirido conocimiento en el programa de gestión definitiva para el CG/RAA en relación con la información de la geología española. Se ha analizado el diseño

conceptual de una instalación de un AGP en las tres litologías presentes en el país (granito, arcilla y sal), así como los relativos estudios de comportamiento y seguridad a largo plazo. Los resultados de estas investigaciones han sido incorporados a los PGRR desde 1987 [6].

En lo respectivo a la clausura y desmantelamiento de las IINN e IIRR, existe actualmente un sistema para desarrollar las operaciones indispensables, así como una descripción de los entes participantes en este proceso. Durante los últimos años, se ha recolectado una experiencia notable en este ámbito a través del desmantelamiento de múltiples instalaciones, como las plantas de tratamiento de mineral de uranio en Andújar (FUA), La Haba y Saelices el Chico. También se ha efectuado la restauración de explotaciones mineras, el desmantelamiento parcial de la Central Nuclear Vandellós I, la clausura de reactores de investigación (Argos y Arbi) y el desmantelamiento de varias instalaciones en el CIEMAT como parte del Proyecto Plan Integral de Mejora de las Instalaciones del CIEMAT (PIMIC). Actualmente y desde 2010, se está ejecutando el desmantelamiento de la CN José Cabrera [6].

La evolución y el continuo perfeccionamiento de este marco y de las acciones de Enresa demandan un monitoreo constante además de una participación activa en los programas de gestión de RR de organismos internacionales como la Unión Europea (UE), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Agencia de Energía Nuclear de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (NEA/OCDE) o la “International Nuclear Law Association” (INLA). También es fundamental mantener relaciones de colaboración con otras organizaciones que desempeñen funciones y programas pertinentes para Enresa [6].

3.6. PROYECTOS Y PROPUESTAS ANTERIORES DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS NUCLEARES

3.6.1. Residuos de muy baja, baja y media actividad

La ley en España establece que los materiales de este tipo [6] deben ser transferidos de su productor o poseedor a Enresa, independientemente de su forma o características. Además, la Administración puede intervenir y confiscarlos si es necesario, según lo establecido.

Con los procedimientos administrativos establecidos, se puede decir que España ha abordado de manera integral la gestión de estos RR, contando con un sistema de gestión equipado con las capacidades tecnológicas requeridas. Este sistema está configurado según las acciones de un grupo de agentes claramente identificados, que trabajan de manera organizada [6].

La gestión de los RR suministrada por Enresa a los operadores de IINN e IIRR sigue pautas técnico-administrativas de aceptación. Estas directrices están definidas en contratos tipo previamente autorizados la Dirección General de Política Energética y Minas, donde se establecen los estándares para aceptar los materiales radiactivos y determinar su acondicionamiento y almacenamiento posterior [6].

Los propietarios de instalaciones reguladas que producen RR deben tener la capacidad de administrarlos, y pueden hacerlo siguiendo las especificaciones técnicas establecidas por Enresa [6].

En este sistema, las IINN tienen la capacidad de procesar los recursos radiactivos, listas para prepararlos conforme a los requisitos de aprobación de Enresa para su almacenamiento en el Centro de Almacenamiento El Cabril. En el caso de las instalaciones radiactivas no nucleares, los productores entregan sus RR a esta empresa en la forma acordada, y es Enresa quien lleva a cabo las labores de procesamiento y preparación requeridas antes de su almacenamiento en El Cabril [6].



Figura 9: Vista aérea El Cabril. Fuente El Diario de Córdoba.

En esta instalación se cuentan con varias infraestructuras tecnológicas, que incluyen instalaciones para el acondicionamiento y preparación de RR. En el centro se lleva a cabo el tratamiento de los RR provenientes de IIRR, así como los recursos originados en intervenciones en instalaciones no sujetas a regulación nuclear. Además, se realizan algunos tratamientos adicionales sobre recursos radiactivos de IINN [6].

El Centro de Almacenamiento de El Cabril también cuenta con laboratorios para verificar la calidad y características de los RR, que son fundamentales para aceptar los diversos tipos de recursos radiactivos y para verificar sus atributos. Finalmente, la instalación dispone de capacidades para el almacenamiento temporal, talleres, laboratorios y sistemas auxiliares necesarios para su operación [6].

Para el almacenamiento permanente de los RBMA, se dispone de una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 50.000 m^3 para los recursos radiactivos acondicionados. Se han construido un total de 28 celdas de almacenamiento, de las cuales, hasta el 31 de diciembre de 2022, se han completado 22 [6].

En cuanto a los RBBA, la instalación adicional para su almacenamiento cuenta con autorización para cuatro celdas, con una capacidad total aproximada de 130.000 m^3 , las cuales se están construyendo conforme a las necesidades. En la actualidad, se ha

finalizado la sección 1 de la celda 29, y están operativas la sección 1 de la segunda de las celdas autorizadas, la celda 30, y la sección 2 de la celda 29 [6].



Figura 10: Instalación complementaria para el almacenamiento de RBBA. Fuente The Objective.

3.6.2. Combustible gastado, residuos de alta actividad y residuos especiales

Como se menciona en la introducción de la Directiva 2011/70/Euratom del Consejo, de 19 de julio de 2011 [6], que establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del CG y los RR, en la actualidad prevalece la idea ampliamente aceptada de que el AGP representa la opción más sostenible y segura como solución final para la gestión de los RAA y el CG.

Además, se exploran alternativas adicionales como la separación avanzada y la transmutación. Estas opciones implican inicialmente la separación de los actínidos minoritarios y luego, mediante el uso de diversos tipos de reactores o conjuntos subcríticos, la obtención de volúmenes reducidos de RAA, teóricamente de periodos más cortos. Sin embargo, esto conllevaría un aumento en el volumen de RE. Es importante tener en cuenta lo siguiente respecto a esta opción [6]:

- Esta opción busca teóricamente reducir el inventario tóxico de los RR a gestionar.
- Requiere de esfuerzos significativos de I+D, los cuales deben ser atendidos mediante una colaboración global. Se ha aprobado la construcción de un transmutador europeo, establecido en Bélgica.
- Aunque esta opción puede reducir el volumen de los RAA, aumenta el volumen de los RE. Por lo tanto, sigue siendo indispensable el AGP.
- Implica el reprocesamiento previo del CG, un tratamiento adicional y

considerables inversiones en instalaciones de transmutación, lo cual puede ser difícil de lograr a nivel nacional.

Desde 1985 se ha explorado la posibilidad del almacenamiento permanente en cuatro enfoques principales [6]:

1. El Plan de Búsqueda de Emplazamientos (PBE) [6], iniciado en 1985 y suspendido en 1996, proporcionó datos suficientes para confirmar la existencia de diversas formaciones geológicas en el subsuelo español, como granito, arcilla y, en menor medida, sal, que podrían ser adecuadas para albergar una instalación de almacenamiento. Estas formaciones se distribuyen ampliamente en el territorio nacional.
2. Se han elaborado diseños conceptuales de instalaciones de almacenamiento para cada tipo de formación geológica mencionada, con el objetivo de identificar similitudes y puntos en común entre ellos.
3. Se han llevado a cabo los ejercicios de Evaluación de la Seguridad para los diseños conceptuales de instalaciones de almacenamiento en granito y arcilla. En estos ejercicios se ha integrado el conocimiento obtenido de los trabajos y proyectos realizados en los diferentes Planes de Investigación y Desarrollo (I+D). Estos ejercicios han demostrado que los almacenes geológicos cumplen con los criterios de seguridad y calidad aplicables a este tipo de instalaciones.
4. Se han implementado una serie de Planes de I+D que han ido progresando y ajustándose al programa de gestión de CG y RAA de España. Estos planes han facilitado la adquisición de conocimientos técnicos y la formación de equipos de trabajo nacionales. Han participado en proyectos de investigación a nivel nacional e internacional, así como en proyectos de demostración en laboratorios subterráneos en el extranjero.

En los últimos años, se ha llevado a cabo una investigación significativa sobre tecnologías de separación y transmutación en diversas formas. Sin embargo, la magnitud de estos programas hace necesario participar en el ámbito internacional. La mayoría de los trabajos realizados son preliminares, centrados en la recopilación de datos básicos y en el análisis de viabilidad, y tienen un enfoque predominantemente teórico [6].

Tras los esfuerzos realizados durante el periodo de 1986 a 1996, que incluyeron un análisis exhaustivo de las formaciones geológicas adecuadas para albergar un emplazamiento del AGP, se ha elaborado un Inventario de Formaciones Favorables [6].

También se llevó a cabo la creación y evaluación de seguridad de diseños primarios y conceptuales genéricos para la instalación mencionada, adaptados para su uso en un medio hospedante tanto de tipo granito como de tipo arcilla. Estos avances establecerán una sólida base para las próximas fases del proceso, que incluyen la selección del emplazamiento y la implementación del AGP [6].

Al término del proceso y en conformidad con lo establecido en el 6º PGRR, en 2013 se

entregaron al Ministerio de Industria, Energía y Turismo los informes siguientes [6]:

- El informe sobre las opciones de gestión del CG y los RAA detalla las características, restricciones y requisitos de gestión del CG, además de presentar un conjunto de soluciones técnicamente viables que cumplen con los estándares de seguridad nacionales e internacionales. Examina los pros y contras de estas soluciones, teniendo en cuenta las opiniones de los organismos internacionales pertinentes, así como los aspectos económicos y sociopolíticos asociados.
- El informe sobre la viabilidad de las nuevas tecnologías, como la separación y la transmutación, proporciona una descripción detallada de los proyectos clave a nivel internacional y europeo en estos campos. Basándose en esta información, se identifican los principales desafíos que deben abordarse para lograr la implementación industrial de estas tecnologías. Además, se destacan las necesidades tecnológicas y económicas relacionadas con su desarrollo y aplicación.
- Proyectos básicos [6]:
 - Almacenamiento en formaciones arcillosas.
 - Almacenamiento en formaciones graníticas.

Ambos proyectos sintetizan y consolidan los resultados obtenidos por Enresa hasta el año 2004 en relación con la "Selección de emplazamiento", los "Diseños genéricos de repositorio" y las "Evaluaciones de Seguridad Asociadas", los cuales son elementos esenciales para la gestión definitiva del CG. Además, estos documentos detallan los resultados de I+D realizada en apoyo a las tres actividades mencionadas. Los proyectos básicos presentan los casos de almacenamiento en formaciones graníticas y arcillosas, considerados viables desde una perspectiva técnica, de seguridad y de costos [6].

- Este informe examina las experiencias de toma de decisiones relacionadas con la gestión del CG y los RAA en varios países de la OCDE. Se analizan las características más relevantes o comunes de los procesos de toma de decisiones para la selección de emplazamientos en diez países de la OCDE, así como en la Unión Europea y la Agencia de Energía Nuclear (NEA). El objetivo es identificar mecanismos de toma de decisiones que puedan resultar útiles para futuras iniciativas de las autoridades españolas [6].

Estos cuatro informes abarcan el conjunto de conocimientos, tecnologías y experiencia vinculados a la gestión permanente CG contemplado en el 6º PGRR. Constituyen la base sobre la cual se establecerá la estrategia de gestión a largo plazo [6].

3.7. REQUISITOS PARA LA INSTALACIÓN DE UN ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS NUCLEARES

3.7.1. Residuos de muy baja, baja y media actividad

3.7.1.1. Requisitos generales de seguridad

Se implementarán las medidas necesarias para garantizar una protección adecuada de las personas, la sociedad y el medio ambiente contra los peligros radiológicos y otros riesgos durante todas las fases del manejo de desechos radiactivos [7].

1. Garantizar la seguridad tanto inmediata como a largo plazo de las personas y el entorno natural es primordial. La protección inmediata no suele plantear desafíos particulares y se asemeja a la de otras instalaciones. Por otro lado, la protección a largo plazo se logra mediante un sistema de múltiples barreras diseñadas para asegurar la seguridad de manera diferida [7].
2. Después de un período máximo de trescientos años, se busca permitir el uso libre del sitio sin restricciones de naturaleza radiológica. Este plazo de trescientos años se toma de la normativa francesa como referencia, y representa un lapso durante el cual se puede garantizar de manera razonable que no se realizarán otras construcciones sobre el área de almacenamiento, y se supone que todas las estructuras de ingeniería estarán completamente degradadas [7].

3.7.1.2. Emplazamiento de las instalaciones

Los criterios fundamentales que se deben cumplir para ser considerado como un posible sitio de almacenamiento de residuos radiactivos son [8]:

- Ubicarse en una región estable, exenta de amenazas por riesgos y/o desastres naturales.
- Situarse sobre formaciones geológicas que presenten propiedades para restringir y supervisar las posibles migraciones de materiales contaminantes hacia el subsuelo.
- Permitir un monitoreo y control sencillos de los cambios ambientales a lo largo del tiempo.

Concretamente, los criterios operativos de la barrera geológica son [8]:

- Garantizar la integridad de todas las barreras artificiales, manteniendo condiciones de estabilidad físico-química, hidráulica, mecánica y geoquímica.
- Controlar y mantener un flujo de agua mínimo, constante y controlado dentro del depósito.
- Estar en una posición elevada por encima del tope máximo al que pueden llegar las aguas subterráneas, conocido como nivel freático.

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

- Retardar al máximo o detener la migración de radionucleidos entre el depósito y el entorno natural.
- Facilitar la construcción y operación efectivas del depósito.

Para satisfacer estos criterios operativos, las formaciones geológicas que albergarán el depósito deben poseer una serie de atributos, como [8]:

- Dimensiones considerables, profundidad significativa y extensión adecuada para proteger el depósito de influencias no deseadas, tanto naturales como humanas.
- Estabilidad tectónica, caracterizada por la ausencia de fallas activas, y actividad sísmica baja.
- Estructura geológica simple y poco compleja.
- Consistencia litológica uniforme en toda la formación.
- Baja permeabilidad y gradiente hidráulico reducido.
- Capacidad efectiva para retener y retrasar la migración de radionucleidos.
- Factibilidad de modelado y simulación del comportamiento mediante herramientas numéricas.

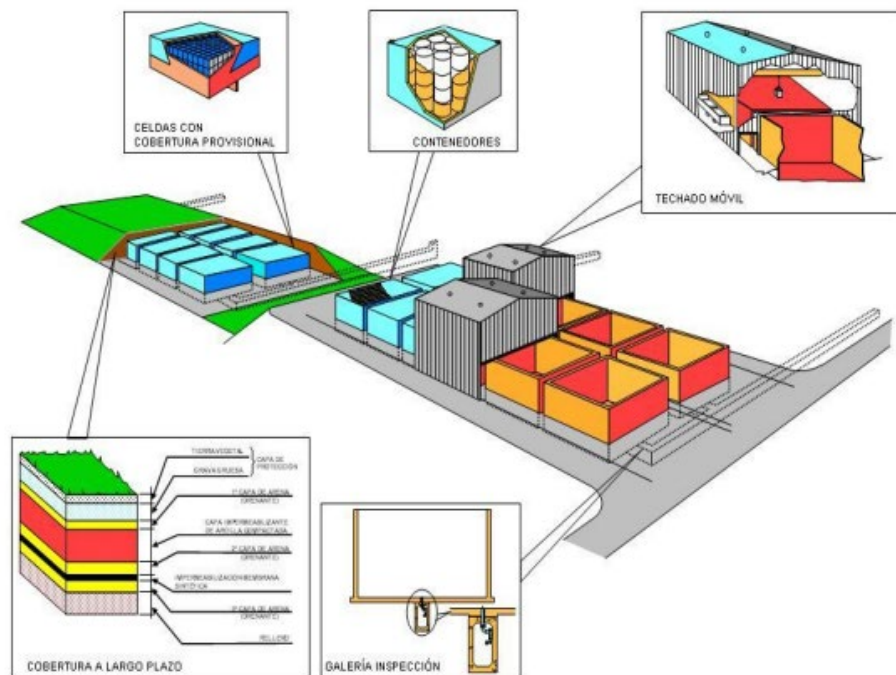


Figura 11: Sistema de almacenamiento El Cabril. Fuente MITECO.

3.7.1.3. Blindaje

Los recipientes más comunes son los bidones metálicos con tapa desmontable [9], diseñados de manera similar a los bidones utilizados para transportar petróleo, con una capacidad típica de 220 litros. Sin embargo, según las exigencias, también se pueden emplear bidones o cilindros de mayor tamaño, ya sean metálicos o de hormigón.

Estos contenedores se fabrican con láminas de acero al carbono galvanizado o pintado. Cuando se requiere una mayor protección, estos bidones pueden estar recubiertos interiormente con una capa de hormigón [9].



Figura 12: Bidones El Cabril. Fuente El Español.

3.7.1.4. Protección radiológica

El CSN se encarga de garantizar la seguridad en el ámbito nuclear y la protección contra la radiación en España. Sus funciones incluyen [10]:

- Analizar y certificar la seguridad de las instalaciones nucleares y radiactivas mediante inspecciones periódicas.
- Supervisar los niveles de radiación tanto dentro como fuera de estas instalaciones, evaluando su posible impacto en la salud humana y el medio ambiente, abarcando áreas como el aire, el agua, el suelo y los alimentos.

La ausencia de disposiciones legales españolas específicas sobre seguridad y protección radiológica a largo plazo ha sido compensada, especialmente en lo que respecta a la instalación de almacenamiento de residuos de baja y media actividad, de dos maneras. Por un lado, mediante la aplicación directa de los principios y criterios de seguridad emanados de organizaciones internacionales en esta materia [10].

Las medidas implementadas en España están directamente reflejadas en la Orden Ministerial del 5 de octubre de 2001, que otorga la autorización de explotación a la instalación de almacenamiento definitivo de residuos radiactivos de El Cabril, y están directamente relacionadas con los siguientes aspectos [11]:

1. La determinación, en términos de dosis o de riesgo radiológico, de los objetivos de protección de las personas a largo plazo, derivados de la disposición final de los residuos radiactivos.
2. La necesidad de aislar los residuos durante períodos de tiempo definidos mediante sistemas de barreras múltiples: la propia naturaleza del residuo (barrera química), las barreras de ingeniería y la barrera geológica.
3. La importancia de analizar el comportamiento de la instalación a largo plazo durante el proceso de autorización de las instalaciones de almacenamiento de residuos radiactivos y cuantificar las consecuencias radiológicas para poder compararlas con los objetivos radiológicos aceptables.
4. La implementación de períodos de tiempo máximos para garantizar que la radiactividad de los residuos radiactivos haya disminuido hasta valores que permitan la liberación segura de los emplazamientos en las instalaciones de disposición final.
5. La consideración, en el análisis de seguridad a largo plazo, tanto de los fenómenos de ocurrencia natural como de los escenarios que podrían ser causados por la intrusión humana (advertida o inadvertida).
6. El diseño de las instalaciones considera la posibilidad de recuperar los residuos radiactivos almacenados si las circunstancias lo aconsejan.
7. La evaluación de la seguridad toma en cuenta las incertidumbres asociadas al comportamiento a largo plazo de los sistemas de almacenamiento y a las actividades humanas, así como su previsible evolución.
8. Es necesario asegurar una trazabilidad completa de las distintas etapas de gestión de los residuos, incluido su almacenamiento definitivo, para garantizar tanto técnica como legalmente la persistencia de la memoria histórica sobre estas actividades.

3.7.2. Combustible gastado, residuos de alta actividad y residuos especiales: AGP

3.7.2.1. Requisitos generales de seguridad

En la estrategia de seguridad y protección radiológica, es fundamental manejar y aislar adecuadamente los desechos radiactivos altamente activos para prevenir la liberación de sustancias radiactivas a la biosfera en concentraciones peligrosas, hasta que su descomposición natural las vuelva inofensivas. Por lo tanto, se requiere garantizar la protección radiológica siguiendo los principios establecidos en directrices

internacionales, que se basan en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, específicamente en el documento ICRP 122 [12].

Debido a las propiedades del combustible gastado y los residuos radiactivos de alta actividad, es crucial asegurar su aislamiento durante extensos periodos de tiempo, que van desde cientos de miles hasta un millón de años. Esto debe lograrse sin depender de un mantenimiento continuo del sistema de almacenamiento ni de la implementación de medidas activas para mantener la seguridad. Esta responsabilidad con las generaciones futuras implica garantizar que los residuos estén confinados de manera segura sin intervención humana constante para mantener su integridad y seguridad a lo largo del tiempo [12].

3.7.2.2. Selección del emplazamiento

La seguridad del almacenamiento geológico profundo a largo plazo se fundamenta en el concepto de "multibarrera", donde la barrera geológica juega un papel crucial [13]. Esta barrera no solo afectará el funcionamiento de otras barreras, sino que también proporcionará un elemento de seguridad definitivo a largo plazo.

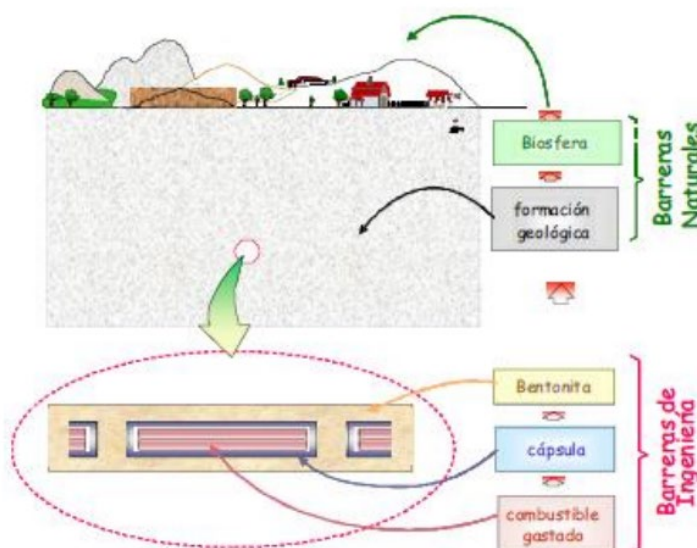


Figura 13: Sistema multibarrera AGP. Fuente ENRESA.

Los criterios fundamentales que una formación geológica debe cumplir para ser considerada como un posible sitio de almacenamiento de residuos radiactivos son [13]:

- Ubicarse en una región estable, exenta de amenazas por riesgos y/o desastres naturales.
- Situarse sobre formaciones geológicas que presenten propiedades para restringir y supervisar las posibles migraciones de materiales contaminantes hacia el subsuelo.
- Permitir un monitoreo y control sencillos de los cambios ambientales a lo largo

del tiempo.

Concretamente, los criterios operativos de la barrera geológica son [13]:

- Garantizar la integridad de todas las barreras artificiales, manteniendo condiciones de estabilidad físico-química, hidráulica, mecánica y geoquímica.
- Controlar y mantener un flujo de agua mínimo, constante y controlado dentro del depósito.
- Retardar al máximo o detener la migración de radionucleidos entre el depósito y el entorno natural.
- Facilitar la construcción y operación efectivas del depósito.
- Proteger el depósito contra intrusiones humanas.

Para satisfacer estos criterios operativos, las formaciones geológicas que albergarán el depósito deben poseer una serie de atributos, como [13]:

- Dimensiones considerables, profundidad significativa y extensión adecuada para proteger el depósito de influencias no deseadas, tanto naturales como humanas.
- Estabilidad tectónica, caracterizada por la ausencia de fallas activas, y actividad sísmica baja.
- Estructura geológica simple y poco compleja.
- Consistencia litológica uniforme en toda la formación.
- Baja permeabilidad y gradiente hidráulico reducido.
- Capacidad efectiva para retener y retrasar la migración de radionucleidos.
- Factibilidad de modelado y simulación del comportamiento mediante herramientas numéricas.

Existe una amplia variedad de formaciones geológicas que pueden satisfacer estos criterios, si bien las más comunes debido a su prevalencia y extensión son: granitos, arcillas y sales [13].

1. Granitos: Presentan una baja permeabilidad y solubilidad muy reducida, junto con una capacidad de retención variable. Son resistentes a la alteración química y mecánica, y suelen exhibir estabilidad tectónica. Además, tienen una conductividad térmica moderada, lo que garantiza una excavación estable. Son altamente resistentes a la erosión y permiten un transporte de agua en fracturas por advección, donde las sustancias disueltas se desplazan junto con el agua

debido a gradientes hidráulicos [13].

2. Sales: Se caracterizan por tener una permeabilidad y porosidad muy bajas, con una alta conductividad térmica. Presentan escasa o nula fracturación y una naturaleza plástica que les otorga propiedades autosellantes. Son de fácil excavación y su capacidad de retención es limitada, permitiendo un movimiento de tipo difusivo [13].
3. Arcillas: Con una permeabilidad extremadamente baja y una capacidad de retención muy alta, las arcillas destacan por su alta o media plasticidad y capacidad de autosellado. Tienen una conductividad térmica baja y baja corrosividad. Aunque su excavación es sencilla, requieren estructuras de soporte. Presentan poca fracturación y el movimiento del agua se produce por difusión, donde el agua no se desplaza pero los iones disueltos sí lo hacen debido a gradientes de concentración [13].

3.7.2.3. Blindaje

Los desechos se depositan en recipientes de acero al carbono, diseñados para resistir la corrosión y otros tipos de deterioro. Estos recipientes actúan como una barrera protectora durante la fase inicial, cuando ocurre la mayoría de los procesos de descomposición de los productos radiactivos. La bentonita (arcilla de grano fino), un material de relleno y sellado, se utiliza para proteger el recipiente, reducir el flujo de agua y crear un entorno químico que ralentiza y disminuye la liberación de radionucleidos [12].

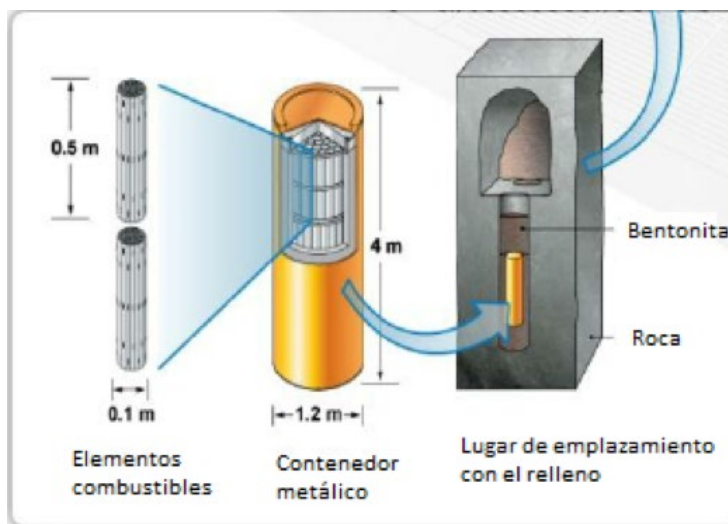


Figura 14: Blindaje AGP. Fuente Jóvenes Nucleares.

3.7.2.4. Protección radiológica

Durante la deposición, se utilizará una escotilla de protección radiológica al colocar el contenedor en el orificio de deposición, hasta que se coloquen los bloques

amortiguadores sobre él. Esto garantiza la protección contra la radiación durante la deposición [14].

El escudo radiológico tiene como objetivo proteger a quienes trabajan en el depósito final, ya que la radiación gamma y de neutrones no tiene un alcance suficiente para salir de la instalación [14].

Una persona que pase por una estación de ventilación donde se ventila el aire del depósito final recibirá aproximadamente la misma dosis de radiación que una persona dentro de la instalación. No se esperan consecuencias para la salud debido a la exposición a la radiación [14].

4. METODOLOGÍA

4.1. TIPO DE ALMACÉN A DISEÑAR

El propósito de este trabajo es desarrollar el diseño de un Almacén Geológico Profundo en suelo granítico.

El diseño de un AGP en España se justifica por las siguientes razones:

1. Necesidad de gestión del CG: España produce RAA como resultado de su actividad nuclear con el fin de producir electricidad. Estos residuos son altamente radiactivos y necesitan ser gestionados de manera diferente a los RBMA y RBBA. Un AGP proporciona una solución segura y responsable para su gestión a largo plazo [6].
2. Protección del medio ambiente y la salud pública: La gestión inadecuada de este tipo de residuos podría presentar un impacto severo sobre el medio ambiente y la salud humana. Por ello, un AGP al localizarse a una gran profundidad, ofrece la protección de toda una barrera geológica que evita la liberación de radionucleidos al medio ambiente [13].
3. Cumplimiento de regulaciones: España está comprometida en un marco legislativo tanto nacional como internacional en cuanto a la gestión de los RR. Por tanto, el diseño y la construcción del AGP se rigen también bajo este marco legal en el que se describen las prácticas más avanzadas y seguras para la gestión final de los RR.
4. Seguridad a largo plazo: El AGP está diseñado para garantizar la seguridad de los RR a lo largo de períodos de tiempo geológicamente significativos. La selección del emplazamiento adecuado, el diseño de las barreras de ingeniería y la implementación de medidas de control y monitoreo contribuyen a proporcionar una seguridad para las generaciones futuras [12].
5. Responsabilidad y sostenibilidad: La construcción de un AGP manifiesta la promesa de España, en cuanto a la sostenibilidad, con el manejo seguro de sus RR y su participación en la protección ambiental y social a largo plazo. Representa el compromiso intergeneracional de proteger el medio ambiente y a las generaciones futuras.

En resumen, es necesaria la construcción de un AGP en España ya que en algún momento, España se tendrá que hacer cargo de sus propios RAA, por ello, este tipo de almacenamiento es el más efectivo, además, este diseño está muy comprometido con la protección del medio ambiente, la salud pública y las generaciones posteriores ya que este tipo de almacén tienen un periodo de miles de años.

4.2. PASOS PARA LA REALIZACIÓN DEL DISEÑO

4.2.1. Paso 1: Fase de factibilidad

En este primer paso se define el concepto de almacenamiento, se lleva a cabo un análisis teórico donde se evalúa la posibilidad técnica y económica del diseño mediante trabajo de oficina [13].

4.2.2. Paso 2: Fase de demostración

Durante la etapa de demostración, se elabora el "diseño básico" o "diseño de referencia", mediante pruebas prácticas que incluyen ensayos de laboratorio o de campo para evaluar la factibilidad del diseño y realizar correcciones a posibles deficiencias detectadas [13].

4.2.3. Paso 3: Fase de ejecución

Durante la fase de ejecución, se lleva a cabo la definición de el "diseño aplicado", donde se perfeccionan los detalles finales del diseño en un entorno geológico real [13].

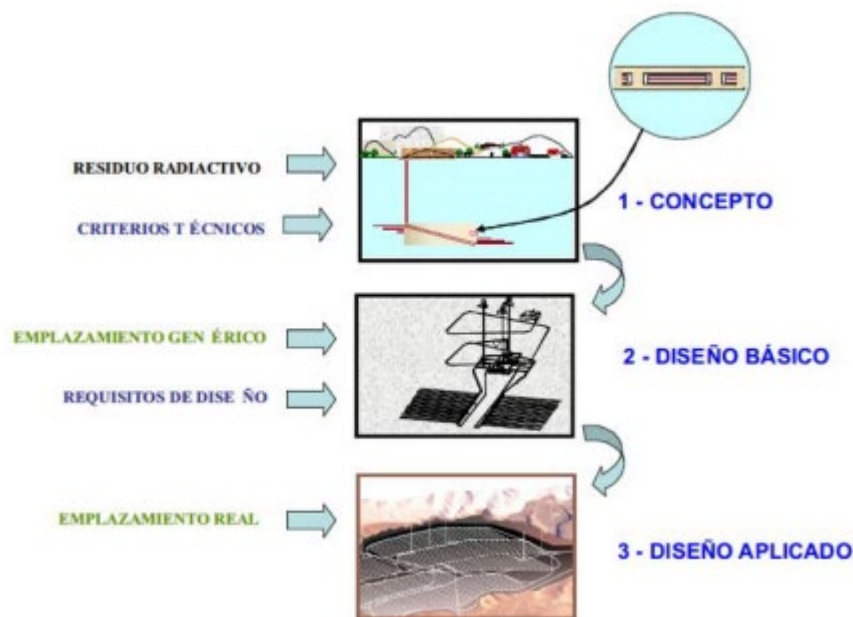


Figura 15: Enfoque gradual y sistemático en el proceso de diseño del AGP. Fuente ENRESA.

4.2.4. Estado actual en España

Enresa ha avanzado antes de la pausa del programa de alto nivel para establecer un "diseño básico".

Para finalizar el diseño del concepto de referencia (según quedó establecido en 2004),

es necesario profundizar en las siguientes actividades [13]:

- Examinar detalladamente los dos principales tipos de arcilla identificados (plástica y consolidada), y buscar un sitio para investigar sobre el granito.
- Desarrollar el diseño de la cápsula de almacenamiento.
- Seleccionar la bentonita adecuada para la barrera de arcilla.
- Diseñar el método de colocación de las cápsulas y construir la barrera de arcilla.

4.3. RECOLECCIÓN DE DATOS Y FUENTES DE INFORMACIÓN

El diseño de un AGP requiere de la combinación de varios métodos científicos y operaciones para garantizar la seguridad a largo plazo. En los siguientes apartados se enumeran los elementos fundamentales y las fuentes de información primordiales de este proceso.

4.3.1. Recolección de datos

4.3.1.1. Caracterización geológica

La primera etapa en el diseño de un almacén geológico profundo es la caracterización detallada del sitio geológico [13]. Esto incluye:

1. Estudios geofísicos: Utilización de procedimientos para mapear la estructura subterránea.
2. Muestreo de rocas y suelos: Obtención de muestras de rocas y suelos para analizar posteriormente con el fin de valorar propiedades como la porosidad, permeabilidad y composición mineralógica.

4.3.1.2. Evaluación de riesgos sísmicos y volcánicos

Es determinante evaluar la estabilidad sísmica y volcánica del emplazamiento seleccionado [15].

1. Historial sísmico: Registros históricos de actividad sísmica en la región, incluyendo magnitudes y frecuencias de los sucesos.
2. Estudios volcánicos: Análisis de actividad volcánica pasada y potencial futura, basados en la historia geológica y la cercanía a zonas volcánicas activas.

Como España es una región con muy baja sismicidad y con nula actividad volcánica, exceptuando las islas volcánicas, este apartado no se ha tenido en gran consideración.

4.3.1.3. Datos socioeconómicos y culturales

La aceptación social y el impacto sobre la población local son aspectos muy significativos. Es importante considerar [14]:

1. Censos y estadísticas demográficas: Información sobre la población local, distribución demográfica y tendencias de crecimiento.
2. Estudios socioculturales: Investigación sobre la cultura, tradiciones y valores de las localidades afectadas.
3. Consulta a la población: Recolección de opiniones de la población sobre el proyecto con el fin de determinar las preocupaciones y sugerencias de estos.

4.3.1.4. Datos regulatorios y normativos

Cumplir con las normativas y regulaciones locales, nacionales e internacionales es fundamental. Las fuentes de información clave incluyen [6]:

1. Legislación nacional: Seguir las normativas vigentes referentes al almacenamiento de los RR.
2. Organizaciones Internacionales: Directrices y estándares de organizaciones como la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA).
3. Documentos Regulatorios: Licencias, permisos y otros documentos emitidos por autoridades regulatorias.

4.3.2. Fuentes de información

En los siguientes apartados se enumeran algunos de los sitios y recursos más destacados para obtener la información necesaria:

4.3.2.1. Instituciones geológicas nacionales e internacionales

1. Instituto Geológico y Minero de España (IGME):
 - Proporciona información geológica detallada, mapas y estudios de suelos y aguas subterráneas.

4.3.2.2. Organizaciones internacionales

1. Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA):
 - Proporciona guías, estándares y estudios sobre el almacenamiento de residuos radiactivos.

4.3.2.3. Bases de datos y publicaciones científicas

1. Foro Nuclear:

- Entidad de naturaleza civil la cual defiende los intereses de la industria nuclear española y desempeña un papel relevante como interlocutor en el diálogo sobre temas nucleares.

4.3.2.4. Autoridades de regulación nuclear y ambiental en otros países

1. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) de España

- Garantizar la seguridad de los empleados, la comunidad y el entorno frente a los daños ocasionados por las radiaciones ionizantes, asegurando que las instalaciones nucleares y radiactivas sean gestionadas de manera segura por sus propietarios. Asimismo, establecer medidas preventivas y correctivas ante posibles emergencias radiológicas, independientemente de su causa.

2. Gobierno de España – MITECO

- El PGRR es el instrumento a través del cual el Gobierno define su estrategia sobre la gestión de residuos radiactivos, abordando aspectos como el tratamiento del combustible nuclear agotado y el cierre de las instalaciones nucleares. Dentro de este plan se contempla el programa nacional destinado a implementar la política de gestión del combustible nuclear agotado y los residuos radiactivos, en cumplimiento con lo dispuesto en la Directiva 2011/70/Euratom del Consejo, del 19 de julio de 2011, que establece un marco común para la gestión responsable y segura de estos materiales.

4.3.2.5. Consultoras y Empresas Especializadas

1. Enresa

- Empresa pública encargada de gestionar la recolección, tratamiento, preparación y almacenamiento de los desechos radiactivos generados en cualquier ubicación dentro del territorio nacional español.

4.4. REQUISITOS Y CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO

4.4.1. SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

4.4.1.1. Formación alojante

Desde el punto de vista estructural, la formación geológica que alberga el repositorio es un granito no foliado que aflora en la superficie y tiene una composición granítica-granodiorítica. Este tipo de granitos son comunes en el Macizo Ibérico y se caracterizan por su extensión superficial, que abarca más de 100 kilómetros cuadrados, y una

profundidad que alcanza más de 5 kilómetros. Dadas estas dimensiones significativas, no es necesario considerar formaciones geológicas adyacentes para el diseño del repositorio [15].

4.4.1.2. Nivel freático

Las fluctuaciones del nivel freático oscilan entre 0 y 30 metros, con cambios estacionales máximos de alrededor de 5 metros. Se establece un gradiente hidráulico regional del 2% [15].

4.4.1.3. Propiedades hidrogeológicas

La temperatura promedio anual en la superficie del sitio genérico es de 13 °C [15].

4.4.1.4. Propiedades hidrogeológicas

La variación de la conductividad hidráulica con respecto a la profundidad se modela utilizando una función de escalón con un cambio brusco a los 200 metros. Se asume que la conductividad hidráulica de la zona de fractura subhorizontal es diez veces mayor que la de las zonas de fracturas de segundo orden a la profundidad del almacenamiento [15].

Respecto a la porosidad cinemática del macizo rocoso, para el sitio genérico se contempla un rango de variación entre 0,01 y 0,001 %, por debajo de los 200 metros de profundidad.

Los parámetros adoptados para el sitio genérico son los siguientes [15]:

- Densidad: 2.630 Kg/m³.
- Módulo de Young: 72.800 MPa.
- Coeficiente de Poisson: 0,31.
- Resistencia a la compresión: 140 MPa.
- Resistencia a la tracción: 8,5 MPa.
- Conductividad térmica: 3,56 W/m °C.
- Coeficiente lineal de expansión térmica: 20×10^{-6} /°C (25-250 °C).
- Calor específico: 750 J/Kg °C.
- Gradiente geotérmico: 0,35°C/10m.

Se considera un valor genérico para el gradiente geotérmico de 0,35 °C/10 m, lo que implica una temperatura en la roca a 500 metros de profundidad de aproximadamente

30 °C, comenzando desde una temperatura promedio en la superficie de 13 °C [15].

4.4.2. Diseño de la superficie

Las instalaciones de superficie del AGP están claramente divididas en dos áreas según su clasificación radiológica [15]:

4.4.2.1. Zona convencional

Designada como área de libre acceso. Esta zona comprende las instalaciones necesarias para los servicios generales del repositorio y los servicios auxiliares de apoyo a la operación de las instalaciones subterráneas. Se subdivide en tres grandes áreas:

1. Área de servicios generales, donde se ubican los edificios que proporcionan servicios generales al repositorio [15]:
 - Edificio de seguridad y control de accesos.
 - Edificio de administración.
 - Edificio de información.
 - Edificio de área social.
 - Edificio de primeros auxilios.
 - Infraestructura e instalaciones auxiliares.
2. Área de suministros externos, donde se encuentran las instalaciones para la recepción, almacenamiento y transformación de los suministros externos del repositorio (agua, electricidad, combustibles, etc.) [15]:
 - Subestación eléctrica.
 - Tanques de combustible.
 - Sistema de protección contra incendios.
3. Área de servicios de apoyo interno, donde se ubican diversos edificios que respaldan las operaciones en las instalaciones subterráneas [15]:
 - Talleres generales.
 - Almacenes generales.
 - Infraestructura del pozo de servicio.

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

- Escombrera.
- Preparación y/o almacenamiento de materiales para relleno, sellado y sostenimiento.

4.4.2.2. *Zona reglamentada*

Esta área comprende las instalaciones donde se manipulan los contenedores de transporte, los residuos o las cápsulas de almacenamiento. Se subdivide en dos grandes áreas [15]:

1. Área de recepción de vehículos, donde los vehículos de transporte de contenedores ingresan y salen de la instalación, y que incluye [15]:
 - Edificio de seguridad y control de accesos.
 - Talleres de material móvil.
 - Área de maniobras.
 - Infraestructura del pozo principal.
2. Planta de encapsulado [15], donde los residuos son transferidos desde los contenedores de transporte a las cápsulas de almacenamiento definitivo.

4.4.3. **Diseño de las galerías**

Desde las áreas centrales se extienden las galerías hacia las áreas de almacenamiento. Estas galerías pueden ser utilizadas para el acceso o para la ventilación [15].

4.4.3.1. *Galerías de acceso*

1. Galería principal [15]: Facilita el transporte de los bultos de residuos desde el área central hasta la galería de almacenamiento, y permite la maniobrabilidad de los equipos necesarios para las actividades de manejo de los bultos de residuos. Además, sirve como vía de circulación para materiales y equipos de relleno y sellado. A través de esta galería, se canaliza el aire fresco desde el área central de almacenamiento hasta las áreas de almacén.
2. Galería de servicio [15]: Facilita el desplazamiento de los equipos requeridos para excavar y acondicionar las galerías de almacenamiento, así como el transporte de materiales y equipos de relleno y sellado. Esta vía también sirve para el flujo del aire fresco desde el área central.

4.4.3.2. *Galerías de ventilación*

1. Galería de ventilación del almacén [15]: Sirve principalmente como vía de

retorno para la ventilación del área de almacenamiento.

2. Galería de ventilación de excavación [15]: Cumple principalmente la función de ser el punto de retorno para la ventilación del área de excavación.

4.4.4. Áreas de almacén

El área de almacenamiento se divide en módulos, cada uno compuesto por una serie de galerías de almacenamiento y sus respectivos tramos direccionales. Esta modularidad facilita el almacenamiento en retirada, simplifica las tareas de relleno y sellado, y permite realizar el almacenamiento en etapas. El diseño de los módulos se adapta a las características geológicas del entorno y a la cantidad de residuos a manejar. Las galerías de almacenamiento de los RAA se disponen perpendicularmente a las galerías direccionales y tienen secciones pequeñas. Estas galerías permiten el almacenamiento permanente de las cápsulas de acuerdo con el concepto seleccionado, rodeadas de un material de sellado adecuado que actúa como barrera [15].

5. DISEÑO DEL ALMACÉN DE RESIDUOS NUCLEARES

5.1. SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO ADECUADO

La selección de un emplazamiento adecuado para un AGP es un proceso complejo que requiere la consideración de múltiples los múltiples factores expuestos y redactados anteriormente. La Hoja 123 del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) ha sido identificada como una posible localización debido a sus características geológicas específicas [16].

La Hoja 123 del IGME, perteneciente a la zona de Puertomarín en Lugo, presenta en la parte izquierda una geología predominada por formaciones ígneas, principalmente granito con una composición granítica-granodiorítica [17].

MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA

Escala 1:50.000



Instituto Geológico
y Minero de España

PUERTOMARÍN

123

07-08

LEYENDA

DOMINIO DEL "DOMO DE LUGO"	
CUATERNARIO	9
TERCIARIO	8
CAMBRICO	16
PRECAMBRICO	17
DOMINIO DEL "OLLO DE SAPO"	
CUATERNARIO	9
TERCIARIO	8
SILURICO	10
ORDOVICIO	11
MEDIO	12
INFERIOR	13
PRECAMBRICO	14
DOMINIO ESQUISTOSO DE GALICIA CENTRAL Y OCCIDENTAL	
CUATERNARIO	9
TERCIARIO	8
PRECAMBRICO-SILURICO	10

ROCAS GRANÍTICAS HERCINICAS

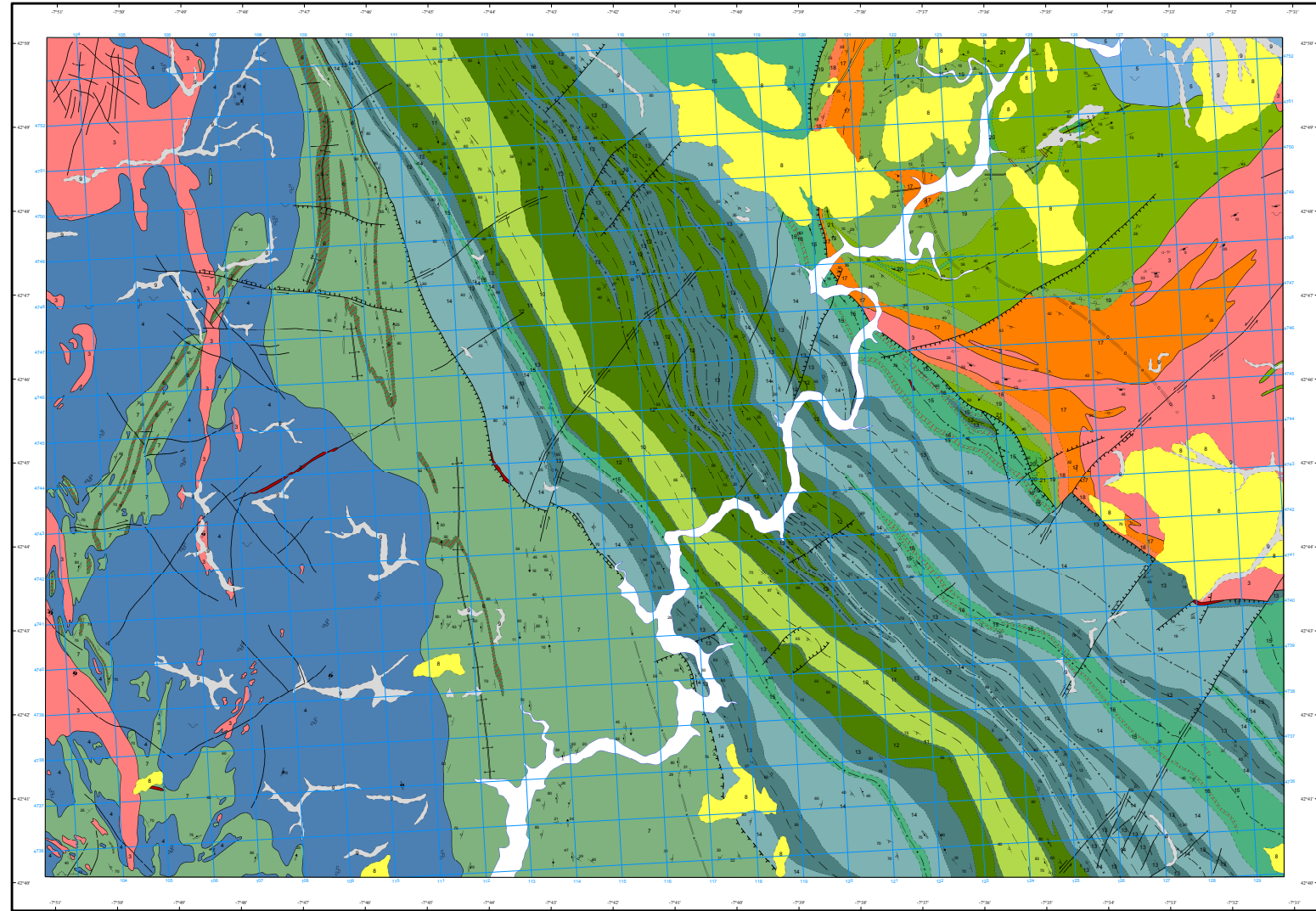
5	6
7	8
9	10

ROCAS FILOANANAS POSTECTONICAS

1	2
3	4

SIMBOLOS CONVENCIONALES

-----	Contacto concordante	-----	Contacto concordante supuesto
-----	Contacto discordante	-----	Contacto intrusivo
-----	Falla conocida	-----	Falla supuesta
-----	Falla con indicación de hundimiento	-----	Falla con indicación de hundimiento sup.
-----	Falla con indicación de movimiento dextrógiro	-----	Falla con indicación de movimiento levógiro
-----	Falla con indicación de hundimiento dextrógiro	-----	Falla con indicación de hundimiento levógiro
-----	Anticlinal de 1ª fase Hercinica	-----	Sinclinal de 1ª fase Hercinica
-----	Antiforma de fase 2	-----	Antiforma de 3ª Fase
-----	Síntoma de 2ª Fase Hercinica	-----	Estratificación invertida
-----	Estratificación	-----	Primera esquistosidad subvertical
-----	Primera esquistosidad	-----	Esquistosidad de crenulación S2
-----	Esquistosidad de crenulación S3	-----	Esquistosidad subvertical en rocas graníticas
-----	Esquistosidad en rocas graníticas	-----	Esquistosidad vertical S1 en zonas de cisalla
-----	Esquistosidad de cisalla S1	-----	Esquistosidad S1 de río
-----	Orientación de megacristales en granito	-----	Línea de intersección horizontal
-----	Línea de intersección	-----	Línea de estramiento horizontal
-----	Línea de estramiento	-----	Línea de intersección de fase 2
-----	Cartera activa	-----	Cartera inactiva



Área de Sistemas de Información Geocientífica

Escala 1:50.000



Proyección y Cuadrícula UTM. Elipsoide Internacional. Huso 29

NORMAS, DIRECCIÓN Y SUPERVISIÓN DEL I.G.M.E.
AÑO DE REALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLOGICA: 1980
Autores : J. R. Martínez Catalán (I.G.M.S.A.)
R. Fernández Rodríguez-Arango (I.G.M.S.A.)
A. Naval Balbín (I.G.M.S.A.)
Dirección y supervisión : A. Huerfano Rodríguez (IGME)

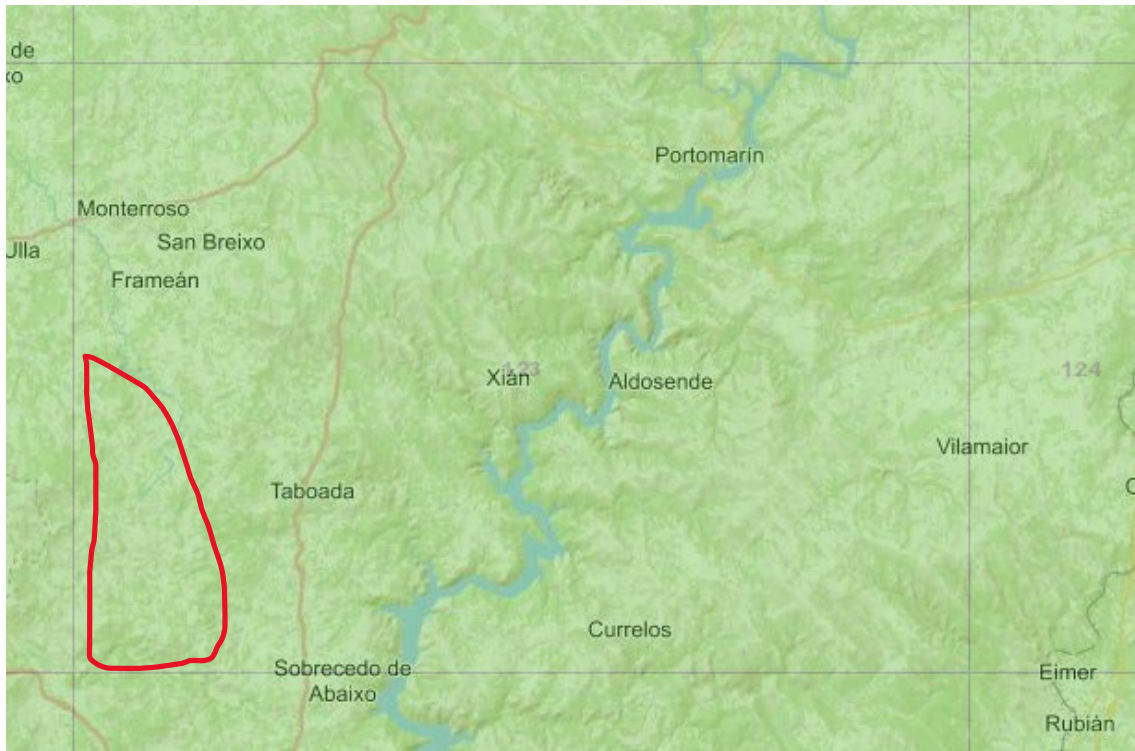


Figura 16: Localización geográfica Hoja 123. Fuente IGME

El emplazamiento seleccionado se encuentra entre los pueblos de Bemil, Serén y Pacios, en Galicia, debido, principalmente, a su idónea geología, además, es una zona caracterizada por su baja densidad poblacional y escasas áreas protegidas.

En primer lugar, la geología de la región es mayoritariamente granítica. Las formaciones graníticas son conocidas por su alta estabilidad y durabilidad a largo plazo, lo que es importante para la seguridad de un AGP. Estas características garantizan que las estructuras construidas sean robustas y perduren a lo largo del tiempo, minimizando el riesgo de filtraciones o colapsos. La capacidad de las formaciones graníticas para retardar la migración de radionúclidos también es un factor decisivo en la selección de esta ubicación.

Por otro lado, la zona entre Bemil, Serén y Pacios se caracteriza por ser un área mayoritariamente despoblada. Este factor es favorable ya que se minimiza el impacto social y los riesgos asociados a la proximidad de un almacén de este tipo en cuanto a la salud pública y el rechazo de la población. Esta extensa zona vacía también agiliza y simplifica las operaciones durante la construcción.

Finalmente, la ausencia de áreas protegidas en la región es otro punto a favor ya que la presencia de reservas naturales, parques nacionales u otras áreas protegidas podría obstaculizar e incluso restringir el desarrollo de un proyecto de estas características debido a la exigencia de preservar la biodiversidad y los medios existentes en la zona. La ausencia de tales restricciones en el emplazamiento seleccionado permite continuar con este proyecto sin lidiar con disputas debido a las normativas vigentes que protegen la biodiversidad y los ecosistemas existentes.

En resumen, la combinación de una geología granítica, una amplia zona vacía y la ausencia de áreas protegidas hacen de la región entre Bemil, Serén y Pacios un emplazamiento ideal para la posterior construcción de un AGP. Esta selección no solo garantiza la seguridad y efectividad del almacenamiento, sino que también minimiza el impacto ambiental y social, cumpliendo con los criterios técnicos y normativos necesarios para un proyecto de esta envergadura.



Figura 17: Posible emplazamiento.

5.2. DISEÑO CONCEPTUAL DEL ALMACENAMIENTO

5.2.1. Accesos en superficie

5.2.1.1. Acceso del residuo

El acceso en pendiente facilita la circulación rodante (incluyendo el transporte de las cápsulas de almacenamiento con volquete) entre la zona reglamentada de las instalaciones de superficie y el área de almacenamiento subterráneo. Se compone de seis tramos de 700 metros de longitud, con una inclinación del 12%, conectados por tramos curvos sin pendiente y con un radio de curvatura de 60 metros. La rampa tiene una sección transversal circular de 6 metros de diámetro útil y se extiende aproximadamente a lo largo de 5.200 metros. La excavación se realiza mediante una máquina topera [15].

5.2.1.2. Acceso principal (Pozo principal)

Esta estructura presenta una sección circular con un diámetro efectivo de 4 metros y una longitud de 535 metros. Su capacidad de carga está diseñada para soportar hasta 15 toneladas. La excavación se realiza mediante un sistema de realce [15].

5.2.2. Accesos a excavación

5.2.2.1. Acceso de servicio (Pozo de servicio)

Tiene un diámetro útil de 4 metros y se extiende a lo largo de 535 metros [15].

5.2.2.2. Acceso de ventilación (Pozo de ventilación)

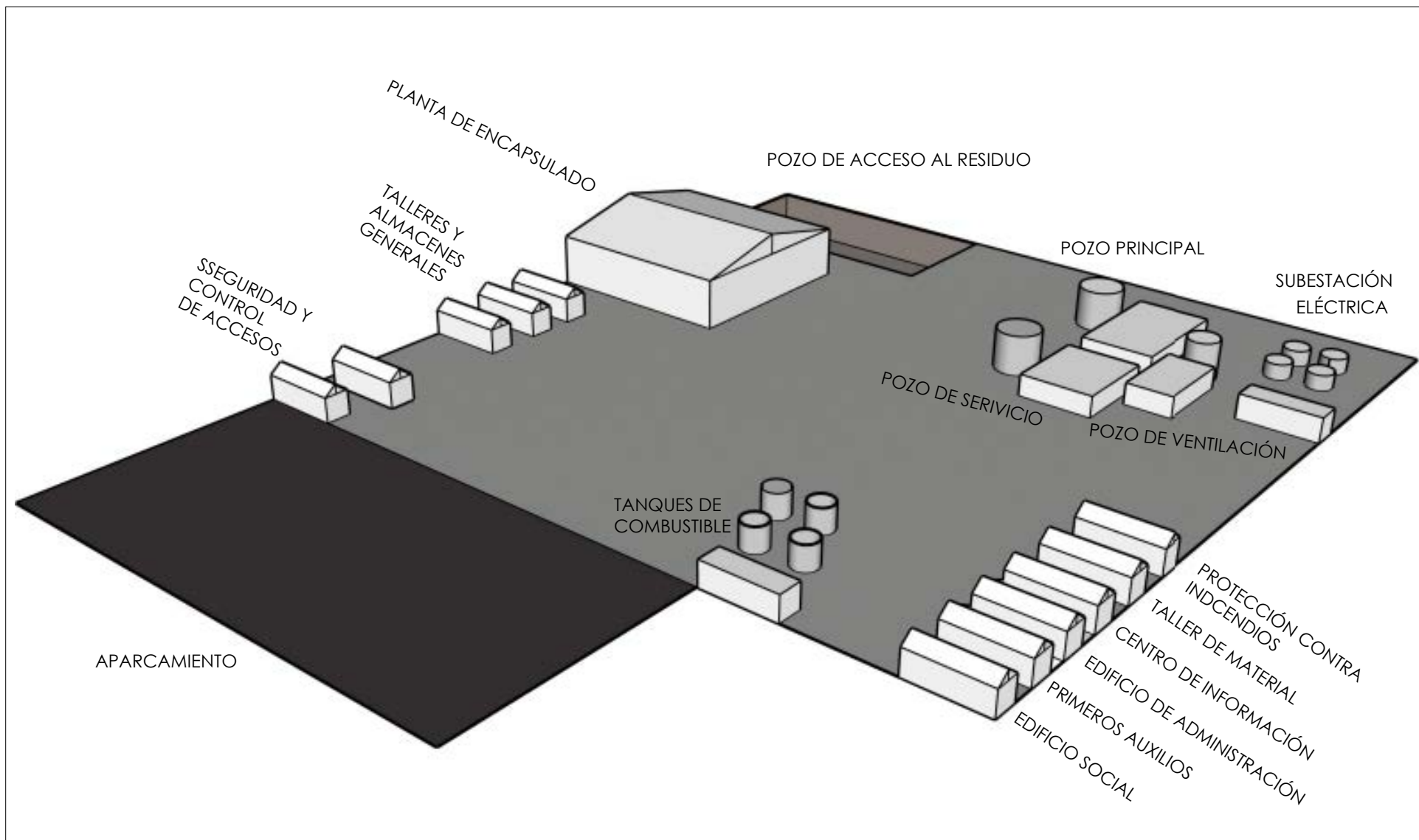
Su sección excavada tiene un diámetro de 4 metros y una longitud de 535 metros, mientras que la sección útil, de forma circular, tiene un diámetro de 3,6 metros [15].

5.2.3. Áreas centrales

Las áreas previstas contarán con los siguientes servicios duplicados [15]:

- Un muelle de carga.
- Un taller-minialmacén de vehículos.
- Un parking de vehículos.
- Una zona de control radiológico (solo en el área de almacenamiento).
- Una subestación eléctrica.
- Un taller-minialmacén eléctrico.
- Un almacén de materiales de relleno y sellado.
- Un área de primeros auxilios.
- Un laboratorio subterráneo, que incluye caracterización y monitorización.

Se estima que las dimensiones promedio para los talleres, almacenes y el resto de las infraestructuras serán de 8x25x8 metros, mientras que el conjunto de las áreas centrales ocupará aproximadamente 250x250 metros cuadrados. Se ha considerado un volumen de huecos de 80.000 metros cúbicos para el conjunto de las áreas centrales [15].



Diseño de un almacén subterráneo de residuos nucleares en España			Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos	
	Autora: Floranes Cuesta, Marina	Nº de plano 1	Título: Perspectiva tridimensional superficie	
		Escala 1/50	Fecha: 28/06/2024	

5.2.4. Galerías

5.2.4.1. *Galerías de acceso*

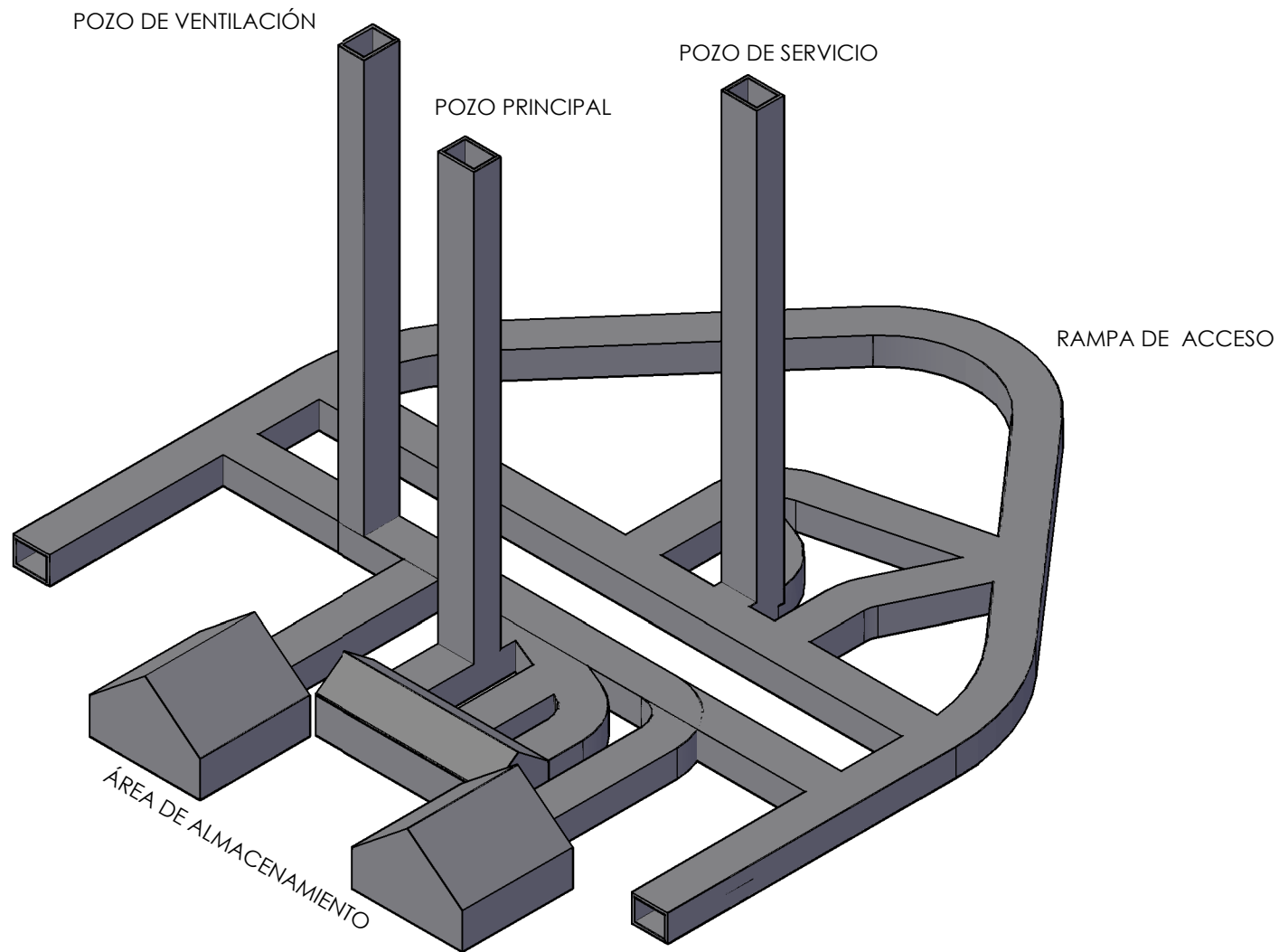
La descripción de las galerías principales y de servicio se detalla a continuación [15]:

- Galería principal: Con una sección útil de 32 metros cuadrados, que abarca un ancho de 7 metros y una altura de 5 metros, esta galería se perfora utilizando el método de perforación y voladura perimétrica. Su longitud total dependerá de la ubicación final de los módulos de almacenamiento, y se ha estimado inicialmente en 2 kilómetros.
- Galería de servicio: Similar a la galería principal, también presenta una sección útil de 32 metros cuadrados, con un ancho de 7 metros y una altura de 5 metros. Su perforación también se lleva a cabo mediante el método de perforación y voladura perimétrica. Al igual que la galería principal, su longitud total será determinada por la ubicación final de los módulos de almacenamiento, y se ha considerado inicialmente una longitud de 2 kilómetros.

5.2.4.2. *Galerías de ventilación*

Las características de las galerías de ventilación de almacenamiento y de excavación son las siguientes [15]:

- Galería de ventilación de almacenamiento: Con una sección útil de 18 metros cuadrados, que comprende un ancho de 4 metros y una altura de 3,5 metros, esta galería se perfora utilizando el método de perforación y voladura perimétrica. Se ha estimado inicialmente una longitud de 2 kilómetros.
- Galería de ventilación de excavación: Similar a la galería de ventilación de almacenamiento, también presenta una sección útil de 18 metros cuadrados, con un ancho de 4 metros y una altura de 3,5 metros. Su perforación se lleva a cabo mediante el método de perforación y voladura perimétrica. Se ha considerado inicialmente que tiene una longitud de 2 kilómetros.



Diseño de un almacén subterráneo de residuos nucleares en España			Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos	
	Autora: Floranes Cuesta, Marina	Nº de plano 2	Título: Perspectiva tridimensional galerías	
		Escala 1/2	Fecha: 28/06/2024	

5.2.5. Áreas de almacenamiento

5.2.5.1. Almacén de RAA

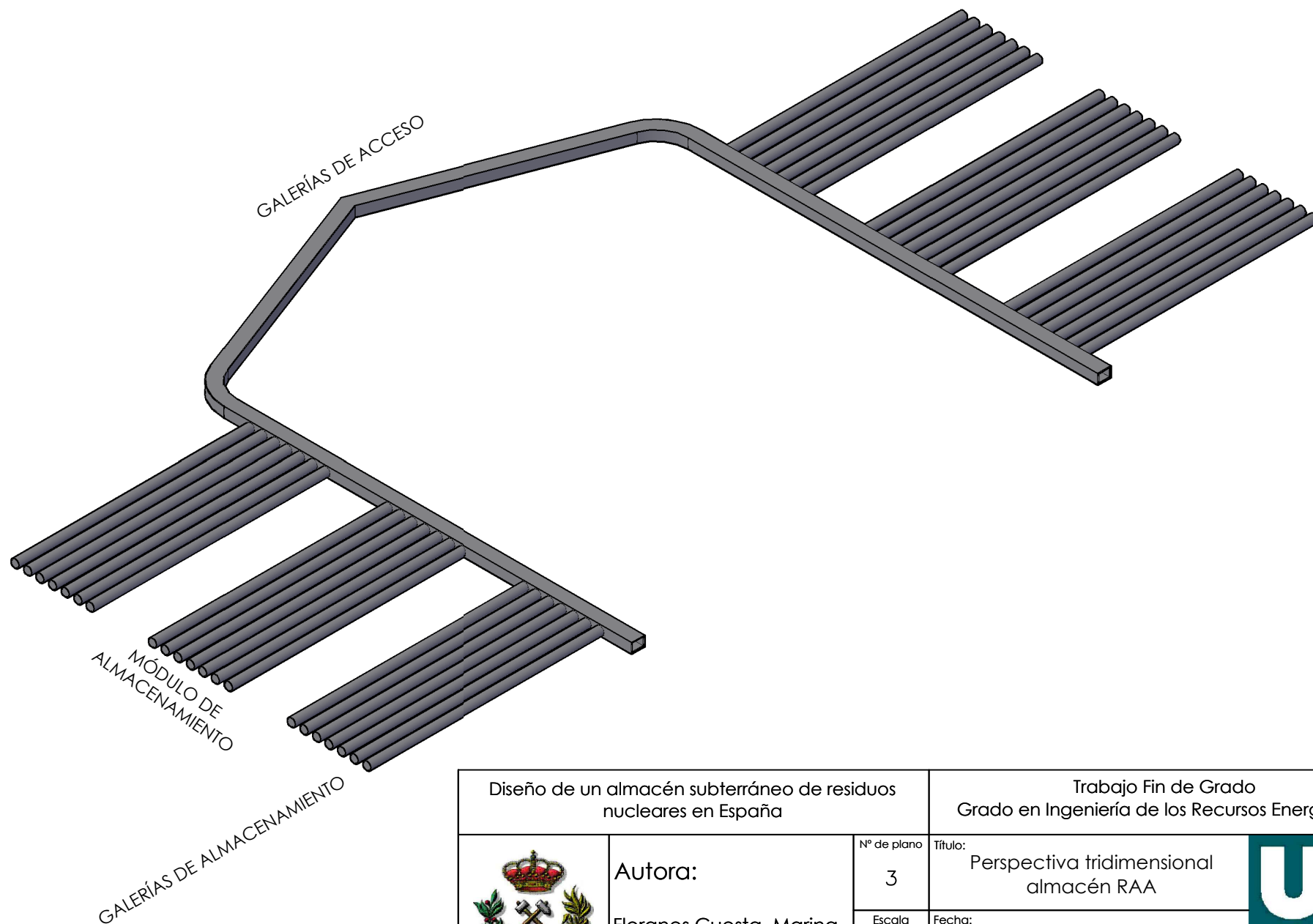
El área de almacenamiento de RAA se compone de dos paneles de almacenamiento, cada uno dividido en módulos de almacenamiento. La disposición y tamaño de estos módulos dependen del sistema de fracturación presente en el macizo. Por motivos de seguridad a largo plazo, se establece una distancia prudente entre los módulos y el sistema de fracturas, manteniendo una distancia de respeto de 100 metros. Según la familia de fracturas considerada para el diseño, cada panel de almacenamiento cuenta con 3 módulos [15].

Cada panel está compuesto por una galería de acceso, una galería de ventilación y las galerías de almacenamiento. Estas últimas están dispuestas perpendicularmente a las galerías principales y están diseñadas para el almacenamiento permanente de las cápsulas, alineadas según sus ejes longitudinales y rodeadas de bloques de bentonita pre-compactada. Su longitud alcanza hasta los 500 metros y su sección transversal es circular, con un diámetro útil de 2,40 metros [15].

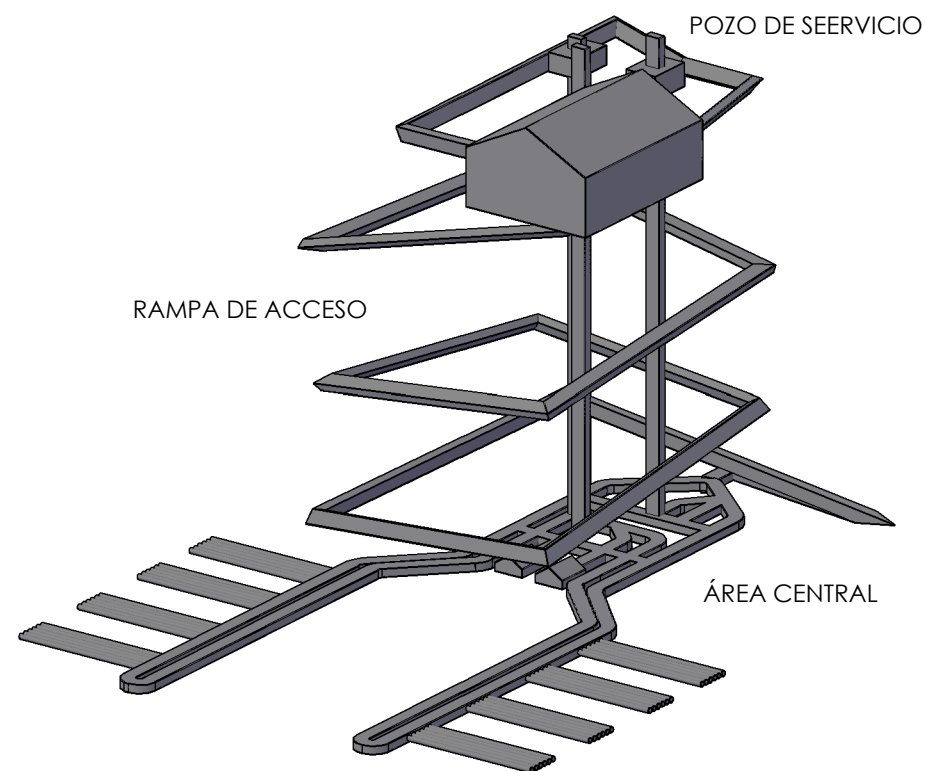
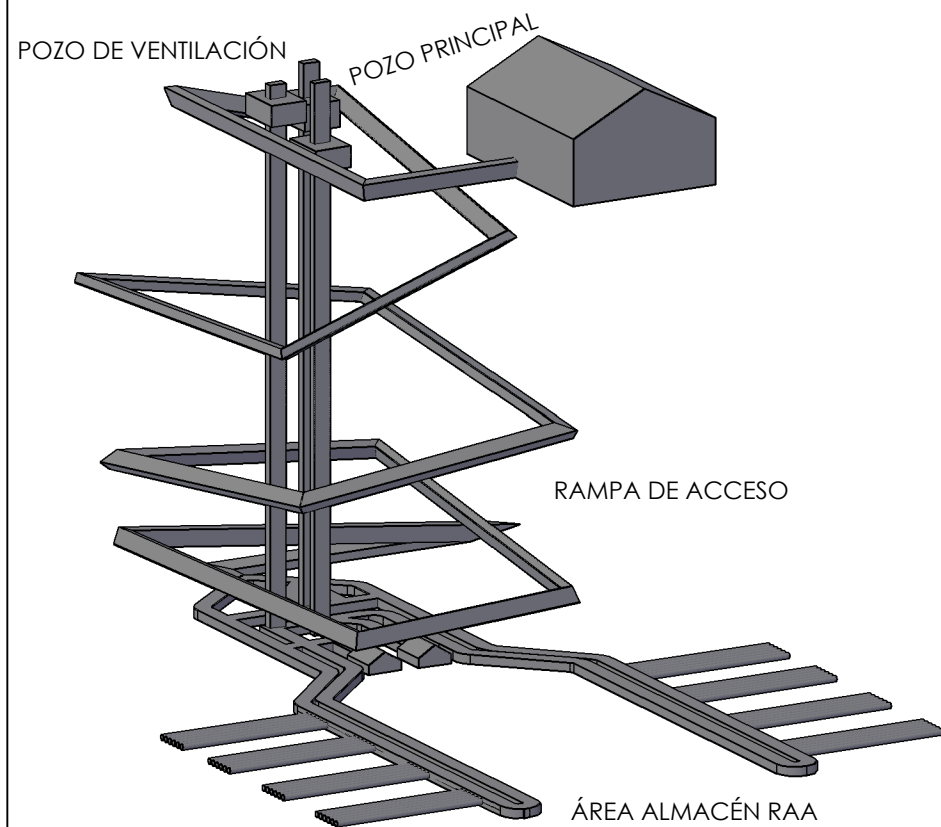
Se dispone de un total de 42 galerías de almacenamiento, cada una destinada a contener 87 cápsulas. A su vez, cada módulo de almacenamiento consta de 7 galerías de este tipo [15].

Cada módulo se cierra con bloques de bentonita compactada, con sellos de 10 metros de longitud colocados estratégicamente en áreas con baja conductividad para garantizar su durabilidad [15].

Los contenedores de residuos, que pesan 12 toneladas cada uno, se colocan en posición horizontal dentro de las galerías, separados por un metro de distancia. Estas galerías están revestidas con acero continuo, proporcionando un entorno seguro para los contenedores [15].



Diseño de un almacén subterráneo de residuos nucleares en España			Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos	
	Autora: Floranes Cuesta, Marina	Nº de plano 3	Título: Perspectiva tridimensional almacén RAA	
		Escala 1/20	Fecha: 28/06/2024	



Diseño de un almacén subterráneo de residuos nucleares en España

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos



Autora:
Floranes Cuesta, Marina

Nº de plano
4

Escala
1/1000

Título:
Perspectiva tridimensional de las instalaciones subterráneas

Fecha:
28/06/2024

UC
UNIVERSIDAD
DE CANTABRIA

5.3. TECNOLOGÍAS Y MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN

5.3.1. Excavación

La excavación de las galerías de almacenamiento se realiza utilizando una máquina tuneladora (TBM) [18]. Para facilitar las operaciones de excavación y la ubicación de la máquina topo, se realiza una perforación y voladura para abrir un espacio de 9 m en la entrada de la galería [15].

Para asegurar una estrategia de caracterización eficaz de la formación anfitriona, se ha planificado llevar a cabo las siguientes actividades durante esta etapa [15]:

1. Realización de la excavación del pozo de ventilación, seguida de la caracterización detallada de la zona atravesada.
2. Proceso de excavación del pozo de servicio y la construcción del laboratorio subterráneo.
3. Desarrollo de la rampa de acceso subterránea, junto con una caracterización tridimensional exhaustiva del entorno atravesado.
4. Excavación de las galerías de acceso y ventilación, seguida de una completa evaluación del medio circundante.
5. Colocación estratégica de los módulos de almacenamiento conforme al diseño planificado.
6. Progresión con la excavación de componentes adicionales de las instalaciones subterráneas, incluyendo el pozo principal, las áreas centrales y el primer panel de almacenamiento de RAA.

5.3.2. Cápsula de almacenamiento

La cápsula de almacenamiento para los RAA es un recipiente cilíndrico hecho de acero al carbono [15]. Este recipiente no es autoblandado y puede contener, sin distinción, 4 elementos de combustible de reactores de agua a presión (PWR) o 12 elementos de combustible de reactores de agua hirviendo (BWR).

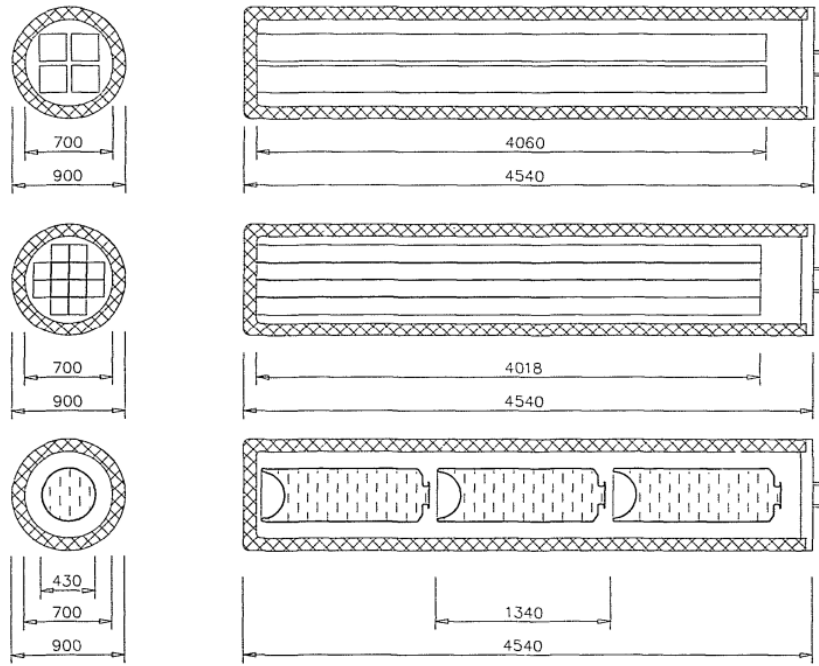


Figura 18: Cápsula de almacenamiento de RAA. Fuente FEBEX.

El contenedor de residuos radiactivos tiene un diámetro interno de 0,70 m y una longitud interna de 4,30 m, con una pared de 10 cm de espesor y una tapa y base de 12 cm de espesor. En su interior, se establece una separación de 0,254 m entre los elementos de combustible (PWR de referencia) [15].

El sobreenvase que proporciona el blindaje radiológico para las cápsulas de residuos radiactivos tiene un espesor de pared de 29 cm, compuesto por 14 cm de acero y 15 cm de material de blindaje neutrónico. Este grosor garantiza que la tasa de dosis en contacto con el sobreenvase se mantenga por debajo de 0,2 mSv/h, un valor que cumple con los criterios de diseño establecidos por la OIEA y equivale a una décima parte del límite establecido [15].

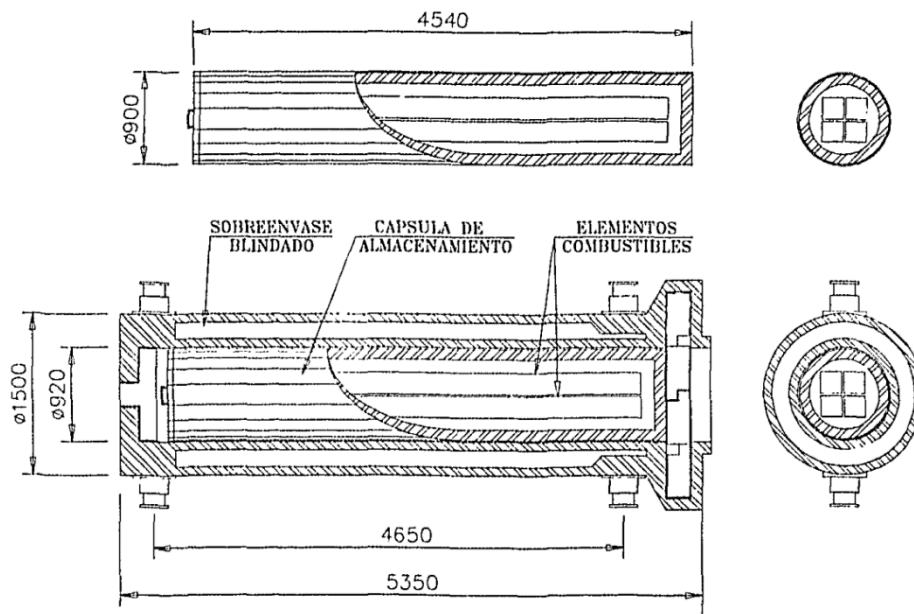


Figura 19: Sobreenvase de blindaje radiológico para las capsulas de RAA. Fuente FEBEX.

5.3.3. Sistema de hidratación

Este sistema proporciona agua para hidratar la masa de bentonita a una presión constante y controlada. Está compuesto por dos tanques con una capacidad total de alrededor de 1,3 metros cúbicos, presurizados desde la línea de suministro superior de nitrógeno [18].

El agua se suministra a través de una red de tuberías conectadas a los 48 inyectores de agua en la estructura de confinamiento [18].

Cada tanque está apoyado en tres patas metálicas que forman la base del sistema de pesaje utilizado para medir la masa de agua inyectada. Estos tanques se colocan lo más cerca posible de la estructura de confinamiento para minimizar el volumen muerto del sistema [18].

Los componentes fundamentales del sistema son los siguientes [18]:

- Una línea de nitrógeno bajo presión de 4.0 MPa.
- Dos tanques presurizados, cada uno con las siguientes especificaciones:
 - Material: acero inoxidable.
 - Altura: 3,0 m.
 - Diámetro: 0,8 m.

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

- Espesor de la pared: 0,012 m.
 - Presión de trabajo: 3,5 MPa.
 - Volumen interno estimado: 0,660 m³.
 - Masa total en vacío estimada: 550 kg.
- Una red de tuberías que se extiende hacia la estructura de confinamiento.
 - Un sistema de pesaje para realizar mediciones.
 - Filtros y geotextiles para proteger los puntos de inyección de agua (boquillas) y el revestimiento de geotextil para la superficie interna de la estructura de confinamiento. El revestimiento de geotextil tiene como objetivo homogeneizar el suministro de agua a lo largo de la periferia de la barrera de arcilla.

Las partes del sistema que entran en contacto con el agua están fabricadas en acero inoxidable AISI 304L [18].

Todos los materiales se suministraron con sus respectivos certificados de calidad [18].

5.3.3.1. Conexión a la estructura de confinamiento

La interconexión entre el sistema de hidratación y la estructura de confinamiento se logra a través de 48 puntos de inyección, distribuidos en seis secciones, cada una equipada con ocho boquillas de inyección dispuestas a intervalos de 45 grados y conectadas a un anillo de tubería [18].

Para evitar obstrucciones causadas por el barro, las boquillas de inyección están protegidas por dos filtros de acero inoxidable, un disco de malla de acero inoxidable y un disco de geotextil [18].

En el interior de la estructura de confinamiento, se ha aplicado una cubierta de cuatro capas de geotextil para facilitar una hidratación uniforme de la barrera de arcilla. Las características de compresibilidad y permeabilidad del geotextil han sido sometidas a pruebas de laboratorio para su validación [18].

5.3.3.2. Monitoreo y control del suministro de agua de hidratación

La cantidad y la presión del agua suministrada a la estructura de confinamiento se controlan mediante células de carga y sensores de presión. Estos dispositivos envían directamente al Sistema de Adquisición de Datos (DAS) los valores obtenidos [18]. La masa de agua introducida en el sistema se mide mediante un proceso continuo de pesaje de los tanques de hidratación.

Usando los datos del sistema de pesaje y la presión de nitrógeno en los tanques de hidratación, se calcula y registra en el DAS la masa de agua inyectada. Tanto la presión de inyección en la salida de los tanques como las presiones en la superficie de hidratación en cada mitad de la estructura de confinamiento se monitorean de forma continua. Todos los valores medidos son registrados directamente por el DAS [18].

5.3.4. Material de relleno y sellado

Los materiales de relleno y sellado son cruciales en el diseño de instalaciones subterráneas para el AGP [15], ya que influyen en el comportamiento del repositorio y su capacidad de aislamiento.

Es fundamental que cualquier abertura o perturbación durante la caracterización, construcción o explotación del almacenamiento sea adecuadamente rellenada o sellada para evitar la entrada prematura de aguas subterráneas en contacto con las cápsulas de almacenamiento [15].

Estos materiales tienen como objetivo proporcionar protección mecánica y química a las cápsulas de almacenamiento, limitar el flujo de agentes agresivos hacia su superficie y, en una etapa posterior, restringir el transporte de sustancias radiactivas hacia la geosfera [15].

Los materiales deben tener baja conductividad y difusividad hidráulica, buena conductividad térmica, capacidad de sorción, estabilidad a largo plazo, entre otras características [15].

El proceso de relleno y sellado de las instalaciones subterráneas del AGP se lleva a cabo de manera simultánea con las actividades de colocación de las cápsulas de almacenamiento. Este enfoque planifica primero el relleno y sellado de las galerías de almacenamiento, seguido de los módulos de almacenamiento y áreas centrales, y finalmente, los accesos como pozos y/o rampas [15].

5.3.4.1. Relleno

Las bentonitas son tipos de arcilla que contienen una alta proporción de minerales expandibles, siendo la montmorillonita la variedad más habitual [15]. Este material es ampliamente reconocido en la industria del petróleo y ha sido objeto de numerosos estudios en el ámbito del almacenamiento de residuos en ambientes saturados.

La bentonita extraída proviene del yacimiento de Cortijo de Archidona, operado por Minas de Gádor, S.A., en la región de Serrata de Níjar (Provincia de Almería, España) [18].

A continuación se detallan algunas de las características que definen esta bentonita [18]:

- Porcentaje de montmorillonita (%): 92 ± 3 .

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

- Límite líquido (%): 102 ± 4 .
- Densidad específica: $2,70 \pm 0,04$.
- Presión de hinchamiento media para una densidad seca de $1,60 \text{ g/cm}^3$: 5 MPa.
- Conductividad hidráulica saturada media para una densidad seca de $1,60 \text{ g/cm}^3$: $4 \times 10^{-14} \text{ m/s}$.

El material crudo utilizado para fabricar los bloques consiste en un granulado de bentonita con menos del 5% de granos mayores a 5 mm, más del 85% de granos menores a $74 \mu\text{m}$, y un contenido de agua que oscila entre el 12,5% y el 15,5% [18].

Es crucial utilizar un material lo más uniforme posible, cuyas propiedades se determinen mediante pruebas específicas en muestras del mismo material. La uniformidad reduce las incertidumbres en la modelización [18].

La bentonita del depósito de Cortijo de Archidona contiene principalmente esmectita diocahédrica tipo montmorillonita en una proporción muy alta. Además, desde el punto de vista mineralógico, el depósito es bastante homogéneo, con el contenido de montmorillonita variando solo entre el 89% y el 96% [18].

Se presta especial atención al contenido de cloruros, sulfatos y carbonatos como minerales traza en la bentonita, ya que pueden influir en la química del agua del poro [18].

El proceso de intercambio catiónico en la bentonita es de gran relevancia en los repositorios de residuos radiactivos debido a su impacto en las condiciones químicas en el campo cercano [18].

5.3.4.2. Sellado

La galería principal se rellena compactando una combinación de arena y bentonita mediante un proceso de compactación vibratoria. En zonas donde la compactación directa no es posible, como en la parte superior de la galería, se aplican pellets de bentonita [15]. Por otro lado, la galería de ventilación, al ser de menor diámetro, se llena directamente mediante la proyección neumática de la mezcla de arena y bentonita.

5.3.4. Sistema de calefacción

El sistema comprende dos calentadores cilíndricos junto con los sistemas de supervisión y control correspondientes [18].

Cada calentador está equipado con tres elementos calefactores eléctricos internos (resistencias), los cuales pueden suministrar individualmente la potencia térmica necesaria para mantener la temperatura en la interfaz del calentador/bentonita a 100°C , tal como lo exige AGP Granito [18].

El criterio de funcionamiento del calentador es mantener una temperatura superficial constante (un control relativamente sencillo), pero con la capacidad de ofrecer una operación de potencia constante [18].

5.3.4.1. Calentadores

En esta prueba, los calentadores se colocan en contacto directo con la bentonita, con una separación horizontal de 0,75 m entre ellos [18].

Los elementos calefactores eléctricos fueron seleccionados considerando diversos criterios: eficiencia, distribución uniforme del calor, densidad de potencia, costos de instalación, durabilidad de los elementos y aspectos de seguridad [18].

Cada calentador consta de un núcleo (bobina) de acero al carbono [18].

El conjunto (bobina y resistencias) está protegido por una carcasa de acero al carbono cerrada con dos tapas (soldadas en el extremo posterior y fijadas con tornillos en el extremo frontal)[18].

Las principales características de cada calentador son las siguientes [18]:

- Material: Acero al carbono
- Presión de trabajo: 9,0 MPa.
- Elementos: Carcasa y tapas de metal, bobina, 3 elementos calefactores (máx. 930 W/unidad) y 9 puntos de control de temperatura.
- Potencia máxima nominal: 2800 W.

5.3.4.2. Sistemas de monitoreo y control de calentadores (HCS)

El Sistema de Control de Calentamiento (HCS) engloba todos los componentes eléctricos, electrónicos y programas informáticos necesarios para la supervisión autónoma de las operaciones y el control del suministro de energía a los calentadores. Además, gestiona la adquisición de datos, incluyendo el envío de mediciones de parámetros al DAS, y activa procesos y alarmas en caso de fallo de algún componente (como las resistencias del calentador o la electrónica) [18].

Este sistema opera mediante un control de lazo cerrado utilizando un Control Lógico Programable (PLC), el cual administra el montaje y regula el suministro de energía mediante un interruptor triac y la electrónica asociada. El disparo del triac se sincroniza con el paso de la onda a través de cero para prevenir fatiga en las resistencias. Los tres resistores de cada calentador se controlan como una unidad. El parámetro de control para el calentamiento puede ser la temperatura o la potencia suministrada [18].

En caso de fallo de uno de los elementos calefactores, el sistema de control compensa

utilizando los elementos restantes. Los nueve sensores instalados en cada calentador permiten supervisar las distribuciones de temperatura interna [18].

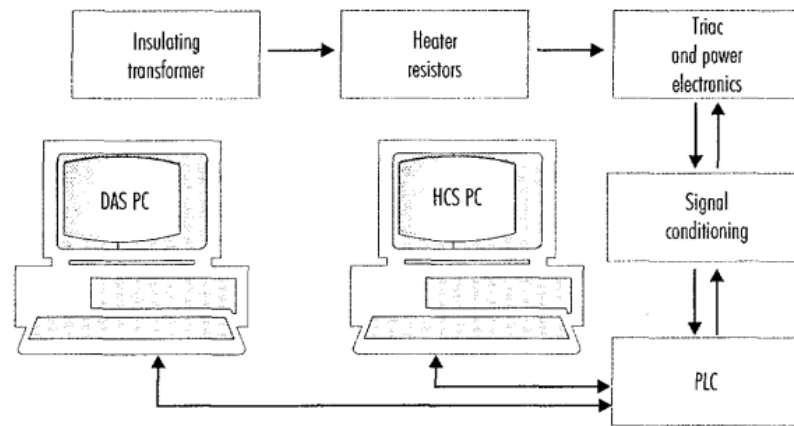


Figura 20: Esquema general del sistema de control de calentadores (HCS). Fuente FEBEX.

6. ASPECTOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD

6.1. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

6.1.1. Objetivos del estudio de impacto ambiental

El proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un procedimiento científico-técnico y administrativo diseñado para analizar y anticipar los posibles efectos que una actividad, obra o proyecto pueda tener en el medio ambiente [19]. Su finalidad es evaluar y cuantificar estos impactos para facilitar la toma de decisiones.

En este caso en concreto, el objetivo de estudio es identificar y evaluar los posibles efectos que desencadenará la construcción de un AGP entre los pueblos de Bemil, Serén y Pacios (Galicia), así como proponer medidas tanto preventivas como correctivas para mitigar o reducir dichos impactos.

Los objetivos del estudio de impacto ambiental son los siguientes [19]:

- Verificar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.
- Analizar y evaluar, desde una perspectiva ambiental, la zona donde se llevará a cabo el proyecto.
- Identificar la naturaleza y la magnitud de los efectos resultantes de la implementación del proyecto.
- Proponer medidas para prevenir o reducir los impactos ambientales negativos.
- Diseñar un programa de monitoreo para realizar un seguimiento y control de los aspectos ambientales.

6.1.2. Identificación de impactos

La identificación de los impactos ambientales surge de la recopilación de información sobre las diversas actividades llevadas a cabo en cada etapa del estudio. Esta identificación es crucial en la Evaluación de Impactos [19], dado que la interacción entre el estudio y el entorno es lo que en última instancia determina los efectos ambientales.

La tarea de identificar impactos implica detectar cualquier interacción entre las actividades del estudio y los elementos del medio ambiente, tanto beneficiosos como perjudiciales. Esto ofrece una visión cualitativa de los elementos afectados y de las acciones principales que generan impacto [19]. Para esta identificación se recurre a herramientas como una lista de verificación y una matriz interactiva de identificación de impactos.

6.1.2.1. *Lista de verificación*

Este enfoque se emplea inicialmente para identificar los impactos y factores ambientales pertinentes que requieren consideración en el estudio. De esta manera, se pueden compilar listas exhaustivas de todas las posibles fuentes de impacto del estudio, así como de los elementos ambientales receptores de estos impactos. Al elaborar una lista preliminar de los factores ambientales relevantes para el estudio, es importante tener en cuenta [19]:

- Normativas de la Ley de Medio Ambiente y disposiciones sectoriales correspondientes.
- Proyecciones de impacto de proyectos similares.
- Aspectos comunes en diversas metodologías de EIAs.
- Percepciones públicas para determinar la aceptación y/o controversia social generada por el estudio.

Una vez recopilado el listado de posibles fuentes de impacto y sus receptores, se procede a elaborar un inventario de las actividades del estudio y los factores ambientales que podrían resultar afectados. De este modo, se obtiene una visión de los aspectos que podrían considerarse relevantes para su evaluación [19]. Aquellas actividades y factores que carezcan de relevancia ambiental se excluyen y no se consideran en la matriz de identificación de impactos.

- Lista de acciones generadoras de impacto:
 1. Generación de empleo e incremento de la renta.
 2. Aceptación del proyecto.
 3. Generación de emisiones (polvo y gases de combustión).
 4. Generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI).
 5. Generación de ruido y vibraciones.
 6. Incremento del tráfico.
 7. Presencia física de personas y maquinaria.
 8. Generación de efluentes
 9. Generación de residuos.
 10. Transformación del paisaje.
 11. Ocupación/ Recuperación del suelo.
 12. Movimiento de tierras y obra civil.
 13. Requerimientos de iluminación.
 14. Liberación de radionucleidos.
- Lista de elementos y procesos ambientales receptores de impacto:
 1. Población.
 2. Atmósfera.
 3. Salud humana.

4. Agua.
5. Fauna
6. Vegetación
7. Aire.
8. Clima y cambio climático.
9. Paisaje.
10. Suelo y aguas subterráneas.

6.1.2.2. Impactos en la fase de construcción

La alteración de los patrones de uso del suelo en el área designada para la construcción del AGP implica cambios significativos [20]. No obstante, se anticipan impactos considerables que requerirán la implementación de medidas preventivas y correctivas exhaustivas.

La alteración del paisaje y la transformación de las características visuales de la zona son consecuencias directas de la construcción y operación del AGP. Implica la ocupación permanente de un terreno adicional, generando un impacto visual significativo y prolongado a lo largo de toda la vida útil del proyecto [20]. Esta situación demandará la implementación de medidas específicas de prevención y corrección para mitigar estos efectos.

Se ha determinado que los procesos constructivos conllevan un riesgo moderado de contaminación del suelo, así como un riesgo similar de contaminación de las aguas superficiales o subterráneas [20].

Durante la fase de construcción del AGP, se anticipa una afectación a la fauna debido a las molestias ocasionadas por las actividades en curso. Estas perturbaciones podrían resultar en cambios en la biodiversidad, influenciadas por la emisión de ruidos, la presencia humana y el tráfico de maquinaria y vehículos. Además, es probable que se produzcan alteraciones en el suelo, aumentando el riesgo de atropellos accidentales y generando molestias que podrían desplazar a la fauna y provocar la pérdida de hábitat para diversas especies en áreas específicas del territorio [20]. Sin embargo, es probable que estas áreas recuperen su hábitat natural una vez finalizadas las obras.

Por otro lado, en cuanto a la vegetación, esta queda desmantelada en el proceso de construcción a expensas de una posible rehabilitación, cuando comience el proceso de explotación, en las zonas donde sea posible.

Para mitigar las emisiones de los vehículos y, al mismo tiempo, reducir los gastos de transporte, es recomendable realizar una planificación meticulosa de los desplazamientos y evitar trayectos superfluos [19].

Asimismo, se prevén efectos altamente positivos, principalmente debido al aumento de la actividad económica durante la construcción y operación del almacén [20].

6.1.2.3. *Impactos en la fase de explotación*

1. Impacto sonoro

El límite de ruido permitido variará en función de la cercanía de núcleos de población o viviendas aisladas en las proximidades, así como del nivel de ruido previo al inicio del proyecto [19].

Este impacto viene dado por:

- El incremento en el trasiego de automóviles correspondiente a los trabajadores.
- Los camiones transportando los RR para ser posteriormente almacenados.
- El ruido que se genera en el interior de los talleres, que con un correcto aislamiento, pasaría a ser prácticamente nulo.

2. Impacto paisajístico

La población, habitualmente rechaza cualquier tipo de proyecto que conlleve un impacto paisajístico por pequeño que sea. Especialmente cuando se refiere a un proyecto nuclear.

Aunque este tipo de almacenamiento es completamente subterráneo y el único impacto paisajístico visible es el de cualquier industria (aparcamiento, talleres, subestación...) se cuenta con recibir una opinión negativa por parte de la población.

3. Impacto sobre la salud

Uno de los motivos más sólidos por los que la población rechaza cualquier tipo de proyecto nuclear son los efectos que creen que provoca sobre la salud.

En este caso, si al blindaje se le añaden cientos de metros de suelo cualquier tipo de liberación de radionucleidos es imposible. A no ser, que se produzca un accidente en la superficie antes de almacenarlo.

Los trabajadores del AGP podrían manipular las cápsulas de almacenamiento sin ningún tipo de protección y pese a ello no sufrirían ningún impacto sobre su salud ni a corto y largo plazo.

6.1.2.4. Matriz de identificación de impactos

	Generación de empleo e incremento de la renta	Aceptación del proyecto	Generación de emisiones (polvo y gases de combustión)	Generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI)	Generación de ruido y vibraciones
Población	x	x	x	x	x
Atmósfera			x	x	
Salud humana	x		x		x
Vegetación			x	x	
Fauna			x		x
Agua			x		
Aire			x	x	
Clima y cambio climático			x	x	x
Paisaje					
Suelo					
Aguas subterráneas					

Tabla 1: Matriz de identificación de impactos (fase de construcción) 1/3.

	Incremento del tráfico	Presencia física de personas y maquinaria	Generación de efluentes	Generación de residuos
Población	x	x		x
Atmósfera	x			
Salud humana				
Vegetación		x	x	x
Fauna	x	x	x	
Agua			x	
Aire	x			
Clima y cambio climático	x		x	x
Paisaje	x	x	x	
Suelo	x			
Aguas subterráneas			x	

Tabla 2: Matriz de identificación de impactos (fase de construcción) 2/3.

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

	Transformación del paisaje	Ocupación/ Recuperación del suelo	Movimiento de tierras y obra civil	Requerimientos de iluminación
Población	x			
Atmósfera				x
Salud humana				
Vegetación		x	x	
Fauna	x	x	x	
Agua	x			
Aire				
Clima y cambio climático				
Paisaje	x	x	x	x
Suelo		x	x	
Aguas subterráneas	x	x	x	

Tabla 3: Matriz de identificación de impactos (fase de construcción) 3/3.

	Generación de ruido y vibraciones	Transformación del paisaje	Ocupación/ Recuperación del suelo	Generación de empleo e incremento de la renta
Población	x	x		X
Atmósfera				
Salud humana	x			x
Vegetación			x	
Fauna	x	x	x	
Agua		x		
Aire				
Clima y cambio climático	x			
Paisaje		x	x	
Suelo			x	
Aguas subterráneas		x	x	

Tabla 4: Matriz de identificación de impactos (fase de explotación).

6.1.3. Criterios de evaluación adoptados

La evaluación de impactos se basa en la aplicación de criterios de calidad ambiental a los factores ambientales afectados. Para evaluar los impactos potenciales, se emplean diversos criterios, entre los cuales destacan [19]:

- Variabilidad de los factores ambientales: Se considera la magnitud de los cambios previstos tras la ejecución del estudio, en relación con la variabilidad natural estimada de los factores ambientales.
- Magnitud del cambio esperado: Evalúa la magnitud de los cambios dentro de un período determinado.
- Juicio profesional: Se aplica un juicio profesional respecto al impacto, con un enfoque interdisciplinario.
- Naturaleza del impacto: Incluye la probabilidad de ocurrencia y la extensión del área ambiental afectada.
- Severidad: Evalúa la extensión geográfica, duración y magnitud del impacto.
- Potencial de prevención y mitigación: Considera la reversibilidad del impacto, la disponibilidad de soluciones técnicas y económicas, y la capacidad institucional para gestionarlas.

6.1.4. Definición de indicadores de impacto

Se establecen los siguientes criterios de evaluación y magnitudes para cada indicador de impacto [19].

6.1.4.1. Impactos negativos (-)

- Impacto leve (-1): Implica una duración limitada, afectación localizada y reversibilidad natural a corto plazo.
- Impacto moderado (-2): Representa efectos de magnitud media, reversibilidad natural en un plazo medio y afectación extensa en el área.
- Impacto significativo (-3): Refleja impactos de carácter extenso e irreversible. Requiere la implementación de medidas correctivas.

6.1.4.2. Impactos positivos (+)

- Impacto Bajo (+1), Moderado (+2), Alto (+3).
- Según el tipo de acción o actividad:
 - Directo (D): Sus efectos se manifiestan directamente en humanos, animales, plantas o ecosistemas.
 - Indirecto (IND): Ocasiona efectos que se manifiestan posteriormente o en lugares alejados de donde se originan.

- Según su área de influencia:
 - Localizados (L): El impacto se concentra en un área específica.
 - Extensivos (E): Se extiende sobre una amplia área.
- Según su permanencia:
 - Permanentes (P): Los efectos son duraderos.
 - Temporales (TP): Presentes solo durante ciertas etapas del proyecto, con una duración limitada.
- Según su potencial de mitigación:
 - Reversible (RV): Los efectos ambientales pueden restaurarse naturalmente, devolviendo las condiciones previas al proyecto.
 - Irreversible (IV): Los efectos no pueden ser revertidos por procesos naturales.
- Con intervención humana:
 - Recuperables (RE): Se pueden aplicar medidas correctivas para reducir, anular o revertir los efectos.
 - Irrecuperables (IR): No es posible implementar medidas de mitigación.
- Otros:
 - Acumulativos (A): Resultado de la combinación de varios impactos de baja magnitud o de acciones pasadas, presentes o futuras.
 - Sinérgicos (S): Cuando la acción de dos o más impactos de baja magnitud se potencia al ocurrir simultáneamente.

6.1.5. Matriz de valoración de impactos

El resultado de la evaluación de impactos se plasma en una Matriz de valoración de impactos, que presenta las siguientes características [19]:

- En las filas se especifica el factor ambiental más influyente (tanto negativo como positivo).
- En las columnas se detallan las actividades de las distintas etapas del estudio que tienen una mayor repercusión en dicho factor ambiental.

- La valoración de cada celda, donde se analiza la relación causa-efecto, arroja los siguientes resultados.

6.1.5.1. Receptores de impacto más afectados

- **Atmósfera:** Los efectos adversos en la calidad del aire pueden ser catalogados, en líneas generales, como un impacto ambiental de baja magnitud, directo, reversible, temporal y localizado.
- **Suelo:** Estas consecuencias desfavorables se describen como localizadas, directas y, en ocasiones, permanentes (como en los casos de erosión, compactación y pérdida de estabilidad del suelo).
- **Fauna:** Los efectos sobre la fauna pueden ser catalogados, en líneas generales, como un impacto ambiental de baja magnitud, directo, reversible, temporal y localizado.
- **Vegetación:** Estas consecuencias desfavorables se describen como localizadas, directas y, en ocasiones, permanentes (puede darse o no la rehabilitación de la zona).
- **Socioeconómico:** Estos efectos positivos se describen como directos, indirectos, localizados, extensivos y permanentes (dependiendo de la duración de algunos trabajos).

6.1.5.2. Valoración global de los impactos

La "importancia" de un impacto se determina cualitativamente considerando el nivel de influencia (intensidad) de la alteración ocasionada y una descripción detallada del efecto [19].

La magnitud de los impactos se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$I_{ij} = NA_{ij} * (3N_{ij} + 2EX_{ij} + MO_{ij} + PE_{ij} + RV_{ij} + SI_{ij} + AC_{ij} + EF_{ij} + PR_{ij} + MC_{ij})$$

Los números asignados a las variables de acuerdo con la evaluación cualitativa son los siguientes:

NA: NATURALEZA		IN: INTENSIDAD	
(+) Beneficioso	+1	(B) Baja	1
(-)Perjudicial	-1	(M) Media	2
		(A) Alta	4
		(MA) Muy alta	8
		(T) Total	12
EX: EXTENSIÓN		MO: MOMENTO	
(PU) Puntual	1	(L) Largo plazo	1
(PA) Parcial	2	(M) Medio plazo	2
(E) Extenso	4	(I) Inmediato	4
(T) Total	8	(C)Crítico	+4
(C) Crítico	+4		
PE: PERSISTENCIA		RV: REVERSIBILIDAD	
(F) Fugaz	1	(C)Corto plazo	1
(T) Temporal	2	(M) Medio plazo	2
(P) Permanente	4	(I) Irreversible	4
SI: SINERGISMO		AC: ACUMULACIÓN	
(SS) Sin sinergismo	1	(S) Simple	1
(S) Sinérgico	2	(A) Acumulativo	4
(MS) Muy sinérgico	4		
EF: REL.CAUSA-EFECTO		PR: PERIODICIDAD	
(I) Indirecto (secundario)	1	(I) Irregular y discontinuo	1
(D) Directo (primario)		(P) Periódico	2
	4	(C) Continuo	4
MC: RECUPERABILIDAD		I: IMPORTANCIA	
(IN) Inmediata	1	Irrelevante	
(MP) A medio plazo	2	Moderado	
(M) Mitigable	4	Severo	
(I) Irrecuperable	8	Crítico	

Figura 21: Caracterización cualitativa de los impactos. Fuente Universidad de Cantabria.

1. Naturaleza: Se refiere al efecto positivo o negativo del impacto [19].
2. Intensidad: Indica el nivel de influencia de la acción sobre el factor, que puede variar desde una afectación mínima hasta la completa devastación del mismo [19].
3. Extensión: Indica el alcance proyectado en comparación con el entorno del proyecto, y puede ser cuantificado en términos porcentuales. Si el impacto se concentra en una pequeña área, será puntual, pero si abarca todo el entorno, será global [19].
4. Momento: Se refiere al lapso que pasa desde el inicio de la acción hasta el comienzo del efecto resultante. Se puede medir en unidades de tiempo, usualmente en años. Se establece que el corto plazo abarca menos de un año, el medio plazo comprende de uno a cinco años, y el largo plazo se extiende más allá de cinco años [19].
5. Persistencia: Hace referencia al período durante el cual se prevé que el efecto

permanezca una vez que se manifieste. Se puede medir en unidades de tiempo, comúnmente en años. Se clasifica como fugaz si dura menos de un año, temporal si persiste entre uno y diez años, y permanente si excede los diez años [19].

6. Reversibilidad: Se trata de la capacidad de restaurar el factor afectado mediante procesos naturales, y en caso de ser factible, el tiempo estimado para lograrlo. Si este proceso toma menos de un año, se cataloga como corto plazo; si toma entre uno y diez años, se considera medio plazo, y si supera los diez años, se considera irreversible [19].
7. Sinergia: Se considera que dos efectos son sinérgicos cuando su interacción conjunta produce un resultado mayor que la suma de los efectos individuales. Puede entenderse como el fortalecimiento de dos efectos simples; si en lugar de fortalecerse, los efectos se debilitan, la evaluación de la sinergia debe ser negativa [19].
8. Acumulación: Cuando la acción persistente resulta en un efecto que se incrementa con el tiempo, se considera que el efecto es acumulativo [19].
9. Relación Causa-Efecto: La conexión entre la causa y el efecto puede ser directa o indirecta. Es directa cuando la acción misma produce el efecto, y es indirecta cuando otro efecto lo produce, típicamente debido a la interrelación de un factor con otro [19].
10. Periodicidad: Se trata de la consistencia en la aparición del efecto, pudiendo ser periódica, constante o irregular [19].
11. Recuperabilidad: Hace referencia a la capacidad de restaurar el factor afectado mediante la intervención humana, en contraposición a la reversibilidad, que implica la restauración a través de procesos naturales [19].

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

	Naturaleza	Intensidad	Extensión	Momento	Persistencia	Reversibilidad	Sinergismo	Acumulación	Causa-Efecto	Periodicidad	Recuperabilidad	TOTAL
Generación de empleo	1	2	2	4	4	2	2	4	4	4	1	28
Aceptación del proyecto	-1	2	4	4	2	1	2	1	4	2	1	-22
Generación de emisiones	-1	1	1	2	2	2	2	1	4	2	1	-17
Generación GEI	-1	1	1	2	2	2	2	1	4	2	1	-17
Generación de ruido y vibraciones	-1	2	2	2	2	2	2	4	4	2	1	-23
Incremento del tráfico	-1	2	2	2	2	2	2	1	4	2	1	-19
Presencia maquinaria y personas	-1	1	2	2	2	2	2	4	4	2	1	-21
Generación de efluentes	-1	1	2	2	2	2	2	1	4	2	1	-18
Generación de residuos	-1	1	1	2	1	1	2	1	4	1	1	-14
Transformación del paisaje	-1	2	4	4	4	4	2	4	4	4	8	-32
Ocupación/recuperación suelo	-1	2	4	4	4	4	2	4	4	4	4	-32
Movimiento de tierras	1	2	4	4	2	2	2	1	4	1	1	-22
Iluminación	-1	1	1	4	2	1	2	1	4	1	1	-17

Tabla 5: Matriz evaluación de impactos (fase construcción).

	Naturaleza	Intensidad	Extensión	Momento	Persistencia	Reversibilidad	Sinergismo	Acumulación	Causa-Efecto	Periodicidad	Recuperabilidad	TOTAL
Generación de empleo	1	2	2	4	4	2	2	4	4	4	1	28
Generación de ruido y vibraciones	-1	2	2	2	2	2	2	4	4	2	2	-25
Transformación del paisaje	-1	2	4	4	4	4	2	4	4	4	8	-32
Ocupación/recuperación suelo	-1	2	4	4	4	4	2	4	4	4	4	-32

Tabla 6: Matriz evaluación de impactos (fase explotación).

Cada impacto se clasificará según su importancia "I" de la siguiente manera [19]:

- Irrelevante o Compatible: $0 \leq I \leq 25$
- Moderado: $25 \leq I \leq 50$
- Severo: $50 \leq I \leq 75$
- Crítico: $I \geq 75$

A partir de los datos obtenidos de las evaluaciones y las consideraciones presentadas en el estudio, no se ha identificado ningún impacto que pueda ser clasificado como severo o crítico.

En relación con los impactos irrelevantes o compatibles, como su propio nombre lo sugiere, carecen de importancia significativa, dado que se recuperan inmediatamente al finalizar la actividad. Por lo tanto, no requieren ninguna medida adicional.

En cuanto a los impactos moderados, estos sí que precisan de medidas adicionales como medidas correctoras o protectoras.

Se encuentran categorizados como moderados los siguientes impactos:

- Generación de empleo
- Transformación del paisaje
- Ocupación/recuperación suelo
- Generación de ruido y vibraciones

Estos tres impactos afectan a los siguientes factores:

- Suelo
- Vegetación
- Fauna
- Medio socioeconómico (impacto positivo)
- Ruido
- Vibraciones

6.1.6. Conclusiones y medidas adicionales

6.1.6.1. Suelo

El suelo se verá gravemente afectado durante la fase de construcción principalmente por la erosión.

Para minimizar el impacto sobre este factor se proponen las siguientes medidas preventivas:

1. Control de la erosión: Durante la etapa de construcción, se pueden instalar barreras físicas como redes, tejidos geotextiles y cubiertas vegetales transitorias con el fin de evitar el desgaste del suelo.
2. Gestión de aguas pluviales: Crear sistemas de drenaje funcionales para gestionar el flujo de aguas proveniente de la lluvia y eludir tanto la erosión como la

contaminación del suelo.

3. Materiales no contaminantes: Emplear materiales y métodos de construcción que reduzcan al mínimo la producción de desechos y la contaminación del suelo, evitando el uso de sustancias contaminantes [20].
4. Rehabilitación del suelo: Separar y almacenar el suelo excavado para su reutilización o restauración en el futuro.
5. Protección contra contaminantes: En situaciones de derrames o contaminación, aplicar medidas de contención y limpieza, tales como la excavación y sustitución del suelo afectado, y la utilización de barreras impermeables.

Para tratar de compensar el daño que experimenta el suelo se proponen las siguientes medidas correctoras:

1. Restauración: Recuperar las zonas de construcción mediante la reposición del suelo y la restauración del paisaje original, en la medida de lo posible.
2. Educación y formación: Ofrecer formación continua al personal de construcción sobre prácticas de gestión ambiental y prevención de impactos en el suelo.

6.1.6.2. *Vegetación*

Este proyecto ocupa una gran extensión de territorio en el cual, debido al movimiento de tierras, se destruye toda la vegetación existente.

Para tratar de compensar el impacto producido sobre el medio eliminando la vegetación existente, se proponen las siguientes medidas correctoras:

1. Revegetación: Revegetar las áreas afectadas, al poder ser, con vegetación autóctona con el fin de restaurar la cubierta vegetal.
2. Áreas de conservación: Introducción de áreas de conservación o parques naturales para la protección de la biodiversidad de la zona [20].

6.1.6.3. *Fauna*

Debido al gran movimiento de tierras que conlleva este proyecto, los ruidos y vibraciones que generan de las máquinas y los talleres y el aumento de trasiego de coches y personal, seguramente, la fauna local emigrará a otras localidades donde su hábitat no se encuentre alterado.

Con el fin de equilibrar el impacto producido en el hábitat de la fauna local, se plantean las siguientes medidas correctoras:

1. Insonorización: Para reducir el ruido proveniente de las máquinas y los talleres se propone insonorizar primero, el recinto con pantallas acústicas y segundo, los edificios destinados a talleres.
2. Revegetación: Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, a la hora de comenzar la revegetación, esta debería llevarse a cabo con vegetación autóctona con el fin de reconstruir los hábitats de la fauna local.

6.1.6.4. Ruido

Como se ha explicado en el apartado anterior el ruido provoca un gran impacto sobre la fauna no obstante, también sobre las localidades colindantes.

A su vez, en el apartado anterior se ha expuesto la medida correctora implementada para paliar el impacto que ocasiona el ruido.

6.1.6.5. Vibraciones

En cuanto a las vibraciones, estas se producen durante la fase de construcción por parte de la maquinaria con el fin de realizar el movimiento de tierras para el foso del almacén subterráneo, las estructuras subterráneas y superficiales...

En cuanto la construcción se complete, las vibraciones cesan además, contra estas mismas no existe una medida adicional para contrarrestar el impacto más que las pantallas acústicas.

6.2. GESTIÓN DE RIESGOS Y SEGURIDAD EN EL ALMACENAMIENTO

6.2.1. Objetivos de seguridad

Según el acuerdo internacional actual, los RAA deben ser tratados de manera adecuada y apartados de la biosfera mediante técnicas y medidas apropiadas. Esto evita que las sustancias radiactivas lleguen a la biosfera en concentraciones que puedan tener un impacto inaceptable en los seres humanos y el medio ambiente [15].

Dadas las actuales capacidades científicas y tecnológicas, el método más eficaz para aislar de manera permanente los RAA del entorno humano implica su almacenamiento definitivo a una profundidad apropiada dentro de una formación geológica. Gracias a la existencia de sistemas y medidas de aislamiento diseñados específicamente para una formación geológica adecuada, se garantiza que, una vez que el repositorio esté sellado, no sean necesarias acciones de mantenimiento, vigilancia o medidas correctivas para asegurar su seguridad a largo plazo [15].

Objetivos principales de seguridad:

1. Seguridad radiológica: Garantizar la salvaguardia radiológica a largo plazo tanto para las personas como para el entorno, conforme a los principios actuales de

protección radiológica [15].

2. Responsabilidad con las generaciones futuras: Mantener separados los desechos RAA del entorno humano durante extensos períodos de tiempo, sin requerir que las generaciones futuras mantengan la integridad del sistema de almacenamiento ni que enfrenten restricciones considerables debido a su existencia [15].

Estos objetivos han dado lugar a principios y estándares de seguridad, así como a criterios y requisitos técnicos más detallados y específicos. Estos delinean las acciones adecuadas a seguir y las normas que rigen, condicionando los métodos para demostrar el logro de los objetivos [15].

6.2.2. Concepto básico de seguridad

Actualmente, el consenso generalizado para cumplir con los objetivos de seguridad en la gestión RAA es el AGP. Aunque en el pasado se han explorado otras alternativas, algunas de ellas siguen siendo objeto de estudio e investigación en términos de viabilidad [15].

La premisa fundamental del almacenamiento definitivo en formaciones geológicas implica confinar los residuos radiactivos en el subsuelo geológico profundo a largo plazo, utilizando un sistema de múltiples barreras para aislarlos de la biosfera [15].

Siguiendo este principio fundamental de seguridad, ampliamente utilizado tanto en la ingeniería convencional como en la nuclear, la disposición secuencial de diversas barreras garantiza, ya sea de forma individual o conjunta, la función de contención de los residuos. Los principios fundamentales en los que se basa este concepto son [15]:

- Los fallos en una de las barreras no afectarán significativamente al funcionamiento general del sistema de almacenamiento.
- Las variaciones previsibles en las condiciones del depósito solo influirán de manera parcial en el sistema de barreras.

En el caso del almacenamiento geológico, el sistema de múltiples barreras incluye [15]:

1. La estructura fisicoquímica del residuo.
2. La cápsula que lo encapsula.
3. Los materiales empleados para rellenar y sellar.
4. La formación geológica que lo alberga.
5. Las formaciones geológicas adyacentes.

Este enfoque de múltiples barreras ofrece una redundancia robusta y su eficacia de aislamiento se basa en diversas clases de barreras, algunas creadas por la mano humana y otras naturales, cuya importancia relativa varía según el diseño de almacenamiento seleccionado. Además de ser crucial para la seguridad a largo plazo, un sistema de múltiples barreras de este tipo mejora considerablemente la seguridad durante la fase operativa de la instalación [15].

6.2.3. Gestión de riesgos

6.2.3.1. Planes de actuación en emergencias

1. Plan Básico de Emergencia Nuclear: El Plan Básico de Emergencia Nuclear (PLABEN), aprobado mediante el Real Decreto 1546/2004, de 25 de junio, constituye un conjunto de directrices esenciales que guían la preparación, implementación y mantenimiento efectivo de los planes de respuesta ante situaciones de grave riesgo colectivo, catástrofe o calamidad pública que puedan surgir a raíz de accidentes en centrales nucleares en funcionamiento o en situación de parada, incluyendo aquellas que almacenen combustible gastado [21].

Este plan se organiza en dos niveles de planificación:

- Planes de Emergencia Interiores (PEI): Responsabilidad del titular de la instalación nuclear, que detalla las medidas y procedimientos a seguir dentro de la instalación [22].
 - Planes de Emergencia Nuclear Exteriores (PEN): Responsabilidad de la Administración General del Estado, con la colaboración de otras administraciones públicas según corresponda, y la participación necesaria de los titulares de las instalaciones nucleares. Estos planes abordan la coordinación de acciones y recursos en el exterior de la instalación en caso de emergencia [23].
2. Organización de Respuesta a Emergencia: Constituye la estructura operativa encargada de contar con los recursos humanos, equipos técnicos y protocolos operativos necesarios para desempeñar de manera eficaz y eficiente sus funciones en situaciones de emergencia nucleares y radiológicas. Esta organización se desarrolla como un complemento a la operativa habitual del CSN [24].

6.2.3.2. Superación de los límites de dosis

Cuando, en caso de accidente, se presenten situaciones excepcionales que resulten en exposiciones que superen los límites de dosis establecidos para condiciones normales de trabajo, estas serán consideradas como exposiciones excepcionales y se clasificarán de la siguiente manera [25]:

1. Exposiciones de emergencia: Son voluntarias y superan los límites anuales de dosis del apéndice II. Estas están justificadas cuando se trata de asistir a personas en peligro, evitar la exposición de un gran número de personas o salvar una instalación valiosa. Las personas involucradas deben ser informadas de los riesgos antes de intervenir.
2. Exposiciones accidentales: Son fortuitas e involuntarias, y superan alguno de los límites anuales de dosis del apéndice II.

Se evaluarán las dosis recibidas debido a exposiciones excepcionales, tanto totales como parciales. Si las dosis superan los límites anuales correspondientes, se notificará inmediatamente a [25]:

- El servicio médico.
- El Consejo de Seguridad Nuclear.
- El trabajador afectado.

6.3. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA Y SALUD PÚBLICA

6.3.1. Principios generales de protección radiológica

El sistema de protección radiológica, establecido en la publicación 60 de la CIPR, se aplica a todas las actividades que implican exposición a la radiación, incluyendo tanto la fase operativa como la fase posterior al cierre del AGP. Este sistema se fundamenta en los siguientes principios generales [15]:

1. La fundamentación de una acción: No debería implementarse ninguna acción que involucre exposición a radiación, a menos que dicha acción genere un beneficio neto para los individuos expuestos o la sociedad, lo cual compense el daño radiológico ocasionado [15].
2. La optimización de la protección: Con respecto a cualquier fuente específica involucrada en una práctica, tanto la cantidad de dosis individuales como el número de personas expuestas y la probabilidad de exposición, cuando no hay certeza de que ocurran, deben mantenerse lo más bajas posible, considerando factores económicos y sociales. Este enfoque debe estar sujeto a restricciones en forma de límites para las dosis recibidas por individuos (restricciones de dosis) o los riesgos para los individuos en caso de exposiciones potenciales (restricciones de riesgo), para mitigar cualquier sesgo derivado de consideraciones económicas y sociales [15].
3. Exposición individual y límites de riesgo: La exposición de las personas, que resulta de todas las prácticas pertinentes, debe estar bajo límites de dosis o algún tipo de control de riesgos en caso de posibles exposiciones. Estos límites están diseñados para garantizar que ningún individuo esté expuesto a riesgos

radiológicos considerados inaceptables debido a estas prácticas en condiciones normales. No todas las fuentes pueden ser controladas mediante acciones directas sobre la fuente, por lo que es necesario definir las fuentes relevantes antes de establecer un límite de dosis [15].

6.3.2. Indicadores de seguridad

6.3.2.1. Restricción de dosis

Si las emisiones que provienen del depósito son resultado de procesos graduales, la exposición anual anticipada para las personas en el grupo más sensible deberá permanecer por debajo de la restricción de dosis establecida por las autoridades nacionales, basada en los límites de dosis individuales pertinentes [15].

6.3.2.2. Restricción del riesgo

El nivel de seguridad de un depósito de RAA debe garantizar que el riesgo esperado de efectos adversos en la salud de un individuo típico del grupo crítico, debido a circunstancias imprevistas no consideradas por el principio de restricción de dosis, sea menor que el valor de la restricción de riesgo fijado por las autoridades nacionales basándose en el límite de riesgo individual pertinente [15].

6.3.2.3. Seguridad radiológica adicional

Se requiere que todas las exposiciones a la radiación asociadas con el almacenamiento de RAA se mantengan tan bajas como sea razonablemente posible, considerando factores económicos y sociales [15].

6.3.2.4. Seguridad en clausura

La seguridad de un almacenamiento de RAA en el período posterior a su clausura, una vez que la instalación ha dejado de ser supervisada, no dependerá de la vigilancia activa, controles institucionales, ni de acciones correctoras [15].

6.3.2.5. Carga sobre las generaciones futuras

La carga para las generaciones futuras debe ser minimizada mediante el almacenamiento seguro y oportuno de los RAA, considerando factores técnicos, sociales y económicos [15].

6.3.2.6. Efectos a futuro

El nivel de aislamiento de los RAA debe garantizar que no existan riesgos futuros previsibles para la salud humana ni impactos ambientales que no sean aceptables en el presente [15].

6.3.2.7. *Consideraciones internacionales*

Como principio fundamental, las políticas y criterios establecidos para la protección radiológica de las poblaciones situadas más allá de las fronteras nacionales deben ser igualmente rigurosos que aquellos aplicados a la población del país donde ocurre la liberación de sustancias radiactivas [15].

6.3.3. **Protección radiológica individual en el AGP**

Desde la perspectiva de la protección radiológica, las instalaciones de almacenamiento son consideradas instalaciones nucleares durante su fase operativa, por lo que los trabajadores del AGP disponen de EPIs (traje, guantes y mascarilla) y dosímetros para su protección individual [15].

En el AGP se han definido un conjunto de objetivos de diseño para la exposición ocupacional del personal profesionalmente expuesto, con un límite de 4 mSv/año (2 mSv/año para puestos con permanencia continua) y un límite de 0,1 mSv/año para el público en general, valores que están por debajo de los límites de dosis establecidos por las autoridades nacionales [15].

6.3.4. **Salud pública**

La protección del público y de la población en general se garantizará implementando las medidas y controles necesarios para que las operaciones de producción y uso de sustancias radiactivas y radiaciones ionizantes se realicen con las debidas garantías [25].

6.4. **CONCLUSIONES**

El AGP, al igual que cualquier otra instalación nuclear, debe contar con planes de emergencia y protección radiológica correspondientes. No obstante, es importante destacar que los RAA y el CG almacenado se encuentran herméticamente sellados una vez almacenados, lo que implica que los trabajadores, durante el funcionamiento normal, no están expuestos a ninguna dosis peligrosa de radiación. Por consiguiente, a una distancia de 500 metros de la superficie, el riesgo al que la población está expuesta en condiciones normales es nulo.

7. VIAVILIDAD ECONÓMICA Y FINANCIERA

7.1. COSTOS ASOCIADOS AL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN

Los costos son todas las inversiones que realiza una empresa para llevar a cabo un encargo o una propuesta específica. Existen dos categorías principales de costos: los costos directos y los costos indirectos [26].

Es importante señalar que no todos los gastos se consideran costos, ya que solo se clasifican como tales aquellos que están directamente relacionados con la actividad principal de la empresa [26].

7.1.1. Costos directos

Son gastos que están íntimamente ligados a la fabricación y finalización de un producto. Estos costos son específicos de una actividad única, se relacionan proporcionalmente con el producto y son fácilmente asignables y cuantificables [26].

7.1.1.1. Tipos de costos directos

1. Materia prima: Son los materiales indispensables para la creación del producto final.
2. Mano de obra: Personal necesario para fabricar el producto. Esto abarca los salarios de los trabajadores, así como las contribuciones y otros costos relacionados con el empleo.
3. Extras: Dependen de las empresas, este apartado puede abarcar el transporte, la maquinaria, normativa, emergencias, equipo especializado...

7.1.1.2. Cálculo de costos directos

1. Enumerar los costos: El primer paso consiste en identificar y listar todos los costos involucrados. Esto implica identificar los gastos asociados antes de establecer el presupuesto del servicio que se va a ofrecer [26].
2. Asignar el valor: Determinar el valor de cada costo es crucial al elaborar un presupuesto. Esto es fundamental para evitar pérdidas financieras, ya que un cálculo insuficiente puede resultar en costos no cubiertos adecuadamente [26].

7.1.2. Costos indirectos

Estos gastos están relacionados de forma secundaria con proyectos o tareas planificadas, y no se aplican directamente a un producto específico [26].

Los costos indirectos pueden afectar a múltiples actividades o departamentos dentro de

la empresa, lo que dificulta su cuantificación y asignación. Aunque no forman parte física del producto final, sí son parte integral del proceso de producción [26].

7.1.2.1. Tipos de costos indirectos

1. Costo indirecto general: Aunque no son imprescindibles para la fabricación del producto, los costos comerciales o administrativos pueden ser complementarios y esenciales [26].
2. Costo indirecto de producción: Estos costos tienen una conexión indirecta con la producción. Aunque son fundamentales para obtener el producto final, no están asociados directamente con la mano de obra ni con las materias primas (mantener las máquinas en perfecto estado) [26].
3. Costo indirecto mixto: Se trata de costos que se calculan de forma independiente a los mencionados anteriormente, generalmente porque requieren un control más riguroso. Estos costos varían según la empresa y su naturaleza específica [26].

7.1.2.2. Cálculo de costos indirectos

1. Enumerar los costos: El primer paso consiste en identificar y listar todos los costos involucrados. Esto implica identificar los gastos asociados antes de establecer el presupuesto del servicio que se va a ofrecer [26].
2. Asignar el valor: Determinar el valor de cada costo es crucial al elaborar un presupuesto. Esto es fundamental para evitar pérdidas financieras, ya que un cálculo insuficiente puede resultar en costos no cubiertos adecuadamente [26].

7.1.3. Presupuesto

7.1.3.1. Costo del estudio geotécnico

Para dar un precio aproximado a un estudio geotécnico se ha consultado la web de Generador de precios de España [27], es un software para arquitectos, ingenieros y constructoras que genera presupuestos a partir de una serie de inputs. En la siguiente página se muestra el presupuesto que se ha obtenido de esta página con los inputs más cercanos y semejantes a los del emplazamiento seleccionado, pero, como no llegan a ser idénticos, en el presupuesto real se ha incrementado el costo económico hasta los desde los 45.674,55€ hasta los 50.000 €.

XSE010 Ud Estudio geotécnico.

Estudio geotécnico del terreno en gravas con, 10 sondeos hasta 50 m tomando 1 muestra inalterada y 1 muestra alterada (SPT), 10 penetraciones dinámicas mediante penetrómetro dinámico (DPSH) hasta 50 m y realización de los siguientes ensayos de laboratorio: 2 de análisis granulométrico; 2 de límites de Atterberg; 2 de humedad natural; densidad aparente; resistencia a compresión; Proctor Normal; C.B.R. 2 de contenido en sulfatos.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
mt49sts010	Ud	Transporte de equipo de sondeo, personal especializado y materiales a la zona de trabajo y retorno al finalizar los mismos. Distancia menor de 40 km.	1,000	245,21	245,21
mt49sts020	Ud	Emplazamiento de equipo de sondeo en cada punto.	10,000	59,50	595,00
mt49sts030b	m	Sondeo mediante perforación a rotación en gravas, con extracción de testigo continuo, con batería de diámetros 86 a 101 mm, hasta 25 m de profundidad.	250,000	64,00	16000,00
mt49sts030e	m	Sondeo mediante perforación a rotación en gravas, con extracción de testigo continuo, con batería de diámetros 86 a 101 mm, de 25 a 50 m de profundidad.	250,000	70,40	17600,00
mt49sts040	Ud	Caja porta-testigos de cartón parafinado, fotografiada.	32,000	8,00	256,00
mt49stp010	Ud	Transporte de equipo de penetración dinámica (DPSH), personal especializado y materiales a la zona de trabajo y retorno al finalizar los mismos. Distancia menor de 40 km.	1,000	151,76	151,76
mt49stp020	Ud	Emplazamiento de equipo de penetración dinámica (DPSH) en cada punto.	10,000	49,00	490,00
mt49stp030a	m	Penetración mediante penetrómetro dinámico (DPSH), hasta 15 m de profundidad.	150,000	12,00	1800,00
mt49stp030b	m	Penetración mediante penetrómetro dinámico (DPSH), a partir de 15 m de profundidad.	350,000	15,00	5250,00
mt49sts060b	Ud	Extracción de muestra inalterada mediante tomamuestras de pared gruesa, a partir de 25 m de profundidad.	1,000	38,00	38,00
mt49sts050b	Ud	Extracción de muestra alterada mediante tomamuestras normalizado del ensayo de Penetración Estándar (SPT), a partir de 25 m de profundidad.	1,000	32,00	32,00
mt49sla030	m	Descripción de testigo continuo de muestra de suelo.	500,000	3,10	1550,00
mt49sla080a	Ud	Análisis granulométrico por tamizado de una muestra de suelo, según UNE-EN ISO 17892-4.	2,000	30,10	60,20
mt49sla060	Ud	Ensayo para determinar los Límites de Atterberg (límite líquido y plástico de una muestra de suelo), según UNE-EN ISO 17892-12.	2,000	36,10	72,20
mt49sla050	Ud	Ensayo para determinar el contenido de humedad natural mediante secado en estufa de una muestra de suelo, según UNE 103300.	2,000	4,50	9,00
mt49sla070	Ud	Ensayo para determinar la densidad aparente (seca y húmeda) de una muestra de suelo, según UNE 103301.	1,000	9,00	9,00
mt49sla090	Ud	Ensayo para determinar la resistencia a compresión simple de una muestra de suelo (incluso tallado), según UNE 103400.	1,000	30,10	30,10
mt49sue010	Ud	Ensayo Proctor Normal, según UNE 103500.	1,000	61,97	61,97
mt49sue030	Ud	Ensayo C.B.R. (California Bearing Ratio) en laboratorio, según UNE 103502, sin incluir ensayo Proctor, en explanadas.	1,000	174,33	174,33
mt49sla110	Ud	Ensayo cuantitativo para determinar el contenido en sulfatos solubles de una muestra de suelo, según UNE 103201.	2,000	27,10	54,20
mt49sin010	Ud	Informe geotécnico, con especificación de cada uno de los resultados obtenidos, conclusiones y validez del estudio sobre parámetros para el diseño de la cimentación.	1,000	300,00	300,00
Subtotal materiales:					44778,97
2		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2,000	44778,97	895,58
Costes directos (1+2):					45674,55

7.1.3.2. *Excavación de galerías, construcción de túneles y cámaras*

1. Tuneladora: Alquilar una tuneladora TBM con escudo cuesta unos 50.000 €/día, para este tipo de proyecto se ha considerado utilizar 2 tuneladoras.
2. Detonadores: Se van a utilizar 500 detonadores SCX de 3,6 m, costando 1,26 € cada unidad [28].
3. Barrenos: Se emplearán 250 kg de explosivos a 3,3 €/kg [28].

7.1.3.3. *Diseño y construcción de estructuras de soporte y acceso*

1. Galerías: La construcción de las galerías tiene un costo de unos 2.000-5.000 €/m. Para este proyecto se ha optado por elegir el precio más alto. Multiplicando los 5000 €/m por los 2000 m que miden las galerías se obtiene el costo por galería. Este costo se multiplica por 4 (dos galerías de servicio, una principal y una de ventilación)
2. Pozos: La construcción de los pozos tiene un costo que oscila entre 1.000-5.000 €/m. Para este proyecto se ha optado por elegir un precio intermedio de 2.000€/m, sabiendo que los pozos tienen una longitud de 535m se obtiene el coste total por pozo. Este precio se multiplica por los 3 pozos existentes (pozo ventilación, pozo principal y pozo de servicio.
3. Rampas de acceso: La construcción de las rampas de acceso ronda los 1.000-5.000 €/m. Para este proyecto se ha optado por elegir un precio intermedio de 2.000 €/m, sabiendo que cada tramo de la rampa es de 700m se obtiene el precio por cada tramo de la rampa. Este valor se multiplica por los 6 tramos de la rama.
4. Infraestructura:
 - Talleres: Conociendo que los talleres tienen una dimensión de $8 \times 25 \text{ m}^2$ y que el coste de la construcción de un edificio industrial oscila entre 800-1.500 €/m². Para este proyecto se ha optado por elegir un valor de 1.100 €/m², sabiendo los metros cuadrados de cada taller se calcula el precio por cada taller. Este precio se multiplica por los 4 talleres.
 - Edificios: Los edificios tienen la misma dimensión y coste que los talleres, por ello, tienen el mismo precio unitario. Este valor se multiplica por los 7 edificios.
 - Planta de encapsulado: La planta de encapsulado tiene una dimensión de $25 \times 25 \text{ m}^2$, multiplicando esto por los 1.100 €/m², se obtiene el precio de construcción de la planta de encapsulado.
 - Losa de hormigón: Previo a la construcción de la “industria” en la zona superficial se levantará una losa de hormigón.

- Coste asociado a la construcción de la losa: La superficie total de la “industria” es de $250 \times 250 \text{ m}^2$, se sabe que el coste del hormigón oscila entre los $60\text{-}120 \text{ €/m}^3$ y se estima una altura de 1 m. Escogiendo 90 €/m^3 como precio del hormigón y multiplicándolo por el volumen de la losa obtenemos el coste de construcción de la losa.
 - Coste asociado a la preparación del terreno: El precio de la limpieza, nivelación y compactación del terreno oscila entre los $2\text{-}10 \text{ €/m}^2$. Estableciendo un precio de 5 €/m^2 y multiplicándolo por la superficie de la losa se obtiene el precio final de la preparación del terreno.
 - Coste asociado al refuerzo de la losa de hormigón: La losa de hormigón puede requerir de refuerzo con mallas o con barras de acero, el coste de estos refuerzos oscila entre los $30\text{-}60 \text{ €/m}^2$. Escogiendo un precio medio de 45 €/m^2 y multiplicándolo por los metros cuadrados de la losa se obtiene el costo total asociado al refuerzo.
- Áreas de almacenaje: Los almacenes se dividen en módulos, la instalación consta de 3 módulos a cada lado (6 en total) y cada módulo está compuesto por 7 galerías de almacenamiento.
- Las galerías de almacenaje tienen un diámetro de 2,40 m y una longitud de 500 m. Estas galerías tienen un precio de construcción que varía entre los $2.000\text{-}5.000 \text{ €/m}^3$, escogiendo un precio medio de 4.000 €/m^3 y sabiendo los metros cúbicos de cada galería, se obtiene el precio unitario de construcción por galería.
 - A este precio se le multiplica por 7 galerías por módulo y posteriormente por los 6 módulos que tiene la instalación.

7.1.3.4. Sistema de ventilación monitoreo y seguridad

1. Dosímetros:

- Para la seguridad de los trabajadores se ha propuesto utilizar dosímetros electrónicos que tienen un coste entre $300\text{-}1.000 \text{ €/unidad}$, se ha establecido un precio medio de 700 €/unidad , además, estimando que de todos los trabajadores del AGP solo 90 son personas que trabajan en áreas necesarias de vigilancia radiológica se conoce el precio total de los dosímetros.
- Software para los dosímetros: Los dosímetros necesitan un software especializado para la gestión y el análisis de los datos, el software tiene un precio que oscila entre $1.000\text{-}5.000 \text{ €}$, se ha establecido un precio medio de 3.000 € .

2. Equipo de ventilación:

DISEÑO DE UN ALMACÉN SUBTERRÁNEO DE RESIDUOS NUCLEARES EN ESPAÑA

- Ventiladores primarios y secundarios: Estos ventiladores tienen un precio que varía entre 10.000-50.000 €, se escoge un precio medio de 30.000 €. Se requieren 3 ventiladores para esta instalación.
- Sistemas de filtración: Para esta instalación se utiliza un filtro HEPA/Carbón activado que tiene un precio que oscila entre los 5.000-20.000€, se establece un precio medio de 10.000€ y se requieren 3 filtros para esta instalación.
- Sensores y monitoreo: El coste por sensor oscila entre los 500-2.000 € y se establece un precio medio por sensor de 1.000 €. Para esta instalación se requieren 10 sensores.
- Sistemas de control de temperatura y humedad: El coste de este sistema oscila entre los 10.000-50.000€, se establece un precio medio de 30.000€ y se requieren 5 sistemas de control para esta instalación.

7.1.3.5. *Equipo informático*

1. Servidores de almacenamiento y datos: El precio de los servidores oscila entre los 5.000-20.000 €, se establece un precio medio de 10.000 € y se requieren 5 unidades de servidores.
2. Estaciones de trabajo: El precio de los ordenadores oscila entre los 1.000-5.000 €, se establece un precio medio de 3.000 € y se requieren 20 ordenadores para esta instalación.
3. Sistemas de visualización: El precio de las pantallas oscila entre los 2.000-10.000 €, se establece un precio medio de 5.000 € y se requieren 10 unidades de pantallas para la instalación.
4. Equipos de comunicación y redes: El precio medio para estos equipos oscila entre los 500-5.000 €, se establece un precio medio de 3.000€.
5. Software especializado: El coste de la licencia varía entre los 1.000-50.000€, se ha establecido un precio medio de 20.000€ por la licencia.

7.1.3.6. *Equipos y procedimientos para el manejo seguro de los RR*

1. Trajes de protección: El coste de un traje de protección para el sector nuclear oscila entre 500-2.000 €, se ha establecido un precio medio de 1.500€. Estos trajes están destinados, al igual que los dosímetros, a los trabajadores expuestos a la contaminación radiológica. Multiplicando este precio medio por 90 se obtiene el coste total de los trajes de protección.
2. Botas y calzado de seguridad: El coste de las botas de seguridad varían entre 100-500 €, se ha establecido un precio medio de 200€ por un par de botas. Multiplicando esto por los 90 trabajadores se obtiene el coste total de las botas

de protección.

3. Guantes y mangas de protección: El precio de los guantes de protección varía entre 50-200 € el par de guantes, se establece un precio medio de 90 € por cada par. Multiplicándolo por los 90 trabajadores se obtiene el precio total de los guantes de protección.
4. Cascos de seguridad: El precio de los cascos de seguridad oscila entre los 50-200 €, se ha establecido un precio medio de 100 € por casco. Multiplicándolo por los 90 trabajadores se obtiene el coste total de los cascos de seguridad.

7.1.3.7. Salarios

1. Fase de construcción:

- Ingenieros: Durante la fase de construcción se ha estimado que harán falta 30 ingenieros que tendrán un salario entre 60.000-100.000 €brutos/año. Se ha considerado un salario medio de 70.000 €brutos/año.
- Trabajadores construcción: Durante la fase de construcción se ha estimado que harán falta 200 trabajadores en la construcción que tendrán un salario entre 12-25 €brutos/hora. Se ha considerado un costo medio de 18 €brutos/hora, multiplicando esto por una jornada de 40 h/semana, 4 semanas/mes y 12 meses/año se obtiene el salario bruto al año.
- Especialistas en seguridad y salud: Durante la fase de construcción se ha estimado que harán falta 5 especialistas en seguridad y salud que tendrán un salario de 40.000 €brutos/año.
- Técnicos operarios: Durante la fase de construcción se ha estimado que harán falta 60 técnicos que tendrán un salario entre 35.000-50.000 €brutos/año. Se ha considerado un salario medio de 35.000 €brutos/año.
- Personal administrativo: Durante la fase de construcción se ha estimado que harán falta 10 administrativos que tendrán un salario de 40.000 €brutos/año.

2. Fase de explotación:

- Personal técnico-científico: Durante la fase de explotación se ha estimado que harán falta 35 técnicos-científicos que tendrán un salario entre 70.000-100.000 €brutos/año. Se ha considerado un salario medio de 80.000 €brutos/año.
- Ingenieros y especialistas en seguridad: Durante la fase de explotación se ha estimado que harán falta 35 ingenieros y especialistas en seguridad que tendrán un salario entre 60.000-100.000 €brutos/año. Se ha considerado un salario medio de 70.000 €brutos/año.

- Operarios y técnicos de mantenimiento: Durante la fase de explotación se ha estimado que harán falta 40 operarios para el mantenimiento que tendrán un salario entre 30.000-60.000 €brutos/año. Se ha considerado un salario medio de 40.000 €brutos/año.
- Personal de seguridad: Durante la fase de explotación se ha estimado que harán falta 30 personas dedicadas a la seguridad del almacén que tendrán un salario entre 30.000-50.000 €brutos/año. Se ha considerado un salario medio de 30.000 €brutos/año.
- Personal administrativo: Durante la fase de explotación se ha estimado que harán falta 10 administrativos que tendrán un salario entre 30.000-50.000 €brutos/año. Se ha considerado un salario medio de 30.000 €brutos/año.

7.1.3.8. Permisos ambientales y de construcción

Para el presupuesto de este trabajo no se han tenido en cuenta los costos de estos permisos ya que dependen de múltiples características.

7.1.3.9. Costos continuos de mantenimiento

Al igual que el apartado anterior, los costos continuos de mantenimiento tampoco se han tenido en cuenta a la hora de redactar el presupuesto debido a que este engloba numerosas características:

1. Monitoreos y controles ambientales.
2. Reparaciones y reemplazos de equipos.
3. Mantenimiento de los sistemas de ventilación.
4. Formación continua para el personal.
5. Inspecciones y auditorías.
6. Material destinado a las oficinas y talleres.
7. Costes asociados al consumo de electricidad, agua...
8. Actualización y mejora de las tecnologías.
9. Seguros médicos.

7.1.3.10. Fondos reservados para imprevistos

Se ha considerado que los fondos destinados a imprevistos sean de un 10% del presupuesto total. Como en el presupuesto no se han tenido en cuenta ciertos puntos

se ha incrementado este porcentaje al 20%.

A continuación se detalla el presupuesto para la construcción y explotación del AGP.

Obra: Almacén Geológico Profundo						
Presupuesto				% C.I. 0		
Código	Tipo	Ud	Resumen	Cantidad	Precio (€)	Importe (€)
PRESUPUESTO	Capítulo		Almacén Geológico Profundo		426.687.102,28	426.687.102,28
01	Capítulo		Estudio geotécnico y análisis sísmico		50.000,00	50.000,00
01.01	Capítulo		Estudio geotécnico		50.000,00	50.000,00
01.01.01	Partida	€	Estudio de las propiedades del suelo del emplazamiento	1,000	50.000,00	50.000,00
			01.01		50.000,00	50.000,00
			01		50.000,00	50.000,00
02	Capítulo		Excavación de galerías, construcción de túneles y cámaras		101.455,00	101.455,00
02.01	Capítulo		Excavación con tuneladora		100.000,00	100.000,00
02.01.01.	Partida	€/día	Excavación con tuneladora con escudo	2,000	50.000,00	100.000,00
			02.01		100.000,00	100.000,00
02.02	Capítulo		Voladuras		1.455,00	1.455,00
02.02.01	Capítulo		Detonadores		630,00	630,00
02.02.01.01	Partida	€	Detonadores	500,000	1,26	630,00
			02.02.01		630,00	630,00
02.02.02	Capítulo		Barrenos con explosivo		0,00	0,00
			02.02.02		0,00	0,00
02.02.02.01	Partida	€	Colocación del explosivo en los barrenos	250,000	3,30	825,00
			02.02		1.455,00	1.455,00
			02		101.455,00	101.455,00
03	Capítulo		Diseño y construcción de estructuras de soporte y acceso		407.474.547,28	407.474.547,28
03.01	Capítulo		Galerías		4.000.000,00	4.000.000,00
03.01.01	Partida	€	Construcción y revestimiento de las galerías de servicio, ventilación y acceso	4,000	1.000.000,00	4.000.000,00
			03.01		4.000.000,00	4.000.000,00
03.02	Capítulo		Pozos		3.210.000,00	3.210.000,00
03.02.01	Partida	€	Construcción y revestimiento de los pozos de ventilación, servicio y principal	3,000	1.070.000,00	3.210.000,00
			03.02		3.210.000,00	3.210.000,00
03.03	Capítulo		Rampas de acceso		8.400.000,00	8.400.000,00
03.03.01	Partida	€	Construcción y revestimiento de los tramos de la rampa de acceso	6,000	1.400.000,00	8.400.000,00
			03.03		8.400.000,00	8.400.000,00

Presupuesto AGP

03.04	Capítulo		Infreestructura		11.857.500,00	11.857.500,00
03.04.01	Capítulo		Talleres		880.000,00	880.000,00
03.04.01.01	Partida	€	Construcción de los 4 talleres	4,000	220.000,00	880.000,00
			03.04.01		880.000,00	880.000,00
03.04.02	Capítulo		Edificios		1.540.000,00	1.540.000,00
03.04.02.01	Partida	€	Construcción de los edificios en superficie	7,000	220.000,00	1.540.000,00
			03.04.02		1.540.000,00	1.540.000,00
03.04.03	Capítulo		Planta de encapsulado		687.500,00	687.500,00
03.04.03.01	Partida	€	Construcción del edificio de planta de encapsulado	1,000	687.500,00	687.500,00
			03.04.03		687.500,00	687.500,00
03.04.05	Capítulo		Losa de hormigón		8.750.000,00	8.750.000,00
03.04.05.01	Partida	€	Coste asociado a la construcción de la losa de hormigón	1,000	5.625.000,00	5.625.000,00
03.04.05.02	Partida	€	Coste asociado a la preparación del terreno	1,000	312.500,00	312.500,00
03.04.05.03	Partida	€	Coste asociado al refuerzo de la losa de hormigón	1,000	2.812.500,00	2.812.500,00
			03.04.05		8.750.000,00	8.750.000,00
			03.04		11.857.500,00	11.857.500,00
03.05	Capítulo		Áreas de almacenaje		380.007.047,28	380.007.047,28
03.05.01	Capítulo		Módulos de almacenaje		380.007.047,28	380.007.047,28
03.05.01.01	Partida	€	Construcción de las galerías de almacenaje por módulo	6,000	63.334.507,88	380.007.047,28
			03.05.01		380.007.047,28	380.007.047,28
			03.05		380.007.047,28	380.007.047,28
			03		407.474.547,28	407.474.547,28
04	Capítulo		Sistema de ventilación monitoreo y seguridad		529.000,00	529.000,00
04.01	Capítulo		Dosímetros		66.000,00	66.000,00
04.01.01	Partida	€	Dosímetros para los trabajadores	90,000	700,00	63.000,00
04.01.02	Partida	€	Software para los dosímetros	1,000	3.000,00	3.000,00
			04.01		66.000,00	66.000,00
04.02	Capítulo		Equipo ventilación		280.000,00	280.000,00
04.02.01	Capítulo		Ventiladores primarios y secundarios		90.000,00	90.000,00
04.02.01.01	Partida	€	Costo asociado a los ventiladores primarios y secundarios	3,000	30.000,00	90.000,00
			04.02.01		90.000,00	90.000,00
04.02.02	Capítulo		Sistemas de filtración		30.000,00	30.000,00
04.02.02.01	Partida	€	Costo asociado a los sistemas de filtración	3,000	10.000,00	30.000,00

Presupuesto AGP

			04.02.02	30.000,00	30.000,00
04.02.03	Capítulo		Sensores y monitoreo	10.000,00	10.000,00
04.02.03.01	Partida	€	Costo asociado a los sensores y monitoreos	10,000	1.000,00
			04.02.03	10.000,00	10.000,00
04.02.04	Capítulo		Sistemas de control de temperatura y humedad	150.000,00	150.000,00
04.02.04.01	Partida	€	Costo asociado a los sistemas de control de temperatura y humedad	5,000	30.000,00
			04.02.04	150.000,00	150.000,00
			04.02	280.000,00	280.000,00
04.03	Capítulo		Equipo informático	183.000,00	183.000,00
04.03.01	Capítulo		Servidores de almacenamiento y datos	50.000,00	50.000,00
04.03.01.01	Partida	€	Costo asociado a los servidores	5,000	10.000,00
			04.03.01	50.000,00	50.000,00
04.03.02	Capítulo		Estaciones de trabajo	60.000,00	60.000,00
04.03.02.01	Partida	€	Costo asociado a las estaciones de trabajo	20,000	3.000,00
			04.03.02	60.000,00	60.000,00
04.03.03	Capítulo		Sistemas de visualización	50.000,00	50.000,00
04.03.03.01	Partida	€	Costo asociado a los sistemas de visualización	10,000	5.000,00
			04.03.03	50.000,00	50.000,00
04.03.04	Capítulo		Equipos de comunicación y redes	3.000,00	3.000,00
04.03.04.01	Partida	€	Costo asociado a los equipos de comunicación y redes	1,000	3.000,00
			04.03.04	3.000,00	3.000,00
04.03.05	Capítulo		Software especializado	20.000,00	20.000,00
04.03.05.01	Partida	€	Costo asociado al software especializado	1,000	20.000,00
			04.03.05	20.000,00	20.000,00
			04.03	183.000,00	183.000,00
			04	529.000,00	529.000,00
05	Capítulo		Equipos y procedimientos para el manejo seguro de los RR	170.100,00	170.100,00
05.01	Capítulo		Trajes de protección	135.000,00	135.000,00
05.01.01	Partida	€	Costo asociado a los trajes de protección	90,000	1.500,00
			05.01	135.000,00	135.000,00
05.02	Capítulo		Botas y calzado de seguridad	18.000,00	18.000,00
05.02.01	Partida	€	Costo asociado a los pares de botas	90,000	200,00
			05.02	18.000,00	18.000,00

Presupuesto AGP

05.03	Capítulo		Guantes y mangas de protección		8.100,00	8.100,00
05.03.01	Partida	€	Costo asociado a los pares de guantes	90,000	90,00	8.100,00
			05.03		8.100,00	8.100,00
05.04	Capítulo		Cascos de seguridad		9.000,00	9.000,00
05.04.01	Partida	€	Costo asociado a los cascos de protección	90,000	100,00	9.000,00
			05.04		9.000,00	9.000,00
			05		170.100,00	170.100,00
06	Capítulo		Salarios		18.362.000,00	18.362.000,00
06.01	Capítulo		Fase contrucción		11.712.000,00	11.712.000,00
06.01.01	Capítulo		Ingenieros		2.100.000,00	2.100.000,00
06.01.01.01	Partida	€/año	Costo asociado al salario de cada ingeniero durante la fase de construcción	30,000	70.000,00	2.100.000,00
			06.01.01		2.100.000,00	2.100.000,00
06.01.02	Capítulo		Trabajadores de construcción		6.912.000,00	6.912.000,00
06.01.02.01	Partida	€/año	Costo asociado al salario de cada trabajador durante la fase de construcción	200,000	34.560,00	6.912.000,00
			06.01.02		6.912.000,00	6.912.000,00
06.01.03	Capítulo		Especialistas en seguridad y salud		200.000,00	200.000,00
06.01.03.01	Partida	€/año	Costo asociado al salario de cada especialista en seguridad y salud durante la fase de construcción	5,000	40.000,00	200.000,00
			06.01.03		200.000,00	200.000,00
06.01.04	Capítulo		Técnicos operarios		2.100.000,00	2.100.000,00
06.01.04.01	Partida	€/año	Costo asociado al salario de cada operario durante la fase de construcción	60,000	35.000,00	2.100.000,00
			06.01.04		2.100.000,00	2.100.000,00
06.01.05	Capítulo		Personal administrativo		400.000,00	400.000,00
06.01.05.01	Partida	€/año	Costo asociado al salario de cada administrativo durante la fase de construcción	10,000	40.000,00	400.000,00
			06.01.05		400.000,00	400.000,00
			06.01		11.712.000,00	11.712.000,00
06.02	Capítulo		Fase explotación		6.650.000,00	6.650.000,00
06.02.01	Capítulo		Personal técnico-científico		2.800.000,00	2.800.000,00
06.02.01.01	Partida	€/año	Coste asociado al salario bruto anual del personal técnico-científico	35,000	80.000,00	2.800.000,00
			06.02.01		2.800.000,00	2.800.000,00
06.02.02	Capítulo		Ingenieros y especialistas en seguridad		1.050.000,00	1.050.000,00
06.02.02.01	Partida	€/año	Coste asociado al salario bruto anual de los ingenieros y especialistas en seguridad	15,000	70.000,00	1.050.000,00
			06.02.02		1.050.000,00	1.050.000,00
06.02.03	Capítulo		Operarios y técnicos de mantenimiento		1.600.000,00	1.600.000,00

Presupuesto AGP

06.02.03.01	Partida	€/año	Coste asociado al salario bruto anual de los operarios y técnicos de mantenimiento	40,000	40.000,00	1.600.000,00
			06.02.03		1.600.000,00	1.600.000,00
06.02.04	Capítulo		Personal de seguridad		900.000,00	900.000,00
06.02.04.01	Partida	€/año	Coste asociado al salario bruto anual del personal de seguridad	30,000	30.000,00	900.000,00
			06.02.04		900.000,00	900.000,00
06.02.05	Capítulo		Personal administrativo		300.000,00	300.000,00
06.02.05.01	Partida	€/año	Coste asociado al salario bruto anual del personal administrativo	10,000	30.000,00	300.000,00
			06.02.05		300.000,00	300.000,00
			06.02		6.650.000,00	6.650.000,00
			06		18.362.000,00	18.362.000,00
			PRESUPUESTO		426.687.102,28	426.687.102,28

El presupuesto de este trabajo se divide en tres partes:

1. Gastos independientes: Engloba todos los gastos que no dependen de la duración temporal del proyecto, siendo estos todos los capítulos excepto el de los salarios. Estos conllevan un costo de 408.325.102,3 €.
2. Salarios fase construcción: Estos gastos dependen de la duración de la fase de construcción. Para esta fase se ha estimado una duración de 30 años, en caso de existir retrasos estos se sufragan con los fondos reservados para imprevistos. Multiplicando el costo total del salario en la fase de construcción por los 30 años se obtiene un precio final de 351.360.000 €.
3. Salarios fase de explotación: Estos gastos dependen de la duración de la fase de explotación. Para esta fase se podrían estimar múltiples duraciones temporales. En este caso, el costo de los salarios en la fase de explotación se va a excluir del presupuesto total ya que este mismo se abonará cada año durante el tiempo que dure el AGP mediante fondos públicos.

El presupuesto total de este proyecto es la suma de los gastos independientes, los salarios en la fase de construcción y el costo del fondo reservado para imprevistos. Se obtiene un presupuesto final de 911.622.122,8 € - NOVECIENTOS ONCE MILLONES SEISCIENTOS VEINTIDÓS MIL CIENTO VEINTIDÓS EUROS CON OCHO CÉNTIMOS.

7.2. FUENTES DE FINANCIAMIENTO Y MODELOS DE NEGOCIO

7.2.1. Fondo para la financiación de las actividades del PGRR

El sistema de gestión de los RR y el CG, que también abarca el desmantelamiento y cierre de las IINN, se financia según el principio de "quien contamina, paga". Este sistema se sustenta en asignaciones al Fondo destinado a financiar actividades del PGRR, conforme a lo establecido en la disposición adicional sexta de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico [6].

La disposición adicional sexta mencionada fue ampliamente modificada por la Ley 11/2009, de 26 de octubre, que regula las Sociedades Anónimas Cotizadas de Inversión en el Mercado Inmobiliario. Esta ley estableció un sistema de financiación basado en cuatro tasas según el tipo de productores o servicios. Desde la entrada en vigor de esta modificación el 1 de enero de 2010, el Fondo se financia con ingresos derivados de estas tasas, incluyendo los rendimientos financieros generados por ellas. La Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público, en su disposición final undécima, modifica la Disposición adicional primera de la Ley 58/2003, General Tributaria, para que las tasas destinadas a financiar las actividades del PGRR tengan la naturaleza jurídica de prestaciones patrimoniales de carácter público no tributario [6].

7.2.1.1. *Prestación patrimonial de carácter público no tributario relativa a peajes*

Esta vía de financiación cubre los costos asociados a la gestión de los RR y el GC de las

CCNN que cesaron su operación definitivamente antes del 1 de enero de 2010.

También abarca los costos futuros relacionados con las CCNN o instalaciones de fabricación de elementos combustibles que cesaron su operación definitiva y para los cuales no se había previsto durante su funcionamiento, así como aquellos que puedan surgir por el cese anticipado de la instalación debido a causas fuera del control del titular [6].

También se contemplan en esta disposición las cantidades asignadas para financiar la parte del Fondo destinada a cubrir los costos de gestión de los RR provenientes de actividades de investigación determinadas por el MITECO como directamente vinculadas a la generación de energía nuclear. Además, se incluyen los gastos de desmantelamiento y cierre que deben llevarse a cabo como consecuencia de la minería y producción de concentrados de uranio antes del 4 de julio de 1984, así como los costos derivados del reprocesamiento del CG enviado al extranjero antes de la entrada en vigor de la ley que lo regula. Cualquier otro costo específico será especificado mediante Real Decreto [6].

La disposición adicional sexta de la Ley 54/1997 determina la tasa impositiva sobre el total recaudado mediante los peajes estipulados por esta ley [6].

7.2.1.2. Prestación patrimonial de carácter público no tributario relativa a las CCNN en explotación

Esta es la vía por la cual todos los costos incurridos a partir del 1 de enero de 2010, relacionados con la gestión los RR y el CG generados en las CCNN en operación, serán financiados por los titulares de dichas centrales durante su operación. Esto incluye los costos asociados al desmantelamiento y cierre, independientemente de cuándo se generen dichos costos [6].

Además, los titulares de las CCNN serán responsables de financiar las asignaciones destinadas a los municipios afectados por estas instalaciones o de almacenamiento de combustible gastado o residuos radiactivos, según lo establecido por el MITECO. Esto también incluye los impuestos que se generen en relación con las actividades de almacenamiento de los RR y el CG, sin importar cuándo se generen dichos tributos [6].

Durante la operación de cada CCNN, la cuota a pagar se calcula multiplicando la cantidad de energía nucleoelectrónica bruta generada, medida en kWh y redondeada hacia abajo, por una tarifa fija por unidad y un coeficiente corrector determinado según la escala establecida en la disposición adicional sexta de la Ley 54/1997 [6].

7.2.1.3. Prestación patrimonial de carácter público no tributario relativa a otras instalaciones

Se encarga de gestionar los residuos radiactivos generados en instalaciones distintas a las mencionadas anteriormente, como IIRR (medicina, industria, agricultura e investigación), CIEMAT u otras empresas. Todos estos usuarios asumen directamente

los costes en el momento en que se prestan los servicios. La tarifa que deben abonar está determinada por la cantidad o unidad de residuos entregados para su gestión, multiplicada por los tipos impositivos establecidos en la disposición adicional sexta de la Ley 54/1997 [6].

7.2.1.4. Conclusiones

Las asignaciones al Fondo están exclusivamente destinadas a financiar las actividades planeadas en el PGRR. Al término del período de gestión de los RR y desmantelamiento de las instalaciones según lo estipulado en el PGRR, todas las cantidades ingresadas en el Fondo a través de diversas vías financieras deben cubrir integralmente los costos incurridos, garantizando así que el saldo final sea nulo [6].

El cálculo de los ingresos, derivados de las prestaciones patrimoniales, se fundamenta en la recaudación pendiente, es decir, en la diferencia entre el valor presente de los costos futuros actualizados utilizando una tasa de descuento del 1,5% para cada prestación patrimonial, y el fondo disponible para cada una de ellas. La determinación del costo futuro aplicable a cada prestación patrimonial implica distribuir los costos entre los productores o servicios prestados que integran la gestión. La tasa de descuento puede ser ajustada mediante una resolución de la Secretaría de Estado de Energía, basada en el análisis económico-financiero proporcionado por Enresa al MITECO durante el primer semestre de cada año [6].

Bajo la legislación vigente, los tipos impositivos y los elementos tributarios utilizados para calcular las tarifas de estas contribuciones económicas pueden ser ajustados por el Gobierno mediante un Real Decreto, basado en una evaluación financiera actualizada del costo de las actividades correspondientes. Actualmente, las tarifas establecidas por la Ley 11/2009, de 26 de octubre, se mantienen en vigor, con excepción de la contribución económica aplicable a otras instalaciones, modificada por la Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible, y la tarifa fija unitaria para instalaciones nucleares en explotación, modificada por el Real Decreto 750/2019, de 27 de diciembre [6].

La administración del Fondo, bajo la responsabilidad de Enresa, se basa en los principios de seguridad, rentabilidad y liquidez. Existe un Comité de Seguimiento y Control, que depende del MITECO a través de la Secretaría de Estado de Energía. Este comité se encarga de supervisar, controlar y evaluar las inversiones temporales relacionadas con la gestión financiera del Fondo [6].

El 7º PGRR estima unos costes futuros de 20.220 millones de euros, los cuales serán financiados a través del Fondo para la financiación de las actividades del PGRR. Este fondo está administrado por Enresa y se nutre de las contribuciones económicas de los titulares de las instalaciones nucleares, en cumplimiento del principio de “quien contamina, paga” [29].

Este proyecto se financiará con el Fondo destinado a la financiación de las actividades del PGRR. Con este Fondo no solo se sufraga la construcción, también los costos de

explotación y mantenimiento a lo largo de los años.

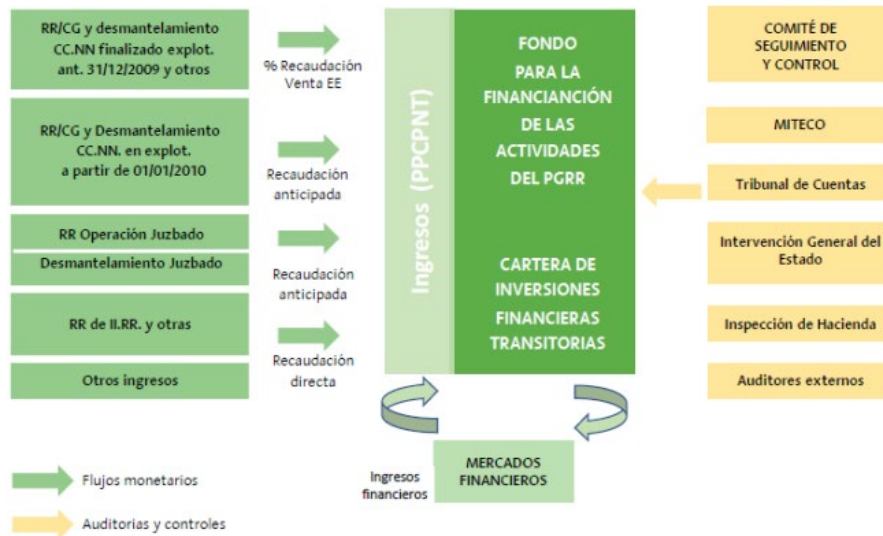


Figura 22: Esquema de financiación de las actividades del PGRR. Fuente MITECO.

Este Fondo es fundamental para la gestión segura y eficiente de los RR en España, en este caso, de los RAA y el CG.

De la misma manera, es importante la financiación del mantenimiento continuo del almacén, esto garantiza que la instalación permanezca en condiciones seguras y operativas durante toda su vida útil, minimizando cualquier riesgo potencial asociado con los RR.

7.2.2. Fondo para la financiación de las actividades de I+D de Enresa

Por otra parte, diferentes organizaciones participan en los planes de I+D de Enresa. Por ello, para este proyecto también se ha previsto que, además de la financiación proporcionada por el MITECO a través de los fondos anuales del PGRR, las entidades que apoyan los planes de I+D de Enresa también podrían contribuir, en el desarrollo de este proyecto implementando convenios colaborativos.

Entre las organizaciones y/o entidades que colaboran en los planes de I+D de Enresa se encuentran [13]:

1. Empresas.
2. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
3. Universidades.
4. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

5. Fundaciones.

6. Organizaciones extranjeras.

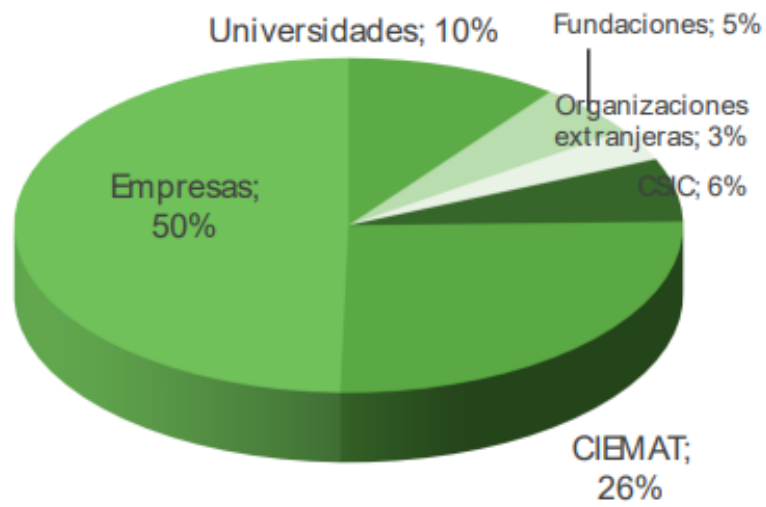


Figura 23: Participación en el desarrollo del 7º plan de I+D de Enresa. Fuente Enresa.

8. CONCLUSIONES

La construcción de un AGP en España es una medida necesaria y beneficiosa por varias razones. En primer lugar, España no cuenta con un AGP propio y actualmente envía su combustible gastado a Francia para su almacenamiento temporal, a pesar de ello, en el momento en el que cese dicho contrato, los RAA retornan a España.

Además, dado el compromiso de España de cerrar gradualmente sus centrales nucleares, es imprescindible disponer de un lugar seguro para almacenar el combustible gastado. El AGP representa la mejor opción, ya que ofrece una amplia capacidad, un alto nivel de seguridad y una durabilidad de hasta un millón de años. Aunque su construcción inicial pueda implicar una inversión significativa, los beneficios a largo plazo en términos de seguridad y gestión de residuos nucleares justifican plenamente este costo.

Por otra parte, el AGP ofrece la flexibilidad de poder almacenar también los RBMA, en caso de que el actual depósito de El Cabril se llene y no se le conceda la ampliación. Esta capacidad adicional brinda una solución integral y sostenible para la gestión de los residuos nucleares en España.

En conclusión, la construcción de un AGP en España es una medida estratégica y necesaria para garantizar la seguridad y el manejo adecuado de los residuos nucleares del país, cumpliendo con los compromisos internacionales y contribuyendo a un futuro energético más sostenible y seguro.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «¿Cómo se clasifican los residuos radiactivos? - Foro Nuclear». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-residuos-radiactivos/como-se-clasifican-los-residuos-radiactivos/>
- [2] «Clasificación de residuos radiactivos - CSN». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/clasificacion-de-residuos-radiactivos>
- [3] «¿Cómo se gestionan los residuos radiactivos?», *Foro Nuclear*, ene. 2020, Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/como-se-gestionan-los-residuos-radiactivos/>
- [4] «Enresa - C.A. El Cabril». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.enresa.es/esp/inicio/actividades-y-proyectos/ca-el-cabril>
- [5] «Enresa - Residuos de Alta Actividad». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.enresa.es/esp/inicio/actividades-y-proyectos/residuos-de-alta-actividad>
- [6] *7º Plan General de Residuos Radiactivos*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/nuclear/Residuos/Documents/20231227%20PGRR%207_Version%2027%20diciembre%202023.pdf
- [7] P. Zuloaga Lalana, *INSTALACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS DE EL CABRIL, EN HORNACHUELOS, CÓRDOBA-ESPAÑA*. ENRESA, 1994. Accedido: 14 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/download/1130/1213>
- [8] *Origen y gestión de residuos radiactivos*. Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 2000. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cofis.es/wp-content/uploads/2022/10/origen_residuos.pdf
- [9] «Gestión de residuos radiactivos», *Universidad de Córdoba*, Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.catedraenresauco.com/gestion-de-residuos-radiactivos/>
- [10] *Protección radiológica*. CSN, 2012. Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/914805/Protecci%C3%B3n%20radiol%C3%B3gica>
- [11] *Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Residuos Radiactivos*. CSN, 2003. Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/103567/Primer+informe+nacional+de+la+convenci%C3%B3n+conjunta+-+Mayo+de+2003+-+Espa%C3%B1ol/837e38ba-01cc-4056-837c-3de4312d0494>
- [12] «Almacenamiento geológico profundo: visión global y estado de la cuestión en España», *CSN*, Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/-/almacenamiento-geologico-profundo-vision-global-y-estado-de-la-cuestion-en-espana>

- [13] *8º Plan de I+D*. ENRESA. Accedido: 14 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.enresa.es/documentos/Plan_I_D_2018_2023_versio_n_1.pdf
- [14] *Environmental Impact Statement (Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel)*. SKB, 2011. Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.skb.com/wp-content/uploads/2016/03/21014-MKB-ENG-webb-150dpi.pdf>
- [15] *ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO PROFUNDO DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD (AGP) DISEÑOS CONCEPTUALES GENÉRICOS*. ENRESA. Accedido: 3 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/045/27045788.pdf
- [16] *MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA*. MADRID: IGME. Accedido: 4 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/memorias/MMagna0120.pdf>
- [17] *Granitos y rocas metamórficas del Oeste de Galicia*. Pontevedra: SOCIEDAD GEOLOGICA DE ESPAÑA, 2019. Accedido: 4 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://sociedadgeologica.org/comisiones/rocas-igneas-metamorficas/memoria_pgg_rim_excursion__r6.pdf
- [18] *FEBEX project full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock*. ENRESA, 2000. Accedido: 3 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/033/31033797.pdf?r=1
- [19] HAYDÉE QUEVEDO CALDERÓN, *ESTUDIO DE UNA MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA EN LA PROVINCIA DE CANTABRIA, DISPUESTA EN EL MUNICIPIO DE VALDEPRADO DEL RÍO*. Uninversidad de Cantabria, 2015. Accedido: 10 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/7363>
- [20] *Resolución de 14 de julio de 2023, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se formula declaración ambiental estratégica del «7.º Plan General de Residuos Radioactivos»*. BOE, 2023. Accedido: 10 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2023/07/27/pdfs/BOE-A-2023-17361.pdf>
- [21] «Plan Básico de Emergencia Nuclear», CSN, Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/respuesta-a-emergencias/organizacion-nacional-ante-emergencias/plan-basico-de-emergencia-nuclear>
- [22] «Planes de Emergencia Nuclear Interior (PEI)», CSN, Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/planes-de-emergencia/nuclear-interior-peii>
- [23] «Planes de Emergencia Nuclear Exterior (PEN)», CSN, Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/planes-de-emergencia/nuclear-exterior-pen>
- [24] «Activación de la Organización de Respuesta a Emergencias del CSN», CSN, Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/respuesta-a-emergencias-del->

- csn#:~:text=La%20Organizaci%C3%B3n%20de%20Respuesta%20ante,en%20emergencias%20nucleares%20y%20radiol%C3%B3gicas.
- [25] «Real Decreto 53/1992, de 24 de enero, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.», *BOE*, 1992, Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1992-3084>
- [26] Anna Pérez, «¿Qué son los costos directos e indirectos de un proyecto?», *OBS Business School*, 2021, Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.obsbusiness.school/blog/que-son-los-costos-directos-e-indirectos-de-un-proyecto>
- [27] CYPE Ingenieros S.A, «Generador de precios España». Accedido: 14 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=1|0_1|0|XSE010|xse_caso:_1_0_0_0_0_0_2_9_4800_0_0|xse_penet:_0_9_4800|xse_ensayos:_2_2_2_0_1_0_0_1_0_1_0_0_2_0#gsc.tab=0
- [28] Raúl Vierna Peña, *DEMOLICIÓN CONJUNTO EDIFICATORIO DE 72 VIVIENDAS MEDIANTE VOLADURA CON EXPLOSIVOS*. 2023. Accedido: 14 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/30730/2023_Viern_aPe%c3%b1aR.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [29] «El Gobierno aprueba el Séptimo Plan General de Residuos Radiactivos», *MITECO*, 2023, Accedido: 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2023/12/el-gobierno-aprueba-el-septimo-plan-general-de-residuos-radiacti.html>