



Planeación ciclo combinado de generación de energía nuclear y potabilización de agua por medio de desalinización bajo metodología ágil

Johnatan Escobar Osorio

(Monografía)

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

Diciembre del 2025

Planeación ciclo combinado de generación de energía nuclear y potabilización de agua por medio de desalinización bajo metodología ágil

Johnatan Escobar Osorio
(Monografía)

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesor(a)
Ivonne Tatiana Muñoz Martínez
Magíster en Administración

Corporación Universitaria Minuto de Dios
Rectoría Virtual
Programa Especialización en Gerencia de Proyectos
Diciembre del 2025

Contenido

Lista de figuras	5
Lista de tablas.....	6
Resumen	7
Palabras clave	7
Abstract.....	8
Key words.....	8
Introducción.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.1 Descripción del problema.....	10
1.2 La pregunta de investigación.....	12
1.3 Los objetivos de investigación.....	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
1.4 Justificación de la investigación.....	13
2. MARCO DE REFERENCIA	14
2.1. Marco de Antecedentes	14
2.2. Marco Teórico	17
2.2.1. Ciclo combinado energía nuclear y desalinización	17
2.2.2. Metodología ágil para gestión de proyectos	20
2.3. Marco normativo.....	22
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1. Enfoque y alcance de la investigación.....	25
3.2. Población y muestra	26
3.2.1. Definición de la población	26
3.2.2. Cálculo y selección de la muestra	26
3.3. Instrumento(s).....	27
3.4. Descripción de procedimientos.....	28

Planeación ciclo combinado de generación de energía nuclear y potabilización de agua por medio de desalinización bajo metodología ágil

3.5. Análisis de información	28
3.6. Consideraciones éticas	29
3.6.1 Análisis consideraciones éticas	29
3.6.2 Instrumentos de aceptación y autorización.....	30
4. RESULTADOS	31
4.1. Resultados análisis documental	31
4.1.1. Evaluación contexto hídrico y energético de la región Caribe colombiana.....	32
4.1.2. Evaluación comparativa de las tecnologías disponibles para la generación de energía nuclear y la desalinización de agua	33
4.1.3. Diseño plan integral del proyecto (técnico, social y metodológico) mediante la implementación de un marco de gestión ágil	36
5. DISCUSIÓN	38
6. CONCLUSIONES.....	40
7. RECOMENDACIONES	42
Referencias	44
Anexos	49

Lista de figuras

Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible ONU (ONU, s.f.).....	11
Figura 2, Central nuclear (Slovidalco, 2025).....	18
Figura 3, Grafico diseño SCRUM	36
Figura 4, Cantidad documentos publicados tema ciclo combinado (Scopus, 2025)	49
Figura 5, Documentos publicados por tipo ciclo combinado (Scopus, Scopus, 2025)	50
Figura 6, Documentos publicados por país tema ciclo combinado (Scopus, Scopus, 2025)	51
Figura 7, Matriz documental análisis parte técnica.....	51
Figura 8, Matiz documental análisis parte económica	52
Figura 9, Matriz documental análisis parte social	52
Figura 10, Matriz documental análisis parte regulatorio	52

Lista de tablas

Tabla 1, Comparación tecnologías revisadas..... 34

Resumen

Esta investigación desarrolla un modelo de planeación para un ciclo combinado de energía nuclear y desalinización en el Caribe colombiano, empleando el marco ágil Scrum como eje de gestión. El estudio evalúa la integración de reactores modulares pequeños (SMR) con tecnologías de potabilización bajo un enfoque cualitativo descriptivo y un análisis documental robusto basado en matrices técnicas, económicas y regulatorias. Los resultados indican que el aprovechamiento del calor residual de los SMR incrementa significativamente la eficiencia termodinámica y reduce la intensidad de carbono, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Se concluye que el modelo propuesto constituye un marco metodológico pionero para la transición energética y la seguridad hídrica en Colombia, posicionando el uso civil de la energía nuclear como un motor de desarrollo social en regiones vulnerables.

Palabras clave: *Metodología ágil, Ciclo combinado, Energía nuclear, Desalinización, Región Caribe.*

Abstract

This research proposes a planning model for a combined nuclear power and desalination cycle in the Colombian Caribbean, grounded in the Scrum agile framework. The study evaluates the integration of Small Modular Reactors (SMR) with water purification processes through a qualitative-descriptive methodology and a comprehensive documentary analysis of technical, economic, and regulatory matrices. The findings demonstrate that utilizing waste heat from SMRs optimizes energy efficiency and contributes to carbon emission reduction, in alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs). In conclusion, this study establishes solid methodological foundations for Colombia to advance in the civilian use of nuclear energy, fostering water sustainability and social development in vulnerable regions.

Key words: *Agile methodology, Combined cycle, Nuclear energy, Desalination, Caribbean region*

Introducción

En la actualidad, Colombia ha establecido como objetivo en sus diversos planes de desarrollo aumentar el acceso de sus ciudadanos a los servicios públicos. Como resultado, en los últimos años se ha observado un incremento significativo en las cifras de acceso a estos servicios.

El DANE en su encuesta nacional de calidad de vida (ECV) del año 2020, mostró que para zonas urbanas el acceso al servicio de energía es del 98.2% y para acueducto del 89.4%. Para zonas rurales, el acceso al servicio de energía es del 92.9% y para acueducto del 63.1%. (DANE, 2021)

A pesar de que el acceso a los servicios públicos es alto en ciertas zonas, hay regiones del país donde el costo de estos servicios es elevado. Por ejemplo, en la costa Caribe, el costo promedio del kWh de energía para usuarios de estrato 4, quienes pagan la tarifa plena, fue de 981.59 pesos para el operador AIR-E y de 1036.04 pesos para el operador AFINIA en el último año. En comparación, el costo promedio en Antioquia fue de 887.74 pesos.

Comparando los consumos promedio de ambas regiones, en la costa Caribe oscila entre 250 y 400 kWh al mes, mientras que en Antioquia es de 150 kWh al mes. Y es acá donde radica la diferencia, ya que, un usuario en Antioquia puede estar pagando promedio 133.000 pesos por el servicio de energía mientras que, en la costa, este valor puede ser de 327.864 pesos. (Publicos, 2025)

En cuanto al tema del acceso al sistema de acueducto, el problema radica, no en el poco acceso al agua. Ya que Colombia es un país de grandes recursos hídricos, ocupando el sexto puesto en fuentes de agua dulce y teniendo acceso a 2 océanos en sus zonas costeras.

El principal problema radica en que no todas las fuentes hídricas son de óptima calidad, esto debido a la presencia de nutrientes inorgánicos como nitrógeno amoniacal y nitratos, fosforo soluble reactivo (Camacho, 2020) y otros componentes que complejizan el tratamiento del agua y hace más costosos los despliegues de proyectos de potabilización en especial en zonas rurales, donde las pocas fuentes son pozos de agua subterránea.

Con esta premisa se plantea la necesidad de analizar la planificación y validar el impacto de proyectos que suplan estas necesidades de fuentes de generación de energía y potabilización de agua para comunidades alejadas a los grandes centros de consumo. Buscando que los

proyectos sean de ciclo combinados para así, aprovechar recursos no solo económicos sino técnicos en los despliegues.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchas zonas alejadas de los grandes centros urbanos enfrentan críticos problemas de disponibilidad a servicios públicos. Y esto, sumado al alto crecimiento poblacional, genera una problemática plausible en el desarrollo del país.

Un gran ejemplo de ello es la región caribe, la cual, muestra grandes desarrollos en sus centros urbanos, pero en sus zonas rurales es muy plausible el sub desarrollo lo cual crea pocas oportunidades de mejor calidad de vida para sus habitantes, obligando a estos a abandonar sus regiones y buscar oportunidades en otros sitios de la región o del país.

Con esto, la necesidad de proyectos para mejorar la infraestructura de servicios públicos en las regiones es de vital importancia para el desarrollo, no solo de esta región puntual, sino del país.

Una alternativa de solución a esta problemática es el ciclo combinado de generación de energía nuclear y desalinización de agua. El cual, es un método de estudio en varios países con una problemática similar, como por ejemplo lo plasmado en un estudio realizado para la zona de la Florida, que presenta características técnicas similares a un despliegue para la zona caribe colombiana. (Joachim M. Schmidt G. V., 2021)

El objetivo de este proyecto investigativo será planear un proyecto de ciclo combinado donde se analizarán temas como el impacto de la implementación de esta solución en la región caribe. También se hará un acercamiento a los costos de despliegue de la solución y un análisis de los posibles riesgos y medidas de seguridad necesarias para desplegar un proyecto de estas dimensiones.

1.1 Descripción del problema

La principal problemática de las zonas sub desarrolladas del país es el poco acceso a los servicios públicos. Esto a causa de los altos costos de despliegue de proyectos de potabilización

de agua debido al poco acceso a fuentes no contaminadas o los altos costos del transporte de energía a estas regiones por falta de infraestructura.

Por ello es tan importante analizar alternativas de solución a esta problemática y una de ellas es la cogeneración de energía nuclear con desalinización de agua.

Esta combinación de tecnologías es un tema de análisis puntual para la región caribe, debido a su cercanía al mar y a su plausible deficiente infraestructura eléctrica. Adicional, el tema de ciclo combinado es un tema de alto impacto a nivel mundial, siendo estudiado por grandes organizaciones como el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) que dice que la principal bondad de este ciclo combinado es generar energía de bajas emisiones de carbono y convertir el agua del mar en agua dulce. (Yusuf, 2023) Adicional que este tipo de proyecto esta alienada con varios objetivos de la agenda 2030 de la ONU.



Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible ONU (ONU, s.f.)

1.2 La pregunta de investigación

¿Qué elementos deben considerarse para el diseño y la planeación de un proyecto de energía nuclear y desalinización en el Caribe colombiano, bajo un enfoque ágil de gestión de proyectos?

1.3 Los objetivos de investigación

El objetivo del actual proyecto investigativo busca desarrollar un modelo de planeación que nutra los aspectos tecnológicos, metodológicos y contextuales que se requieren para dar respuesta a la pregunta investigativa.

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de planificación para un proyecto de ciclo combinado que integre generación de energía nuclear y desalinización de agua para potabilización, utilizando metodologías ágiles de gestión de proyectos, con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica, social y ambiental en la región Caribe colombiana.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el contexto hídrico y energético de la región Caribe colombiana, con el fin de identificar las principales necesidades, restricciones y oportunidades para la adopción de tecnologías de desalinización y generación de energía nuclear.
2. Realizar una evaluación comparativa de las tecnologías disponibles para la generación de energía nuclear y la desalinización de agua, tomando en cuenta criterios de eficiencia, sostenibilidad ambiental, seguridad operativa y su adecuación al entorno colombiano.
3. Diseñar el plan integral del proyecto (técnico, social y metodológico) mediante la implementación de un marco de gestión ágil que estructure la planeación, roles, artefactos y ciclos de entrega para la implementación.

1.4 Justificación de la investigación

Colombia viene enfrentando grandes desafíos estructurales, sociales y ambientales que vienen afectando al país. Esta problemática se traslada a las regiones, donde el crecimiento de la población y las limitaciones de infraestructura de servicios hace que la calidad de vida no sea la mejor y por ende haya migración hacia los grandes núcleos urbanos.

En busca de la mejora no solo de la infraestructura de los servicios públicos, sino también de su tarifa, se vienen planeando análisis de varias tecnologías para así, a futuro, desplegar proyectos que puedan mitigar esta problemática y es en este contexto donde la implementación de sistemas de ciclo combinado integrando tecnologías de desalinización y energía nuclear se presenta como una solución sostenible e innovadora para atender esta problemática. (Sachs, 2015)

Esta alternativa presenta un aprovechamiento de las fuentes hídricas disponibles en la costa Caribe, que en su mayoría son de agua salina, así que es posible aprovechar este recurso que, sumado al aprovechamiento de calor residual del proceso de generación nuclear para alimentar la planta desalinizadora, incrementando la eficiencia energética del sistema propuesto, reduciendo así los efectos de gases de efecto invernadero.

Desde el análisis metodológico, los enfoques ágiles ofrecen beneficios latentes a los modelos tradicionales, ya que se permite la planificación dinámica, adaptable a cambios normativos, técnicos e integrando no solo al personal técnico experto en la planificación sino a las comunidades, gobierno y equipos multidisciplinarios en la fase de implementación. (Holbert, 2019)

Ya enfocados en el desarrollo del proyecto investigativo, el uso de metodologías ágiles beneficia la división de tareas en pequeños logros, así, delimitando de una forma adecuada el proceso de elaboración del respectivo proyecto investigativo.

En general, el actual trabajo investigativo busca dejar sentadas las bases de un proyecto que a futuro tiene un alto impacto social, tecnológico y académico y que de desarrollarse puede posicionar al país como un referente en América Latina en el área del uso de energía nuclear y su respectivo aprovechamiento para distintos casos de uso, como también beneficia en gran medida a las instituciones que analicen este tipo de iniciativas, que en el país no son muchas las que dan un enfoque de este tipo a los proyectos.

2. MARCO DE REFERENCIA

Dentro de este capítulo, se abordan los aspectos relacionados a estudios previos, aspectos técnicos y normativos en los cuales se basa la presente investigación. Esto con el fin de brindar información referente de cómo en el marco investigativo el tema de energía nuclear y desalinización tiene alto impacto y también validando que regulatoriamente hay normas que rigen estos campos de acción.

2.1. Marco de Antecedentes

En la búsqueda de referentes para validar si el tema investigativo abordado en este proceso es relevante se consultaron varias bases de datos, confirmando que el ciclo combinado de energía nuclear y desalinización de agua es un tema que se viene abordando hace varios años, incluso, hay países donde ya tienen proyectos implementados.

Un primer artículo analizado como antecedente de estudio para el presente proyecto y que es muy relevante debido a su contexto es el artículo llamado “Desalación nuclear: Revisión del estado de la técnica” el cual como su nombre lo indica, habla del estado del arte de la desalinización por medio de energía nuclear, validando el crecimiento de la energía nuclear, su respectiva evolución técnica, las tecnologías de desalinización, los impactos ambientales de ambas tecnologías y la seguridad en ambientes tecnológicos y sociales que puede generar esta tecnología. (Amani Al-Othmana, 2019)

Otro artículo relevante validado para este proceso de antecedentes investigativos fue el planteado por la IAEA, en donde se analiza desde la perspectiva de los altos costos de implementar desalinización de agua, como este proceso se puede abaratar mediante un ciclo combinado con generación de energía nuclear y de cómo en países como Japón, India, China vienen implementado estos proyectos por más de 25 años con resultados satisfactorios. (I. Khamis, 2016)

Un enfoque socio económico de la implementación de esta tecnología es relevante a ser analizado, ya que si no hay suficiente información histórica de este tema se puede caer en errores al analizar datos que pueden no ser reales y solo ser análisis de simulaciones. Lo planteado en

el artículo “Impacto socioeconómico y medioambiental de la desalinización nuclear” aclara un poco este panorama, desde lo social, lo económico, lo ambientes y lo técnico. (Dan Virah-Sawmy, 2025)

Un primer caso analizado de implementación analizado fue el planteado en el estudio llamado “Cogeneración nuclear para una desalación y producción de electricidad más limpias - Un estudio de viabilidad” en donde se plantea el uso de cogeneración de energía nuclear y una planta desalinizadora para el área de Homestead, Florida, donde el alto crecimiento de su población obliga a buscar alternativa para suplir la necesidad de servicios como energía y agua potable. En este estudio se analizan costos de transporte del agua y la energía hacia los puntos de consumo, proyecciones de crecimiento de la población para validar capacidades técnicas a dimensionar y demás beneficios y mejora para este escenario. (Joachim M. Schmidt V. G., 2021).

Un proyecto similar al planteado en el caso de Miami es el analizado en Irán, en donde se busca aprovechar el mar de Irán para abastecer ciertas zonas del país en donde el alto crecimiento de la población hace que sus recursos empiecen a escasear. El análisis de este proyecto se aborda desde el componente social donde se analiza el estado actual de los servicios de agua y energía en el país, analizando posibles tecnologías aplicables para su caso de estudio e incluso modelando tecnológicamente un proyecto a implementar. Concluyendo con una evaluación económica del caso analizado. (Seyed Hadi Ghazaie, 2020)

Otro caso similar a los anteriores y que empieza a dar claridades en el tema factores comunes para implementar un ciclo combinado de energía nuclear y desalinización fue el artículo elaborado para analizar el caso de Egipto. Acá como en los anteriores casos, el punto de partida del análisis fue el alto crecimiento de la población. Acá se usó un modelado de datos para validar si la tecnología seleccionada para el caso de estudio cumplía con los requisitos técnicos y analizando si las plantas nucleares actuales del país podían soportar la integración de plantas de desalinización para crear el ciclo combinado. También, analizan un tema muy pertinente para el proceso investigativo abordado en este documento y es el uso de reactores nucleares SMR, o sea, pequeños reactores nucleares para alimentar procesos de desalinización. (Mohamed K. Shaat, 2023)

Un enfoque relevante sobre el uso de la tecnología de desalinización con fuentes nucleares es justificar su uso, y en uno de los artículos referenciados para el marco de antecedentes se habla de que con la implementación de esta tecnología, se pueden justificar la implementación de estos proyectos basados en la sostenibilidad del agua potable, ya que, la mayoría de fuentes de agua

potable en el mundo son recursos de agua dulce, lo cual, está provocando un estrés en las fuentes hídricas y por consiguiente la necesidad de analizar otros mecanismos para potabilizar agua. En este artículo se analizan distintos factores como económicos, barreras y riesgos de los proyectos. (Rami S. El-Emam a, 2022)

También hay que ver el tema desde otros contextos que puedan complementar el análisis de implementación del ciclo combinado y uno de los enfoques analizados es crear un proyecto con cero emisiones de carbono. En el artículo analizado se complementa un ciclo combinado con una cogeneración de energía por medio de una fuente solar y una nuclear. Aquí se plantea que ciertos procesos relevantes de la planta de desalinización sean asumidos por un proceso de generación de energía solar y los procesos de más demanda energética sean alimentados por plantas de energía nuclear. Esto garantiza que las fuentes de energía usadas son de baja emisión de carbono, lo cual, apalanca los proyectos no solo desde lo técnico, también desde lo ambiental. (Khashayar Sadeghi, 2022)

Validando el tema de proyectos complementarios, fue importante analizar el tema financiero, el cual es importante analizar no solo desde la perspectiva del ciclo combinado, también desde la validación del uso de otras fuentes de generación para así, conocer ventajas y desventajas de la tecnología. Esta información se encontró en el artículo llamado "Evaluación económica del acoplamiento de la planta desalinizadora MED de la isla de Qeshm con diferentes fuentes de energía, incluidas las fósiles y las centrales nucleares.". El trabajo se basó en simulaciones de acoplar una planta desalinizadora ya existente a distintas fuentes de generación de energía y analizar los impactos técnicos y económicos. (A. Rezaei, 2017)

Otras alternativas tecnológicas similares al uso de un ciclo combinado es el uso del calor generado por las plantas generadoras nucleares para desalinizar agua. Si bien, en el papel su funcionamiento parece similar, su despliegue es distinto y en la información encontrada y los distintos estudios, se le da relevancia a este análisis, ya que complementa desde lo técnico el análisis de antecedentes. (Emmanuel Priego, 2017)

2.2. Marco Teórico

Como se validó en el marco de antecedentes, el tema de ciclo combinado para desalinización de agua y generación de energía por medio de una fuente radioactiva es un tema relevante y de alto impacto, no solo para el caso analizado que es la costa caribe del país, sino que es un tema relevante a nivel mundial.

La técnica consiste en generar energía eléctrica por medio de un reactor nuclear, ya sea de gran tamaño y a pequeña escala conocido como SMR. La energía generada por medio de esta fuente nutrirá de energía a la planta desalinizadora, la cual, tomará agua del mar para procesarla y potabilizarla.

Los excedentes de energía generada por la planta nuclear se pueden exportar al sistema interconectado de energía y ser gestionados para el consumo de los usuarios o se puede tener una infraestructura eléctrica propia para las comunidades aledañas y brindar el servicio de energía.

Para la planeación de un proyecto de ciclo combinado no solo se debe tener claro cómo funciona en detalle la tecnología, también se debe aclarar que metodología de gerencia de proyectos es la más acertada para ejecutar un proyecto de este tipo y, por ende, a continuación, se da más detalle de estos 2 temas.

2.2.1. Ciclo combinado energía nuclear y desalinización

Un ciclo combinado de energía nuclear y desalinización de agua es un sistema que simultáneamente produce electricidad y agua potable a partir de una fuente radioactiva y del agua del mar. Este tipo de plantas, también conocidas como sistemas de cogeneración nuclear, aprovechan normalmente el calor residual del proceso de generación de energía nuclear para alimentar proceso de desalinización. (Zakaria Triki, 2023)

Para entender mejor todo este proceso debemos tener claro los siguientes conceptos.

La energía nuclear o energía atómica es el resultante de las reacciones que ocurren en los átomos de los elementos uranio 235, plutonio 239, uranio 238 y el torio 232 (Dependiendo del

método y del reactor). Este proceso libera energía debido a las reacciones nucleares. Estas reacciones pueden ser espontaneas o controladas. (Álvarez, 2024)

El proceso de generación de energía nuclear tiene 3 métodos, la fisión, que es cuando el núcleo del elemento se divide en 2, generando energía y una reacción en cadena como tal que a su vez genera más energía. Y tenemos la fusión nuclear, que es fusionar 2 elementos ligeros y crear un elemento pesado y al crear este elemento se libera gran cantidad de energía. (Galindo, 2024).

Un tercer proceso poco usado es la desintegración nuclear, que es el proceso por el cual un átomo inestable pasa a ser uno más estable. Este cambio de estado produce energía y esta se aprovecha para distintos casos de uso. (Derya Ilem Ozdemir, 2019)

Con esta energía liberada e controlada por medio del reactor que normalmente esta enfriado por agua, produciendo vapor que hace mover unas turbinas que activan un generador eléctrico y es ahí donde se produce la electricidad.

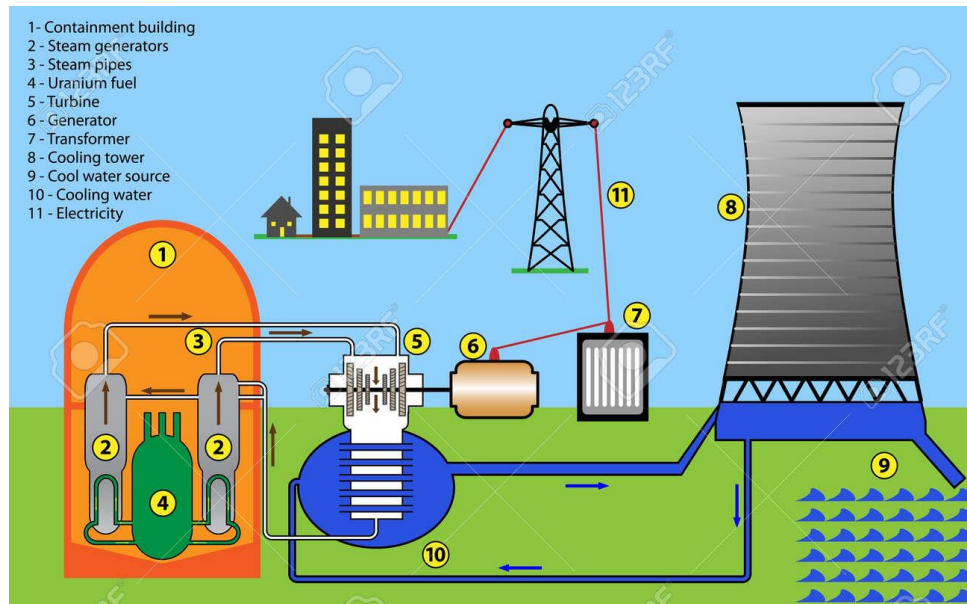


Figura 2, Central nuclear (Slovidaloca, 2025)

También hay que aclarar que hay distintos tipos de reactores nucleares y que estos varían en capacidad de producción de energía, tamaño físico y métodos de producción de energía. Entre los más comunes tenemos: (López M. A., 2023)

- A. Reactores térmicos.
- B. Reactor de agua ligera.

- C. Reactor de agua pesada.
- D. Reactor refrigerado por gas.

En el tamaño, se ha venido popularizando el uso de reactores modulares pequeños o SMR, que son reactores nucleares avanzados con una alta capacidad de producción de energía y que, debido a su modularidad, se pueden instalar en cualquier entorno, siempre y cuando se cumplan las condiciones técnicas. (Liou, 2024)

Otro concepto relevante a tener en cuenta es la desalinización, que es el proceso físico que separa el exceso de las sales marinas presentes en el agua tomada del océano con el fin de potabilizarla o usarla para usos industriales. Este proceso conlleva grandes gastos de energía, lo cual lo convierte en un método costoso de implementar. (Vassilis Belessiotis, 2016)

Existen 5 tipos de desalinización del agua a grandes escalas: (Acosta, 2025)

- A. Osmosis inversa
- B. Destilación
- C. Congelación
- D. Evaporación relámpago
- E. Electrodialisis

El 60% de las plantas desalinizadoras en el mundo usan osmosis inversa, cuya descripción técnica del proceso consta de que las moléculas de agua pasen por una membrana semipermeable de una solución menor de concentración a una de mayor concentración. La membrana divide las soluciones y constantemente hay un intercambio entre la solución pesada y la solución ligera, siendo el punto de equilibrio cuando se igualan las velocidades en ambas soluciones y es ahí donde se realiza la separación del agua salada y sus componentes salinos para convertirla en agua dulce que se puede potabilizar. (Ruiz, 2020)

Ya con estos 2 conceptos claros, el concepto de ciclo combinado es sencillo de entender. La IAEA considera a la desalinización nuclear como la obtención de agua potable tomando como fuente hídrica el océano, donde la fuente de energía del proceso de desalinización proviene de una fuente de generación nuclear, ya sea alimentando eléctricamente el proceso o térmicamente. Lo ideal es que ambos procesos estén en el mismo sitio, para que se aprovechen recursos y despliegue de infraestructura. (Cattaneo, 2019)

2.2.2. Metodología ágil para gestión de proyectos

Las metodologías ágiles son un conjunto de técnicas aplicadas a la gestión de proyectos. En especial, implementando en entornos donde los requisitos del proyecto tienen un constante cambio. El objetivo principal de las metodologías ágiles es entregar de forma continua valor al desarrollo del proyecto, mostrando resultados de forma rápida, fomentando el trabajo en equipo y la flexibilidad para la mejora constante de los procesos.

Las metodologías ágiles son muy usadas en proyectos cuya solución técnica se desconoce, en procesos innovadores donde se debe tener un panorama más amplio de análisis, en proyectos complejos donde sea necesario un trabajo cooperativo o en proyectos donde se tengan tiempos de entrega cortos y se necesite un flujo de trabajo más dinámico.

Un punto importante es diferenciar la gerencia de proyectos bajo metodologías ágiles del entorno tradicional. Ya que en este último escenario hay un líder que revisa y avala el trabajo de los demás, demorando las entregas y en muchos casos analizando de una forma indebida debido al desconocimiento del tema, mientras que, bajo un modelo ágil,

En este punto toca aclarar un concepto y es que, las metodologías ágiles son un proceso, pero no son una metodología, sino que es un principio de gestión de proyectos que busca siempre un entorno colaborativo, rápido y efectivo e iterativo. Para implementar un proceso ágil en la gestión de proyectos se debe seleccionar ya una metodología puntual, que puede ser un Scrum, Kanban, Ruta crítica, Cadena crítica y así crear una filosofía de gestión de proyectos integral para entregar un trabajo de gran calidad.

Con el planteamiento anterior, es muy importante que independiente a la metodología seleccionada, se siga la guía de principios básicos para metodologías ágiles. Estos principios son los siguientes: (López N. V., 2021)

- Satisfacer al cliente con entregas tempranas y continuas.
- Siempre aceptar los cambios.
- Hacer entregas frecuentes.
- Construir el proyecto en torno a individuos motivados.
- Dialogo cara a cara para comunicar información con el equipo de desarrollo.
- El producto que funciona es la principal medida de progreso.

- Los procesos ágiles promueven un desarrollo sostenido.
- La atención continua a la calidad técnica y al buen diseño mejoran la agilidad.
- La simplicidad es esencial.
- Organización interna de los equipos.
- Reflexionar sobre la efectividad.

Con lo anterior y en referencias de metodologías aplicadas al campo de la ingeniería, se validó que el proceso más acorde para la investigación en curso es el modelo SCRUM, la cual es una metodología de fácil adopción en distintas áreas del conocimiento, busca siempre dar satisfacción a las necesidades del proceso donde se está implementando y permite analizar distintas problemáticas que surjan en el transcurso del desarrollo del proyecto.

SCRUM divide las tareas macro en pequeños "Sprint" que son tareas más pequeñas actividades con una duración corta de desarrollo. Adicional, hay 3 roles importantes en la metodología que dan orden al desarrollo de las tareas: (Junco, 2022)

- Product Owner: Es el responsable de recolectar la información que necesita el usuario final, es visto como el dueño del proyecto.
- Scrum máster: Es el líder de trabajo e interpreta la necesidad del cliente. Coordina el equipo y es visto como el puente entre el usuario y el equipo de desarrollo.
- Development team: Son los encargados de ejecutar los "Sprint". Desarrollan la solución, la testean y construyen el proyecto a necesidad del cliente.

El ciclo de vida de la metodología SCRUM es de fácil entendimiento y consta de las siguientes actividades:

1. El producto owner lista las necesidades, requerimientos y requisitos.
2. Con él en scrum máster se planea como dar solución a estos requerimientos.
3. Se inicia el respectivo Sprint.
4. Se programan sesiones diarias de avance.
5. Se documenta todo en un tablero donde cada actividad tiene un responsable.
6. Cuando un individuo termina una tarea, debe apoyar a otro en el desarrollo de su tarea.
7. Se verifica el cumplimiento de las tareas.
8. Se analizan los resultados de los sprint validando mejoras en los procesos.
9. Cada que finaliza un sprint se inicia uno nuevo.

Scrum introduce una idea de control empírico lo que significa que el progreso es real. La duración de su ejecución total es del marco de semanas. La constante revisión de los avances con el cliente permite direccionar el proyecto en un camino donde la retroalimentación es primordial, lo que da garantía que no hay especulaciones ni predicciones en el desarrollo de este. (Pecharroman, 2015)

La implementación de SCRUM es muy útil para proyectos de desarrollo de software, pero es compleja para el despliegue de grandes proyectos. En este caso, la metodología es útil debido a que el actual proyecto de investigación se enfoca en solo dejar planeado el proceso y no se tiene mapeado implementar el mismo, por ello, el desarrollo de las distintas actividades bajo SCRUM es muy útil debido a que al dividir las tareas macro en pequeños SPRINTS se obtienen avances medibles del respectivo proyecto investigativo.

2.3. Marco normativo

En el marco normativo de esta investigación fue necesario no solo analizar la normatividad nacional que rige los temas relacionados a la energía atómica, también fue relevante analizar las normas y tratados que rigen este campo a nivel internacional, ya que, al ser un tema tan relevante en cuestión de seguridad, debe ser normado y controlado por entes internacionales.

En Colombia los temas relacionados a la energía eléctrica están relacionados directamente al ministerio de minas y energía el cual ha emitido varios reglamentos y decretos que hablan directamente de la energía nuclear como también el Servicio geológico Colombiano que es responsable de la gestión de instalaciones nucleares y radioactivas ha emitido varias normas, entre las cuales tenemos el Reglamento de protección y seguridad radiológica del año 2002, donde se establecen requisitos y condiciones mínimas para el uso seguro de materiales radioactivo y nucleares.

También está la resolución 180052 del 2008, que habla de la categorización de fuentes radioactivas basando su clasificación en el potencial de radiación que pueden causar daño a la salud humana.

Está la resolución 90874 del 2024 que trata los requisitos para obtener autorizaciones y realizar inspecciones regulatorias en temas relacionados a elementos radiológicos como está la

resolución 181419 de 2004 que trata temas relacionados a la importación de materiales radioactivos.

Hay también normatividad relacionada a la gestión segura de desechos radioactivos que es la resolución 180005 del 2010 y el reglamento de instalaciones nucleares del año 2004. Esto se complementa con la resolución que habla del tema del transporte seguro de materiales radioactivos expedida en el año 2024. Así creando un ciclo de normas que deben cumplir los entes que trabajen con fuentes radioactivas.

Es igualmente importante mencionar que Colombia se rige por tratados internacionales relacionados a la energía nuclear, muchos de ellos establecidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Entre estos tratados tenemos: El tratado sobre la no proliferación de armas nucleares que busca prevenir la propagación de armas nucleares y promover el desarme nuclear y solo uso pacífico de esta fuente de energía.

Asimismo, existen varios acuerdos llevados a cabo en convenciones como el acuerdo de Seguridad nuclear que establece un marco para la seguridad en las centrales nucleares y habla de una cooperación internacional para este tema.

De igual forma, se encuentra el Acuerdo de Protección física de los materiales nucleares, que regula la protección de los materiales nucleares y sus instalaciones.

Otro tratado importante es el Tratado de prohibición completa de ensayos nucleares, el cual habla de la prohibición de ensayos nucleares en cualquier entorno. Con esto se busca promover el desarme nuclear.

A su vez, hay varios acuerdos regionales que tratan el tema de zonas libres de armas nucleares, entre los más relevantes tenemos:

- Tratado de Tlatelolco: Prohíbe las armas nucleares en América Latina y el Caribe.
- Tratado de Rarotonga: Establece una zona desnuclearizada en el Pacífico Sur.
- Tratado de Bangkok: Crea una zona libre de armas nucleares en Asia Sudoriental.
- Tratado de Pelindaba: Prohíbe las armas nucleares en África.

- Tratado sobre una Zona Libre de Armas Nucleares en Asia Central: Establece una zona libre de armas nucleares en Asia Central.

Relacionado al tema de desalinización de agua, Colombia tiene establecidas normas que buscan garantizar la calidad y seguridad del agua potable.

Esta la ley 142 de 1994 que establece el régimen de servicios públicos domiciliarios, incluyendo el suministro de agua potable, y garantiza la eficiencia, universalidad y calidad del servicio.

También está el decreto 1575 de 2007 que regula el sistema de protección y control de la calidad del agua para consumo humano, dando lineamientos de requisitos para las plantas de tratamiento y estableciendo parámetros de calidad. Otra norma relacionada a la calidad del agua es la resolución 2115 de 2007 que detalla los criterios de calidad para el agua potable, incluyendo límites para contaminantes químicos y microbiológicos, y establece procedimientos de monitoreo y control y esta el decreto 1076 de 2015 compila normas ambientales relacionadas con la gestión del agua, incluyendo protección de fuentes hídricas y tratamiento de aguas residuales.

Adicional a las normas relacionadas a la generación de energía por medio de fuentes radioactivas y a la desalinización de agua, es importante considerar las normatividades ambientales relacionadas a proyectos en Colombia, entre ellas tenemos:

El decreto 1076 del 2015 que compila una serie de normas relacionadas a la gestión ambiental. También está el decreto 2041 del 2014 que dicta los requisitos y procedimientos para obtener licencias ambientales en Colombia y está la ley 99 del 93 que estableció la creación del ministerio del medio ambiente y por ende todas sus funciones regulatorias.

Por último, es importante tener en cuenta el decreto 2811 de 1974, que es el código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente, el cual regula la conservación y uso sostenible de los recursos naturales.

En resumen, Colombia tiene muy bien definidas sus políticas ambientales relacionadas al manejo del agua y a la expedición de licencias para proyectos donde se afecten ámbitos ambientales. El tema de análisis es en la regulación de uso de fuentes y equipos radioactivos. Ya que, actualmente se viene discutiendo en el país el desarrollo de una ley nuclear, que no solo busca masificar el uso de equipos y fuentes radioactivos para generación de energía, sino también para usos médicos y alimenticios, lo cual, mejoraría en cierta medida la regulación actual y facilitaría el uso de esta tecnología.

3. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque y alcance de la investigación

La investigación se enfocó en analizar aspectos técnicos, ambientales y sociales relacionados a proyectos de generación de energía con fuentes nucleares y a desalinización de agua en zonas costeras para distribución de agua potable, como también se analizaron aspectos relacionados a ciclos combinados de las tecnologías mencionadas.

Dada la ausencia de proyectos similares en el país, se optó por un enfoque cualitativo centrado en una población documental. Esta metodología permitió validar la pertinencia, riqueza y adecuación del tema. Para ello, se analizaron no solo documentos centrados en el contexto colombiano, sino también publicaciones de otros países con proyectos similares. Esta doble perspectiva garantizó una visión integral, fundamental para alcanzar los objetivos del estudio.

Al seleccionar un modelo cualitativo se tuvieron herramientas para modelar escenarios energéticos, validar costos, simular rendimiento de los procesos y proyectar demandas de energía y agua potable con el proyecto en un posible escenario de implementación.

Al ser un proyecto pionero para el país, fue muy importante la optima selección del enfoque metodológico y de la planeación del planteamiento del proyecto ya que estos aspectos dieron herramientas para evaluar factibilidades tanto técnico, sociales y económicas desde lo cuantitativo.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Definición de la población

La definición de la población, que para una investigación cualitativa de análisis documental es mejor llamarla “Muestra intencional” se basó en la selección de documentos que ofrecieron una comprensión profunda de los temas tratados (Energía nuclear, desalinización y ciclo combinado), comprendiendo así el significado, el contexto y la producción de los documentos mismos. (Bogdan, 1987).

Con la anterior premisa, se planteó una selección deliberada de documentos para así establecer criterios de inclusión basados en el posible potencial de los documentos y con ello, guiar la respuesta de la pregunta de investigación y el cumplimiento de los objetivos investigativos. Para ello se utilizaron varias de las estrategias de muestro intencionales propuestas por Michael Quinn, que dicen que para la selección de documentos se puede usar un muestreo por criterio que es incluir documentos que cumplan con un criterio predeterminado que para este caso es que contengan los tópicos del proceso investigativo que es energía nuclear, desalinización y ciclo combinado. También se utilizó el criterio de muestreo de máxima variación que consta en elegir documentos con alta representación sobre el tema, como es el caso de investigaciones de entes acreditados como universidades o instituciones relevantes y por último en ciertos casos se aplicó el muestreo de casos críticos, que no es más que tomar casos similares al planteado en la propuesta investigativa y con ello entender su contexto para aplicarlo a la investigación en curso. (Patton, 2015).

3.2.2. Cálculo y selección de la muestra

El respectivo cálculo de la muestra intencional se basó en un proceso de análisis que se rigió de 2 principios clave que fueron:

- A. El diseño emergente y muestreo iterativo: Una investigación de énfasis cualitativo da una flexibilidad analítica por lo cual el análisis de datos es simultáneo y no secuencial, por ello el estudio de los documentos se inició basado en los criterios investigativos que fueron el cumplimiento de la pregunta investigativa y de los objetivos. (Creswell, 2013)

También es importante aclarar que, al ser una investigación cualitativa, la muestra se fue adaptando a medida que los documentos no mostraban aporte en la investigación.

- B. Muestreo intencional: Con los criterios de selección documental claros, se aseguró que la selección de documentos ofreciese una alta comprensión del tema investigativo.

La selección de los respectivos documentos se basó en el conocimiento teórico del tema que manejo como ingeniero de proyectos con un diplomado en energía nuclear. Como también de la consulta de expertos en el tema que me guiaron para que el contenido analizado fuera relevante. (Rossman C. M., 2011)

- C. Criterio de cierre: Se utilizó este criterio para dar un cierre al análisis documental, ya que se pudo haber continuado con este análisis, pero la muestra dejó de ser significativa cuando los documentos analizados no entregaban información nueva. Adicional, con la información analizada se encontró la suficiente información para responder a la pregunta investigativa y dar cumplimiento a los objetivos investigativos. (Sandelowski, 1995)

Con lo anterior y con los criterios técnicos, sociales, económicos y regulatorios se analizaron aproximadamente 5 documentos por cada uno de estos tópicos, lo que al final dio un análisis documental de 20 documentos.

3.3. Instrumento(s)

Los instrumentos utilizados en el análisis documental fue principalmente el criterio del investigador con asesoramiento de expertos.

Con lo anterior se inició la construcción de una matriz de categorías para así sintetizar los hallazgos. Esta matriz se construyó en Excel.

Para la validación del tema investigativo y validación de documentos se utilizó Scopus, la cual es una base de datos de resúmenes y citas de literatura científica. Adicional, se respaldó la búsqueda de documentos para análisis con Google Académico, la cual es una fuente confiable de documentos académicos.

3.4. Descripción de procedimientos

El procedimiento analítico se inició con la fase de codificación y registro sistemático de la información recopilada, empleando como instrumento principal la construcción de la matriz documental. Esta herramienta fue alimentada con insumos obtenidos a través de bases de datos académicas como Scopus y Google Académico. A dicha matriz se le aplicaron rigurosamente los criterios de inclusión y exclusión definidos en la caracterización de la muestra intencional. Para cada documento seleccionado, se consignaron los datos de identificación, se extrajeron las citas textuales más relevantes y se clasificaron conforme a las categorías de análisis previamente establecidas: viabilidad técnica, económica, social y ambiental.

De manera paralela, se elaboraron notas analíticas en las que, bajo el criterio interpretativo del investigador, se contextualizó el significado de cada cita, se exploraron sus implicaciones y se establecieron posibles vínculos con otros hallazgos, garantizando así un registro exhaustivo y coherente de la información primaria.

Una vez completadas las fichas individuales, se avanzó hacia la fase de síntesis y comparación mediante la elaboración de una Matriz de Categorías. Esta matriz integró la información de todos los documentos en una única visualización, donde las filas correspondieron a los textos analizados y las columnas a las dimensiones temáticas. Al completar la matriz con los resúmenes analíticos de cada ficha, fue posible realizar comparaciones tanto horizontales como verticales, lo que facilitó la identificación de patrones recurrentes, contradicciones entre fuentes, convergencias temáticas y vacíos de información, elementos clave para la construcción de los hallazgos de la investigación.

3.5. Análisis de información

La consolidación del análisis se realizó mediante una matriz construida a partir de un proceso de análisis temático, orientado a identificar, examinar y reportar patrones significativos para el desarrollo del proyecto investigativo. Esta matriz operó como un instrumento de visualización estructurada de los datos, resultando fundamental para la reducción analítica de la información y la detección de regularidades.

La lectura sistemática de los documentos permitió avanzar desde la codificación descriptiva hacia la formulación de categorías interpretativas de mayor abstracción, facilitando la identificación de convergencias, divergencias y vacíos discursivos. Este tránsito metodológico fortaleció la capacidad del investigador para interpretar el sentido profundo de los datos, establecer relaciones entre ellos y construir una base sólida para la formulación de hallazgos. (Saldaña, 2015)

La estrategia analítica fue clave para la triangulación de fuentes de datos, así, con el uso de múltiples fuentes de datos para fortalecer la validez de un estudio se contrastaron activamente la información de los diferentes tipos de documentos y la búsqueda de dar respuesta a la pregunta investigativa y los distintos objetivos planteados. Construyendo una síntesis interpretativa articulada, presentando una narrativa analítica coherente que explica las tensiones, sinergias y vacíos en torno al proyecto investigado. (Flick, 2018)

3.6. Consideraciones éticas

3.6.1 Análisis consideraciones éticas

Las consideraciones éticas fundamentales del análisis documental se centraron en la reflexividad del investigador y en la gestión consciente de sus propios sesgos. Al ser el investigador el principal instrumento de recolección e interpretación de la información, recae sobre él la responsabilidad ética de examinar críticamente sus preconcepciones personales y profesionales, con el fin de evitar distorsiones en la construcción del conocimiento. En este sentido, se adopta el enfoque de la subjetividad disciplinada, según el cual el analista no simula una objetividad de corte positivista, sino que asume su papel interpretativo con rigor metodológico, asegurando que los hallazgos emergen de los datos y no de sus opiniones o creencias previas (Rossman C. M., 2011)

La segunda dimensión ética del análisis documental se refiere a la representación fiel y contextualizada de los documentos examinados. Dado el riesgo inherente de sesgo de confirmación y de selección interesada de datos, se establece como principio ético fundamental la búsqueda activa y el reporte transparente de evidencia contradictoria o casos negativos, que puedan desafiar las hipótesis del investigador.

Asimismo, se reconoce que los documentos no deben ser tratados como fuentes pasivas de hechos, sino como productos sociales activos, cuya interpretación exige una lectura situada que respete su contexto original de producción y la audiencia a la que fueron dirigidos. Esta postura se articula con el principio de integridad académica, que demanda una atribución rigurosa de las fuentes consultadas y la prevención de cualquier forma de plagio, garantizando así la legitimidad del proceso investigativo. (Lincoln, 2018)

3.6.2 Instrumentos de aceptación y autorización

Para el análisis documental, se basó únicamente en búsqueda de documentos públicos y de libre acceso.

En este caso no se requirieron instrumentos de consentimiento informado como los que se usarían en entrevistas o encuestas.

4. RESULTADOS

Para el proyecto investigativo se usó el análisis documental como herramienta de recolección de datos para la investigación cualitativa debido a que, ante la inexistencia de infraestructura nuclear de potencia operativa en Colombia, no es posible realizar una observación empírica directa del fenómeno. Este método permitió triangular la información técnica internacional (estado del arte de los SMR y cogeneración) con el marco jurídico y las necesidades hídricas locales, facilitando la interpretación de datos dispersos para modelar un escenario de factibilidad regulatoria y técnica sin incurrir en los costos de la experimentación física; de este modo, el análisis riguroso de fuentes primarias (normas OIEA, leyes nacionales) y secundarias (estudios de caso) valida la estructuración del proyecto sobre bases conceptuales sólidas, mitigando la incertidumbre inherente a la adopción de tecnologías disruptivas en un nuevo mercado. (Sampieri, 2003)

4.1. Resultados análisis documental

El proceso de recolección de datos, enmarcado en un enfoque cualitativo, se orientó estratégicamente al cumplimiento de los objetivos específicos de la investigación, con el fin último de estructurar un modelo de planificación para un proyecto de ciclo combinado que integre la generación nucleoelectrónica y la desalinización de agua.

En primera instancia, los objetivos se centraron en realizar un diagnóstico exhaustivo del contexto hídrico y energético de la región Caribe colombiana, identificando las brechas críticas de suministro que requieren una solución estructural. A partir de este diagnóstico, se procedió a evaluar la eficiencia técnica del binomio SMR + Desalinización, contrastándolo mediante un análisis comparativo frente a tecnologías convencionales para validar su superioridad en términos de sostenibilidad y eficiencia. Finalmente, se buscó consolidar estos hallazgos en una hoja de ruta de implementación, articulada bajo marcos de trabajo ágiles que garantice la viabilidad del proyecto.

Para materializar lo anterior, se ejecutó una revisión sistemática en bases de datos indexadas de alto impacto, como Scopus y ScienceDirect. La selección documental se sometió a un riguroso filtro basado en el criterio de experto y la relevancia temática, derivando en la construcción de una matriz de síntesis. Esta herramienta permitió triangular los aportes teóricos más

significativos, alineándolos directamente con el análisis y desarrollo de cada objetivo específico planteado enfocado en un análisis desde los técnico, social, económico y regulatorio.

4.1.1. Evaluación contexto hídrico y energético de la región Caribe colombiana

La región Caribe, en particular departamentos como La Guajira y Magdalena, enfrenta un déficit hídrico estructural crítico, comparable con las crisis descritas en el estudio Future Vision of Using Nuclear Energy for Desalination Plants in Egypt. Al igual que en el caso egipcio, donde el crecimiento poblacional y la escasez de agua dulce obligan a buscar alternativas a los ríos tradicionales, el Caribe requiere con urgencia fuentes no convencionales de agua potable.

En este contexto, surge una oportunidad estratégica: la implementación de sistemas de cogeneración nuclear, capaces de producir simultáneamente electricidad y agua desalinizada. Esta tecnología no solo permitiría enfrentar la escasez física del recurso hídrico en zonas áridas, sino que ofrecería una solución industrial de gran escala, más eficiente que la desalinización convencional, la cual depende en gran medida del uso intensivo de combustibles fósiles.

Otro aspecto relevante es que el Caribe se ha consolidado como un hub de energías renovables. Sin embargo, su red eléctrica enfrenta restricciones de estabilidad debido a la intermitencia de estas fuentes y a la vulnerabilidad de la generación hidroeléctrica frente a fenómenos como El Niño. Los estudios técnicos revisados sugieren que la incorporación de Reactores Modulares Pequeños (SMR) podría proveer la carga base actualmente suministrada por plantas térmicas de carbón o gas, mitigando así la inestabilidad de la red eléctrica regional.

La integración de estos reactores con plantas de desalinización en zonas costeras representa una oportunidad única: transformar la infraestructura energética en un motor de desarrollo dual que garantice simultáneamente seguridad energética y seguridad hídrica.

Si bien los proyectos son técnicamente viables, la literatura consultada identifica una restricción fundamental: el desarrollo nuclear en la región ha sido históricamente una política de Estado y no de mercado. Esto implica que la adopción de estas tecnologías en el Caribe colombiano no puede depender exclusivamente de la iniciativa privada, dado el alto costo de capital y los riesgos asociados. Además, aunque existen avances regulatorios en materia de manejo seguro de materiales, persiste un vacío significativo respecto a la disposición final de residuos y la

responsabilidad civil de los nuevos reactores (SMR). Esta carencia normativa constituye una barrera legal inmediata, agravada por la ausencia de una ley específica que defina lineamientos claros sobre el desarrollo nuclear en el país.

En conclusión, la evidencia sugiere que la región Caribe reúne las condiciones geopolíticas y la necesidad estructural para adoptar estas tecnologías, siempre que se superen las barreras regulatorias. Si Colombia logra alinear su marco normativo con los estándares del OIEA y plantea el proyecto como una estrategia de salud pública (acceso al agua) y seguridad energética, los SMR podrían transformar la economía del Caribe, mitigando la pobreza hídrica y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles en una sola maniobra de política pública.

4.1.2. Evaluación comparativa de las tecnologías disponibles para la generación de energía nuclear y la desalinización de agua

La revisión documental concluye que la tecnología más eficiente para la región no es la desalinización aislada, sino la cogeneración nuclear, dado que el acoplamiento de reactores nucleares con sistemas de Ósmosis Inversa o Destilación de Efecto Múltiple (MED) resulta termodinámicamente superior a las alternativas fósiles. Mientras que las plantas convencionales desperdician el calor residual, la cogeneración lo aprovecha como insumo energético para desalar agua, transformando un desecho en un recurso productivo. Este modelo híbrido reduce de manera significativa el costo por metro cúbico de agua potable en comparación con el uso de gas o petróleo.

En términos de sostenibilidad, la evaluación comparativa otorga a la energía nuclear una ventaja crítica frente a la biomasa y el gas natural. Aunque la biomasa es renovable, exige un uso extensivo de suelo que compite con la agricultura y la biodiversidad, mientras que el gas perpetúa la emisión de gases de efecto invernadero. La energía nuclear, por el contrario, ofrece una densidad energética elevada con una huella física mínima, lo que la convierte en un recurso indispensable para cumplir los compromisos climáticos sin sacrificar la potencia base que la región requiere.

En el contexto colombiano, la tecnología de Reactores Modulares Pequeños (SMR) — especialmente los refrigerados por gas de alta temperatura— se perfila como la opción más segura y adecuada. El estudio de Enciso Ramírez subraya que, a diferencia de los grandes reactores que demandan redes robustas, los SMR son ideales para las Zonas No Interconectadas (ZNI) y para regiones como La Guajira, gracias a su seguridad pasiva y modularidad. Esta tecnología contribuye a mitigar la vulnerabilidad sistémica de la red eléctrica nacional.

El análisis documental, con aportes de autores como Leiva Veas (caso Chile) y Terán Cerecedo (caso México), demuestra que la energía nuclear funciona como un “blindaje financiero” frente a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles, estabilizando los costos industriales a largo plazo. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías en Colombia enfrenta una barrera institucional decisiva: la ausencia de una regulación específica sobre la disposición final de residuos y la responsabilidad civil. Este vacío normativo, identificado por el Ministerio de Minas, impide que la eficiencia técnica y económica descrita se traduzca en proyectos reales sin una intervención estatal directa y decidida.

Tabla 1, Comparación tecnologías revisadas

Tecnología	Eficiencia y Termodinámica	Impacto Ambiental y Sostenibilidad	Costos y Aspectos Financieros	Adecuación al Entorno (Redes y Territorio)
Cogeneración Nuclear (SMR)	Superior. Aprovecha el calor residual como insumo para desalar agua, transformando un desecho en recurso productivo.	Alta densidad / Baja huella. Posee una elevada densidad energética con una huella física mínima, indispensable para	Blindaje Financiero. Reduce el costo por metro cubico de agua potable y estabiliza costos a largo plazo frente a la volatilidad de combustibles.	Ideal para ZNI. Los SMR (seguridad pasiva y modularidad) son ideales para zonas no interconectadas o regiones

		compromisos climáticos.		áridas como La Guajira.
Combustibles Fósiles (Gas, Petróleo)	Inferior. Las plantas convencionales desperdician el calor residual.	Negativo. El gas perpetúa la emisión de gases de efecto invernadero.	Volátil. Sujetos a la volatilidad de precios de los mercados, lo que genera inestabilidad de costos industriales.	Dependiente. Su logística continua de combustible puede ser compleja en regiones aisladas.
Biomasa	Limitada. Aunque es renovable, presenta desventajas en uso de recursos.	Uso extensivo de suelo. Compite con la agricultura y la biodiversidad al exigir grandes extensiones de tierra.	Costo de Oportunidad. Económicamente viable, pero su costo social es alto al sacrificar tierras cultivables o bosques.	Baja. Requiere grandes extensiones de terreno, lo que es crítico en zonas áridas o con estrés hídrico.
Grandes Reactores Nucleares	Alta. Eficiente, pero diseñado para grandes cargas base constantes, menos flexible que los SMR.	Baja emisión. Igual de limpia en emisiones que el SMR, pero con mayor impacto visual y territorial por la escala de la obra.	Riesgo "Big Bang". Altos costos de capital inicial y riesgo de falla financiera en etapas tempranas. Históricamente requieren política de Estado, no de mercado.	Restrictiva. Demandan redes eléctricas robustas, lo que los hace menos aptos para zonas aisladas comparado con los SMR.

Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3. Diseño plan integral del proyecto (técnico, social y metodológico) mediante la implementación de un marco de gestión ágil

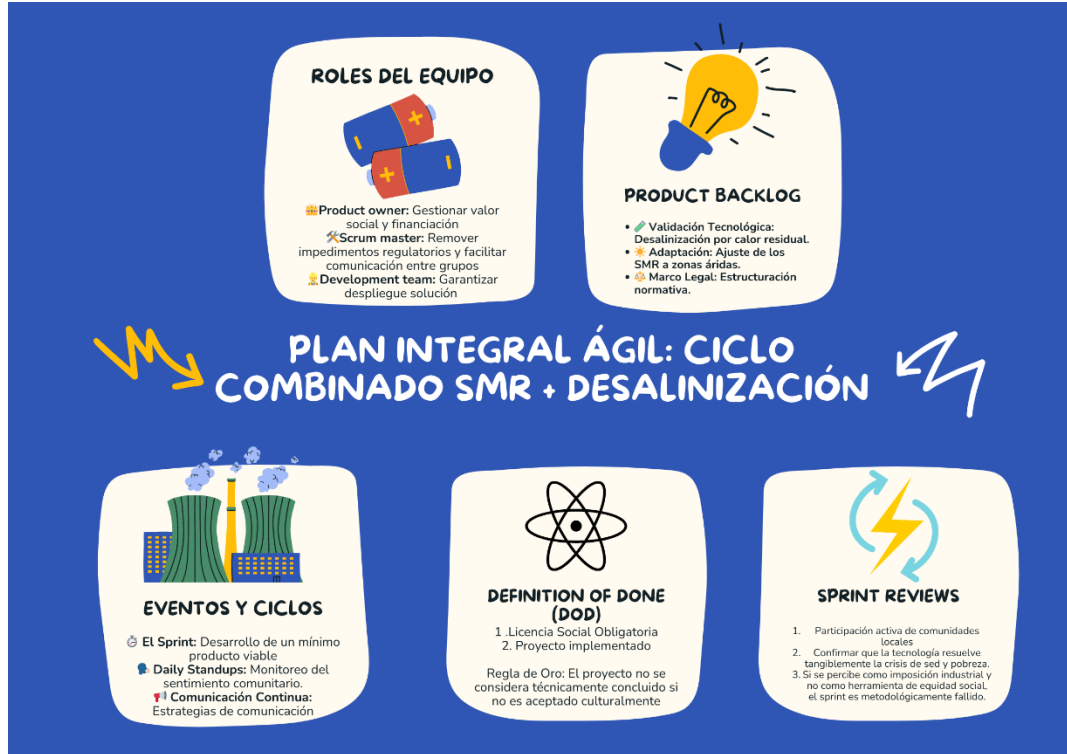


Figura 3, Grafico diseño SCRUM

Nota: Elaboración propia (2025).

Basados en la metodología Scrum, el Product Goal del proyecto se define como la consecución de la soberanía hídrica y energética en el Caribe mediante la cogeneración nuclear. El Product Backlog, entendido como la lista de requisitos a priorizar, contempla tres ejes: (i) la validación de la tecnología de desalinización por calor residual, (ii) la adaptación de los SMR a zonas áridas, y (iii) la estructuración del marco legal. A diferencia de un proyecto lineal, la planeación será iterativa, con el fin de gestionar la incertidumbre regulatoria señalada en el análisis documental. Esto permitirá ajustar progresivamente los requisitos técnicos de los reactores conforme evolucione la legislación nacional sobre residuos y transporte, descrita por el Ministerio de Minas.

En línea con los desarrollos de proyectos y políticas nucleares en Latinoamérica, el rol de Product Owner recaerá en una entidad gubernamental mixta, responsable de gestionar el valor social y

la financiación, priorizando el retorno social sobre el beneficio financiero inmediato. El Scrum Master será un líder técnico encargado de remover impedimentos regulatorios y facilitar la comunicación entre los equipos de ingeniería nuclear y los equipos de gestión social. El Development Team será multidisciplinario, integrando ingenieros nucleares, hidrólogos y sociólogos, para garantizar que la solución técnica se mantenga vinculada a la realidad humanitaria de La Guajira.

El proyecto debe evitar una construcción masiva inicial de infraestructura, con el fin de reducir el riesgo de fracaso en etapas tempranas. Este efecto, conocido como Big Bang, ha sido ampliamente criticado en la literatura sobre grandes centrales eléctricas. En su lugar, se adoptarán Sprints trimestrales orientados al desarrollo de un Mínimo Producto Viable (MVP), como la construcción de una unidad piloto de SMR en una Zona No Interconectada (ZNI).

Este enfoque incremental permitirá validar la seguridad operativa y la eficiencia de la desalinización a pequeña escala antes de escalar hacia una planta regional completa, generando victorias tempranas que demuestren utilidad y confianza.

Un aspecto crucial será abordar el efecto NIMBY (Not In My Backyard). La metodología ágil debe integrar una estrategia de comunicación continua y transparente en cada Sprint. El temor público a los residuos nucleares suele paralizar las decisiones políticas; por ello, los artefactos del proyecto no pueden limitarse a planos técnicos, sino que deben incluir planes de gestión de residuos que redefinan el problema no como un peligro apocalíptico, sino como un riesgo industrial gestionable. En las Daily Standups y reuniones de planificación, se deberá monitorear el sentimiento comunitario como una métrica de riesgo crítica, tan relevante como las variables termodinámicas, asegurando que la narrativa del proyecto desmitifique el manejo de residuos radiactivos antes de que la desinformación se consolide.

Finalmente, la Definition of Done (DoD) para cualquier entregable en territorios como La Guajira debe incluir obligatoriamente la Licencia Social. El proyecto no podrá considerarse concluido técnicamente si no es aceptado culturalmente. Esto implica que las Sprint Reviews deben realizarse con la participación activa de las comunidades locales (por ejemplo, el pueblo Wayuu), validando que la tecnología no solo genere electricidad, sino que resuelva de manera tangible la crisis de sed y pobreza. Si el proyecto se percibe como una imposición industrial y no como una herramienta de equidad social y cumplimiento de los ODS, se considerará metodológicamente fallido, independientemente de su éxito operativo.

5. DISCUSIÓN

La presente investigación contrastó la viabilidad teórica de un ciclo combinado de energía nuclear y desalinización bajo un marco de gestión ágil (Scrum), frente a la evidencia documental técnica y regulatoria. Los hallazgos confirman la hipótesis inicial: la cogeneración no solo es viable, sino también termodinámicamente superior a las alternativas fósiles, ya que el aprovechamiento del calor residual transforma un desecho térmico en un activo económico, validando la eficiencia operativa propuesta en el Product Backlog del proyecto. (Joachim M. Schmidt V. G., 2021) Esta premisa se alinea con el contexto específico del Caribe colombiano, comparable al caso egipcio, donde la integración de la desalinización en zonas de estrés hídrico constituye una medida de seguridad nacional más que un simple proyecto de infraestructura, lo cual respalda la definición del Gobierno como Product Owner enfocado en el valor social. (Mohamed K. Shaat, 2023)

En el ámbito económico y de adecuación al entorno, la propuesta de utilizar Reactores Modulares Pequeños (SMR) en Zonas No Interconectadas (ZNI) encuentra respaldo en estudios que confirman que esta tecnología ofrece la estabilidad y el factor de planta necesarios para regiones aisladas de Colombia, superando las limitaciones logísticas de los combustibles fósiles. (Ramirez, 2025) Asimismo, la investigación se alinea con trabajos que demuestran que la energía nuclear actúa como un blindaje financiero frente a la volatilidad de los precios de los hidrocarburos, refutando la percepción de que la inversión nuclear es financieramente riesgosa a largo plazo (Veas, 2017)

No obstante, la discusión evidencia una brecha crítica entre la viabilidad técnica y la realidad institucional. Diversos documentos advierten que la transición energética en Colombia está amenazada por la falta de infraestructura legal y licencias ambientales. En este sentido, el modelo ágil propuesto ofrece una solución procedimental: gestionar la regulación como entregables iterativos dentro de los Sprints, en lugar de requisitos estáticos iniciales. (López A. L., 2024) Esta aproximación metodológica responde a los vacíos identificados por autores colombianos que señalan la vulnerabilidad estructural del sistema eléctrico nacional; la agilidad permite adaptar el proyecto a esta inmadurez regulatoria sin detener la ejecución. (Galeano, 2023)

Finalmente, en la dimensión social, el estudio confirma que la ingeniería resulta insuficiente sin aceptación cultural, debido al efecto NIMBY (Not In My Backyard), verdadero obstáculo que paraliza las decisiones políticas. La propuesta investigativa de incluir la Licencia Social en la

Definition of Done (DoD) y realizar Sprint Reviews con comunidades locales valida la premisa de que el éxito nuclear en Latinoamérica no depende únicamente de la urgencia energética, sino de redefinir la tecnología como un instrumento de equidad social. En consecuencia, el aporte diferencial de este trabajo no radica en la tecnología per se, sino en demostrar que la metodología Scrum constituye el eslabón perdido para articular la superioridad técnica de los SMR con la compleja realidad social y normativa descrita por la literatura. (Rodriguez, 2025)

6. CONCLUSIONES

Para el diseño y la planificación de un proyecto de cogeneración de energía a partir de una fuente nuclear combinada con desalinización de agua en el Caribe colombiano, resulta imprescindible integrar la superioridad termodinámica de los Reactores Modulares Pequeños (SMR) en ciclo combinado con una estrategia de gestión ágil (Scrum), concebida como eje articulador frente a la incertidumbre institucional. Los elementos críticos identificados trascienden la ingeniería estricta e incluyen:

- La adopción de un desarrollo incremental basado en Mínimos Productos Viables (MVP), que permita validar la tecnología en zonas no interconectadas sin asumir riesgos de construcción masiva inicial.
- La definición del Gobierno como Product Owner, con el fin de priorizar el retorno social por encima del financiero.
- La incorporación obligatoria de la Licencia Social dentro de la Definition of Done (DoD), garantizando que la madurez regulatoria y la aceptación cultural avancen al mismo ritmo que la implementación técnica.

El modelo de planificación diseñado para la región Caribe evidenció que la viabilidad del ciclo combinado de SMR y desalinización no depende únicamente de la superioridad técnica, sino de la capacidad de gestionar la incertidumbre mediante metodologías ágiles. Este enfoque iterativo se consolidó como un instrumento estratégico esencial, al permitir adaptar los requisitos técnicos a la evolución de la legislación nacional y transformar la propuesta en una hoja de ruta ejecutable. En consecuencia, aunque la solución asegura seguridad hídrica y estabilidad energética, el éxito del proyecto está condicionado por factores institucionales, demostrando que la principal barrera no radica en la ingeniería, sino en la necesidad de una gobernanza que privilegie la madurez regulatoria y la licencia social sobre el retorno financiero inmediato.

El diagnóstico integral de la región Caribe con énfasis en departamentos como La Guajira y Magdalena reveló que la implementación de sistemas de cogeneración nuclear con SMR constituye la solución técnica óptima para enfrentar simultáneamente la crisis de abastecimiento hídrico y la inestabilidad de la red eléctrica. Los SMR aportan carga base y capacidad de desalinización que las fuentes convencionales y renovables no logran garantizar. Sin embargo,

pese a la urgencia geopolítica y social, la viabilidad del proyecto se encuentra bloqueada por una restricción institucional estructural: La ausencia de un marco regulatorio de mercado que aborde la responsabilidad civil y la disposición de residuos. Esta carencia impide transformar una necesidad crítica en ejecución real mientras el desarrollo nuclear permanezca limitado a una visión exclusivamente estatal sin el andamiaje legal adecuado.

La evaluación comparativa determinó que la cogeneración nuclear mediante SMR representa una solución integral superior frente a las alternativas convencionales. Se destaca:

- En el plano termodinámico, por la transformación del calor residual en un recurso productivo que reduce costos operativos.
- En el plano ambiental, por ofrecer alta densidad energética sin emisiones de gas ni impactos significativos en el suelo como ocurre con la biomasa.

Esta tecnología no solo se validó como la opción más segura para zonas áridas y no interconectadas, sino que también constituye un blindaje financiero estratégico, al estabilizar los costos industriales a largo plazo y desacoplar la operación de la volatilidad inherente a los mercados de combustibles fósiles.

El diseño del plan integral bajo la metodología Scrum estructuró un modelo de gobernanza en el que el Gobierno, en su rol de Product Owner, prioriza el valor social mediante un desarrollo iterativo que gestiona la incertidumbre regulatoria desde el inicio. Esta estrategia descarta la construcción masiva en favor de un enfoque incremental, basado en un MVP piloto en zonas no interconectadas, lo que permite validar la operatividad técnica y generar victorias tempranas antes de escalar. De manera crucial, el plan integra la Licencia Social como criterio obligatorio en la DoD, asegurando que la mitigación del efecto NIMBY y la participación comunitaria en las revisiones sean requisitos indispensables para el éxito del proyecto. Así, la tecnología se legitima como herramienta de equidad social y no como una imposición industrial.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda adoptar una visión de gerencia que concilie la rigurosidad técnica inherente a la ingeniería nuclear con la flexibilidad estratégica de los marcos ágiles. La convergencia entre la ingeniería nuclear y la gerencia moderna de proyectos constituye un desafío de integración que exige utilizar la agilidad no para flexibilizar los estándares de seguridad, sino como herramienta para gestionar la incertidumbre del entorno cambios normativos, volatilidad de costos y aceptación social. En este sentido, mientras los componentes de seguridad crítica se rigen por estándares técnicos estrictos, la capa de gestión estratégica y de relacionamiento debe operar bajo ciclos iterativos, permitiendo pivotar la ejecución ante bloqueos externos sin incurrir en los sobrecostos catastróficos asociados a la planificación estática tradicional.

Para garantizar la correcta adopción del marco metodológico Scrum, se aconseja institucionalizar una estructura de gobernanza en la que el Estado, o una entidad mixta, asuma el rol estratégico de Product Owner. De esta manera, la gestión y refinamiento del Product Backlog jerarquizarán sistemáticamente el valor social en particular la seguridad hídrica por encima de la rentabilidad financiera inmediata. Paralelamente, la gerencia debe empoderar al Scrum Master como líder servicial con capacidad técnica, orientado a la eliminación activa de impedimentos regulatorios y a la facilitación de flujos de comunicación transversales entre los equipos de ingeniería nuclear y gestión social, desmantelando los silos de información que podrían obstaculizar el desarrollo iterativo.

Dado que el alcance del estudio se centró en la generación y desalinización, se identifica la necesidad crítica de realizar investigaciones futuras que modelen financieramente el transporte de agua potable desde la planta nuclear costera hasta los centros de consumo final. Es fundamental determinar si los ahorros operativos de la cogeneración nuclear se mantienen competitivos al incorporar la infraestructura de acueductos regionales.

Para mitigar la incertidumbre institucional, se recomienda que la gerencia del proyecto evite un despliegue masivo inmediato y opte por la implementación de entornos de prueba o Sandboxes. Esto implica gestionar un proyecto piloto en una Zona No Interconectada (ZNI) bajo un régimen normativo experimental, permitiendo que la regulación sobre residuos y responsabilidad civil evolucione de manera iterativa en paralelo a la validación técnica del Mínimo Producto Viable (MVP).

Es imperativo que la dirección del proyecto incorpore la Licencia Social explícitamente dentro de la Definition of Done (DoD) de cada entregable. Se recomienda que los Sprint Reviews no sean exclusivamente técnicos, sino que funcionen como espacios de validación con stakeholders comunitarios, por ejemplo, las comunidades Wayuu, garantizando que ningún avance de infraestructura sea aprobado metodológicamente sin contar con la aceptación cultural y la mitigación del efecto NIMBY.

Ante la imposibilidad actual de pruebas físicas, se sugiere iniciar líneas de investigación orientadas a la creación de gemelos digitales de los reactores SMR adaptados a las condiciones climáticas del Caribe. Estos modelos permitirán simular escenarios operativos y de estrés hídrico con mayor precisión que los análisis documentales, proporcionando datos cuantitativos robustos para refinar la toma de decisiones antes de cualquier inversión de capital.

Finalmente, se recomienda profundizar en investigaciones académicas que contrasten el marco legal colombiano con los casos de Argentina y Brasil, no solo desde la perspectiva técnica, sino también desde la gestión de riesgos regulatorios. Futuros estudios deberían proponer una adaptación tropicalizada de la normativa del OIEA, que permita a Colombia cerrar la brecha legal existente en materia de transporte y disposición de residuos radiactivos.

Referencias

- A. Rezaei, A. N. (2017). Economic evaluation of Qeshm island MED-desalination plant coupling with different energy sources including fossils and nuclear power plant. *Desalination*.
- Acosta, M. B. (2025). *Ecología verde*. Obtenido de https://www.ecologiaverde.com/desalinizacion-que-es-y-tipos-2689.html#anchor_1
- Álvarez, D. O. (Octubre de 2024). *Concepto*. Obtenido de <https://concepto.de/energia-nuclear/>
- Amani Al-Othmana, N. N. (2019). Nuclear desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*.
- Bogdan, T. (1987). *Introducción a los métodos cualitativos de investigación: la búsqueda de significados*.
- Camacho, L. A. (Enero de 2020). *Revista de ingeniería*. Obtenido de LA PARADOJA DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE MALA CALIDAD EN EL SECTOR RURAL COLOMBIANO: <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rdi/article/view/7489/7890>
- Cattaneo, J. I. (2019). *Carem: Viabilidad técnica, económica y ambiental de la utilización del primer reactor de potencia Argentino para la desalinización de agua*. Buenos Aires, Argentina.
- Creswell, J. W. (2013). *Qualitative Inquiry & Research Design*.
- Dan Virah-Sawmy, B. S. (2025). Socio-Economic and Environmental Impact of renewable energy deployments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- DANE. (2021). *Encuesta Nacional de Calidad de Vida (EVC)*. Bogotá.
- Derya Ilem Ozdemir, E. A. (2019). Chapter 17 - Nuclear medicine and radiopharmaceuticals for molecular diagnosis. *Biomedical Applications of Nanoparticles*, 457-490. Obtenido de Sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128165065000176>
- Emmanuel Priego, G. A. (2017). Alternatives of steam extraction for desalination purposes using. *Desalination*.
- Flick, U. (2018). *Doing Grounded Theory*.

Galeano, D. A. (2023). La Energía Nuclear en el Sector Eléctrico Colombiano: Una Alternativa Técnica y Sostenible. *Revista ION*.

Galindo, A. (17 de Abril de 2024). IAEA. Obtenido de <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-energia-nuclear-la-ciencia-de-la-energia-nucleoelectrica>

Hernández Sampieri, R. F. (2010). *Metodología de la investigación*.

Holbert, R. L. (2019). *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications*.

I. Khamis, R. E.-E. (2016). IAEA coordinated research activity on nuclear desalination: the quest for the quest for new technologies and techno-economic assessment. *Desalination*, Pages 56-63.

Joachim M. Schmidt, G. V. (Junio de 2021). *ScienceDirect*. Obtenido de Cogeneración nuclear para una desalinización y generación de energía más limpias: un estudio de viabilidad: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821000045>

Joachim M. Schmidt, V. G. (2021). Nuclear cogeneration for cleaner desalination and power generation – A feasibility study. *Cleaner engineering and technology*.

Junco, C. L. (2022). *Metodologías ágiles en las pymes, un modelo integral de auditoría en la gestión interna*. Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO.

Khashayar Sadeghi, S. H. (2022). Towards net-zero emissions through the hybrid SMR-solar cogeneration plant equipped with modular PCM storage system for seawater desalination. *Desalination*.

Lincoln, N. K. (2018). *The SAGE Handbook of Qualitative Research*.

Liou, J. (28 de Agosto de 2024). IAEA. Obtenido de <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>

López, A. L. (2024). *Estudio de la viabilidad de políticas para la transición energética aplicables en Colombia a partir del análisis de referentes internacionales*.

- López, M. A. (2023). Nuevas tecnologías y perspectivas futuras de reactores nucleares. *Revista científica Bolivianamente*, 39-50.
- López, N. V. (2021). *Implementación de Metodologías Ágiles para gestión de proyectos de Organización Industrial*. Sevilla, España.
- Mazzucato, M. (2011). *El Estado Emprendedor: Mitos de los sectores público y privado*.
- Mohamed K. Shaat, L. A. (2023). Future vision of using nuclear energy for desalination plants in Egypt. *Desalination and Water Treatment*, 27-33.
- ONU. (s.f.). ONU. Obtenido de Objetivos de desarrollo sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Patton, M. Q. (2015). *Métodos de investigación y evaluación cualitativas*.
- Pecharroman, A. U. (2015). *Aplicación de la metodología de desarrollo ágil Scrum para el desarrollo de un sistema de gestión de empresas*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Publicos, S. d. (2025). *Información tarifaria de energía 2025 - Principales comercializadores integrados al operador de red abril*.
- Questionpro. (01 de 07 de 2025). *Tamaño de muestra*. Obtenido de <https://www.questionpro.com/es/tama%C3%B1o-de-la-muestra.html>
- Rami S. El-Emam a, b. H. (2022). Nuclear desalination: A sustainable route to water security. *Desalination*.
- Ramirez, N. E. (2025). *Análisis tecnoeconómico de un sistema de generación de energía con reactores nucleares tipo SMR en Colombia*.
- Rodriguez, E. F. (2025). *Energía nuclear. Problemática técnica, económica y social asociada a los residuos nucleares*.
- Rossmann, C. M. (2011). *Designing Qualitative Research*.
- Rossmann, C. M. (2011). *Designing Qualitative Research*.
- Ruiz, F. R. (2020). *Introducción a la ósmosis inversa*.

Sachs, J. D. (2015). *La era del desarrollo sostenible*.

Saldaña, J. (2015). *The Coding Manual for Qualitative Researchers*.

Sampieri, R. H. (2003). *Metodología de la Investigación*.

Sandelowski, M. (1995). Sample size in qualitative research. *Research in Nursing & Health*.

Scopus. (30 de 11 de 2025). *Scopus*. Obtenido de <https://www-scopus-com.ezproxy.uniminuto.edu/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=72321a8cb1d5c0e268c539dc1633bdd1&sot=a&sdt=a&sl=52&s=TITLE-ABS-KEY%28Nuclear+cogeneration+and+desalination%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>

Scopus. (30 de 11 de 2025). *Scopus*. Obtenido de <https://www-scopus-com.ezproxy.uniminuto.edu/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=72321a8cb1d5c0e268c539dc1633bdd1&sot=a&sdt=a&sl=52&s=TITLE-ABS-KEY%28Nuclear+cogeneration+and+desalination%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>

Scopus. (30 de 11 de 2025). *Scopus*. Obtenido de <https://www-scopus-com.ezproxy.uniminuto.edu/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=72321a8cb1d5c0e268c539dc1633bdd1&sot=a&sdt=a&sl=52&s=TITLE-ABS-KEY%28Nuclear+cogeneration+and+desalination%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>

Seyed Hadi Ghazaie, K. S. (2020). Assessment of the integrated nuclear plant for electricity production and seawater desalination in Iran. *Desalination and Water Treatment*, 20-30.

Slovidaloca. (15 de 12 de 2025). *123RF*. Obtenido de https://es.123rf.com/photo_18024559_esquema-esquema-de-planta-de-energ%C3%ADa-nuclear.html

Vassilis Belessiotis, S. K. (2016). Desalination Methods and Technologies Water and Energy. *Thermal Solar Desalination*, 1-19. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/desalination>

Veas, M. E. (2017). *Generación eléctrica mediante energía nuclear en Chile, y su impacto en la economía nacional*.

Yusuf, O. (2023). *Organismo Internacional de Energía Atómica*. Obtenido de Aprovechar la energía nucleoelectrica para la desalación con el fin de asegurar los recursos de agua dulce: <https://www.iaea.org/es/bulletin/aprovechar-la-energia-nucleoelectrica-para-la-desalacion-con-el-fin-de-asegurar-los-recursos-de-agua-dulce>

Zakaria Triki, R. M. (2023). Energy and Exergy Analyses of a PWR-Type Nuclear Power Plant Coupled with an ME-TVC-MED Desalination System. *MDPI*.

Anexos

Documents by year

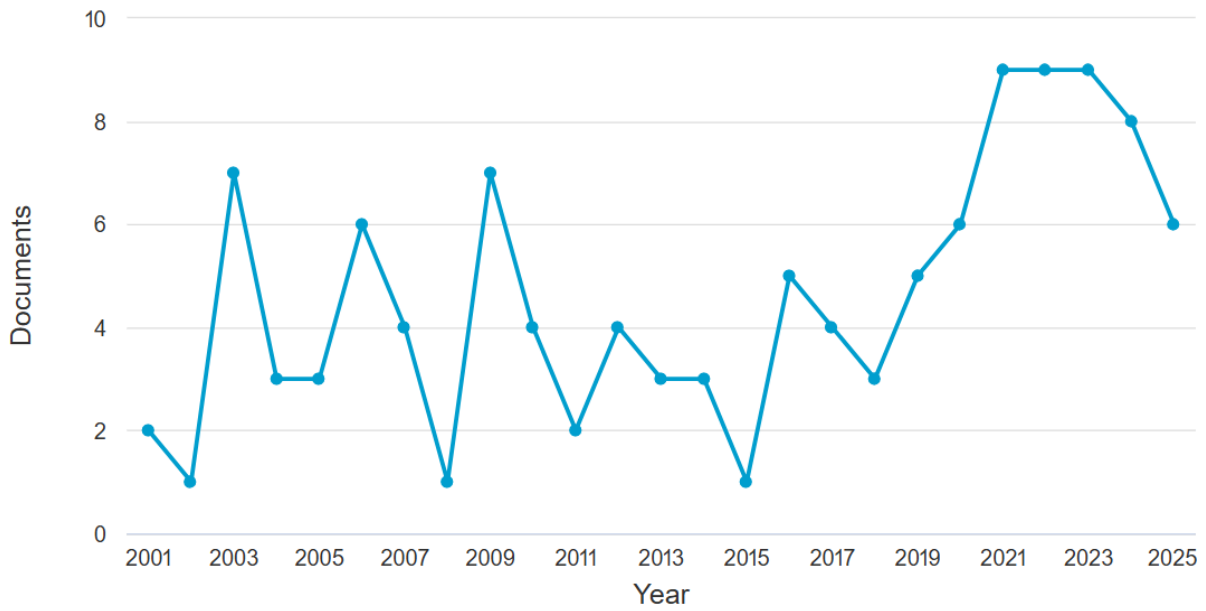


Figura 4, Cantidad documentos publicados tema ciclo combinado (Scopus, Scopus, 2025)

Documents by type

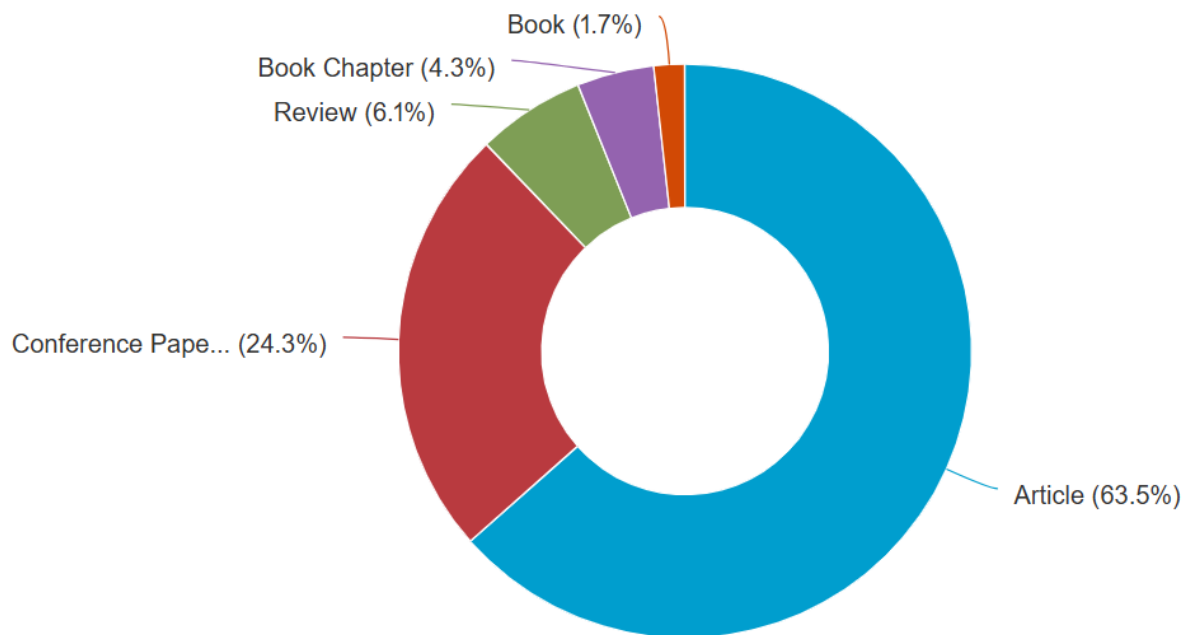


Figura 5, Documentos publicados por tipo ciclo combinado (Scopus, Scopus, 2025)

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

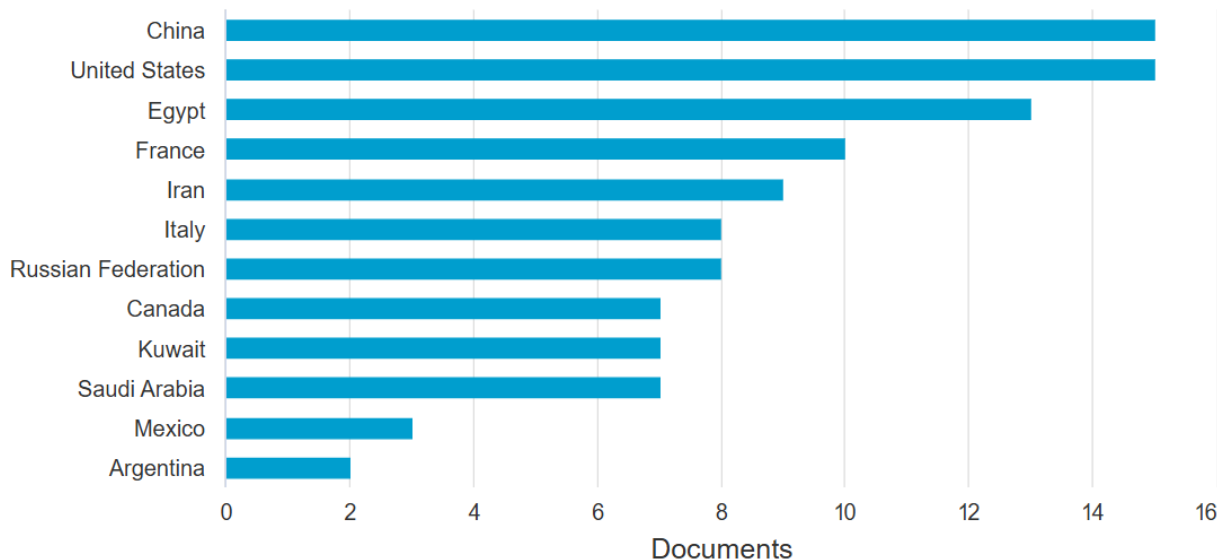


Figura 6, Documentos publicados por país tema ciclo combinado (Scopus, Scopus, 2025)

Título documento	Autor(es)	Año de	Link de ubicación	Descripción	Relación	Análisis
Nuclear cogeneration for cleaner desalination and power generation - A feasibility study	Joachim M. Schmidt, Veera Gnaneswar Gude	2021	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266793822000045	El documento aborda la creciente escasez de agua y la necesidad de fuentes de energía sostenibles. El estudio se centra específicamente en Homestead, Florida (cerca de la planta nuclear Turkey Point), como un caso de estudio para evaluar si es viable utilizar la energía nuclear no solo para electricidad, sino también para desalinizar agua de mar a gran escala.	Técnico	La conclusión del documento es que la cogeneración nuclear es una solución técnicamente viable y ambientalmente superior para regiones con escasez de agua. Sin embargo, económicamente enfrenta desafíos en lugares donde el agua subterránea sigue siendo muy barata.
Future vision of using nuclear energy for desalination plants in Egypt	Mohamed K. Shaat, Loula A. Shouman, Dalia A. Fadel	2023	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398524009809	En su mayor parte, se basa en la premisa de que Egipto enfrenta una crisis hídrica severa debido al rápido crecimiento poblacional, la expansión industrial y agrícola, y los recursos limitados de agua dulce (dependencia del río Nilo). Con la construcción de la primera planta nuclear en El-Daba, los autores proponen aprovechar esta infraestructura no solo para electricidad, sino para solucionar la escasez de agua.	Técnico	Se concluye que la energía nuclear ofrece una solución sostenible y prometedora para la seguridad hídrica de Egipto. La integración de la desalinización con la planta de El-Daba (especialmente aprovechando el calor residual) y el futuro despliegue de SMRs pueden cubrir una parte significativa del déficit de agua proyectado para 2050 sin emitir gases de efecto invernadero.
Propuesta de un modelo conceptual de desarrollo de energía nuclear para la ampliación de la canasta energética en Colombia	Jorge Enrique Santander Fernández y Fabian Andres Sanchez	2025	https://repositorio.unab.edu.co/handle/20.500.12749/2432	En el documento se valida el creciente interés académico, con análisis técnicos sobre el creciente interés académico en el país por formalizar la energía nuclear como respaldo de la transición energética.	Técnico	En el documento se concluye que la implementación de centrales nucleares es viable a largo plazo, pero condicionada a que el Estado desarrolle primero la infraestructura legal y educativa. El modelo sugiere que Colombia debe empezar por la formación de capital humano y la regulación antes de comprar tecnología.
Evaluación de la viabilidad para la implementación de plantas desalinizadoras usando energías renovables en la región de la Guajira Colombiana	Hanna Leneth Jimenez Barahona	2019	https://repositorio.uanamerica.edu.co/items/84b663d2-031d-4968-ae12-a5326728a414	El documento resalta la paradoja de la región Guajira que posee los mayores potenciales de energía renovable de Colombia (radiación solar y vientos constantes), pero sufre la crisis humanitaria más severa por falta de agua potable, afectando principalmente a las comunidades Wayuu dispersas.	Técnico	En el documento se concluye que la implementación de desalinización de agua para la región Guajira es viable y urgente. Se recomienda específicamente sistemas híbridos o descentralizados cercanos a las rancherías, en lugar de una mega-planta centralizada que requiera costosos acueductos para distribuir el agua.
Propuesta de cogeneración aplicada a desalinización	Karla Fabiola Mayo Sánchez	2022	http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/kmlui/bitstream/handle/RepoEi/478487/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y	En este documento se explica explícitamente como sería el proceso de ósmosis inversa para desalinización de agua usando como fuente de las bombas una central de regeneración por medio de energía nuclear.	Técnico	La conclusión principal de la tesis argumenta que la cogeneración nuclear es termodinámica y ambientalmente superior a la desalinización convencional basada en combustibles fósiles, validando el uso del calor de desecho como un activo económico.

Figura 7, Matriz documental análisis parte técnica

Planeación ciclo combinado de generación de energía nuclear y potabilización de agua por medio de desalinización bajo metodología ágil

Economic evaluation of Qeshm island MED-desalination plant coupling with different energy sources including fossils and nuclear power plants	A. Rezaei, A. Nasebi, Gh. Alajbegi, M. Aghaie	2017	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011814717325255	El estudio se centra en la isla de Qeshm (Irán), una región que enfrenta una severa escasez de agua dulce. El objetivo principal fue evaluar cuál es la fuente de energía más rentable para alimentar una planta de desalinización por Destilación de Efecto Múltiple (MED). Se compararon diferentes escenarios de acoplamiento energético para determinar la viabilidad económica de cambiar los combustibles fósiles tradicionales por energía nuclear.	Económico	Se concluye que, para la Isla de Qeshm, la energía nuclear es la alternativa más competitiva frente a los combustibles fósiles para la desalinización a gran escala. Además de la ventaja económica (menor costo por metro cúbico), destacan la estabilidad de precios del combustible nuclear a largo plazo frente a la volatilidad de los mercados de petróleo y gas.
Análisis tecnoeconómico de un sistema de generación de energía con reactores nucleares tipo SMR en Colombia	Nicolás Esteban Enciso Ramírez	2025	https://repositorio.udec.edu.co/items/6e42bc67-4895-4fa3-9b1c-ec939ea067	Este estudio es clave porque evalúa una tecnología nuclear específica (reactores de alta temperatura refrigerados por gas) para el contexto colombiano, enfocándose particularmente en las Zonas No Interconectadas (ZNI) donde los costos de energía son tradicionalmente altos.	Económico	El documento concluye que la implementación técnica es viable y rentable por la estabilidad del suministro (alto factor de planta) y la capacidad de operar en regiones aisladas sin depender de la logística continua de combustibles fósiles.
Energía nuclear y transición energética: el caso de la Unión Europea Autor	Ximena Urgartemendia	2024	https://i.unsam.edu.ar/handle/123456789/2342	Se da una explicación de como la UE diseñó un sistema de clasificación para definir que actividades económicas son sostenibles, entre ellas, la generación de energía.	Económico	Este documento valida la viabilidad financiera. Confirma que la energía nuclear ha recuperado su estatus de "inversión sostenible" en el mercado más exigente del mundo (Europa), siempre y cuando se resuelva el tema de los residuos.
Generación eléctrica mediante energía nuclear en Chile, y su impacto en la economía nacional	Mauricio Esteban Leiva Veas	2017	https://repositorio.biblioteca.unsam.edu.ar/handle/bitstream/142043326/839/content	El documento argumenta que si Chile quiere seguir siendo líder minero mundial, no puede depender de precios de energía volátiles (petróleo/gas). La visión es que la energía nuclear es la única herramienta capaz de ofrecer un "precio plano" y predecible a décadas, blindando la economía nacional contra crisis externas.	Económico	Este documento valida la viabilidad financiera. Confirma que la energía nuclear ha recuperado su estatus de "inversión sostenible" en el mercado más exigente del mundo (Europa), siempre y cuando se resuelva el tema de los residuos.
La utilidad de la energía nuclear en la economía mexicana, 2011-2024	Marcos Alberto Terán Cerecedo	2025	https://iudgb.unam.mx/server/api/core/bitstream/773223-5c53-411a-1c18-b1540a08193d/content	La visión del documento es que la energía nuclear operó en la realidad como el activo financiero más robusto y rentable del sistema eléctrico mexicano actuando como un blindaje ineludible contra la volatilidad de los precios del gas extranjero. También se argumenta que al capitalizar esa rentabilidad para expandir la soberanía energética del país, se deja sobre la mesa una oportunidad masiva de desarrollo.	Económico	Desde lo económico, la conclusión del documento es que al detener la expansión nuclear por razones políticas/ideológicas, México se expuso a una volatilidad inflacionaria inmensa. La "utilidad económica de la planta existente fue máxima, pero la "utilidad perdida" (costo de oportunidad) por no tener tres o cuatro plantas más fue inmensa.

Figura 8, Matiz documental análisis parte económica

Carem: Viabilidad técnica, económica y ambiental de la utilización del primer reactor de potencia Argentino para la desalinización de agua	Juan Ignacio Cattaneo	2019	https://www.ceara.org/tesis/2019/tesis43.pdf	En este documento académico se analiza la sinergia entre la tecnología nuclear argentina y la necesidad de recursos hídricos en zonas áridas, específicamente en la Patagonia.	Sociales	El documento concluye que el proyecto es técnica, económica y ambientalmente viable. Posiciona al CAREM no solo como un exportador de tecnología nuclear, sino como una solución humanitaria y estratégica para el desarrollo de la Patagonia garantizando seguridad hídrica y energética simultáneamente.
Energía nuclear. Problemática técnica, económica y social asociada a los residuos nucleares	Eliás Fuentes Rodríguez	2025	https://idus.us.es/server/api/core/bitstream/81030/714-b81d-4c42-ba7e-43b04048178e/content	La visión central de este documento refleja que no se puede negar el daño de los residuos nucleares pero que se puede proponer un cambio de perspectiva: dejar de verlos como un "problema sin solución" y empezar a verlos como un "riesgo gestionable e industrial", especialmente si se compara con la alternativa del cambio climático.	Sociales	El documento desde la visión social concluye que este es el verdadero obstáculo. El miedo público y el efecto NIMBY ("No en mi patio trasero") paraliza las decisiones políticas necesarias para construir los almacenes definitivos, convirtiendo un problema técnico soluble en un problema político crónico.
El papel crucial de la energía nuclear en el desarrollo sostenible	Gonzalo F. González Milagros Prodriguez	2024	https://mail.cisr.ciaeh.edu.uy/publicaciones/index.php/derecho/articulo/view/724	El documento da una visión jurídica y de derechos humanos argumentando que sin energía limpia y constante, no hay salud, educación ni desarrollo digno. Así, al bloquear proyectos nucleares se da una violación indirecta al derecho de las personas de vivir en un medio ambiente sano y desarrollado.	Sociales	El documento desde la visión social concluye que este es el verdadero obstáculo. El miedo público y el efecto NIMBY ("No en mi patio trasero") paraliza las decisiones políticas necesarias para construir los almacenes definitivos, convirtiendo un problema técnico soluble en un problema político crónico.
Comparación del impacto ambiental de los sistemas energéticos a base de nuclear, biomasa y gas utilizando el análisis del ciclo de vida	John Freddy Galvis Martínez	2016	https://biblioteca.bucaramanga.upb.edu.co/docs/digital_126329.pdf	Se hace una comparación de 3 tecnologías las cuales son: Energía nuclear, gas y biomasa	Sociales	El documento desde la visión social concluye que este es el verdadero obstáculo. El miedo público y el efecto NIMBY ("No en mi patio trasero") paraliza las decisiones políticas necesarias para construir los almacenes definitivos, convirtiendo un problema técnico soluble en un problema político crónico.
La energía nuclear como una alternativa para el desarrollo humano en América Latina: análisis del programa nuclear de Bolivia (2014-2030)	Carillo García, Vanessa Montserrat	2018	https://biblioteca.dgb.unam.mx/bitstream/handle/123456789/123456789/1/123456789.pdf	El documento da una visión estratégica ya que da una visión distinta a lo analizado. Si vemos los casos de países con reactores de potencia (Argentina, México) o que los rechazaron (Chile, Bolivia representa el "Tercer Camino"). Un país sin tradición nuclear que decide entrar al club desde cero, pero con un enfoque social y no energético inicialmente.	Sociales	No solo es una opción técnica, sino una responsabilidad ética para garantizar el desarrollo de las futuras generaciones sin comprometer el futuro definitivo. Si Colombia quiere proteger su biodiversidad (evitando monocultivos de biomasa) y cumplir sus metas de París (dejando el gas), la Energía Nuclear es la única opción que combina Bajo Carbono con Energía Segura y Sostenible.

Figura 9, Matriz documental análisis parte social

Estudio de la viabilidad de políticas para la transición energética aplicables en Colombia a partir del análisis de referentes internacionales.	Aldair López López César Alberto Pardo Archila	2024	https://grupocallio.org/wp-content/uploads/2025/09/7_POLITICAS_PARA_LA_TRANSICION_ENERGICA_A_COLOMBIANA.pdf	Este documento da una visión del marco legal comparativo de varias tecnologías de generación ayudando a entender que hizo el mundo y qué le falta a Colombia para permitir proyectos disruptivos como los SMR o la desalinización masiva.	Regulatorios	La transición energética en Colombia es viable políticamente, pero la ejecución técnica está amenazada por la falta de infraestructura de redes y la complejidad social (licencias ambientales). Se recomienda adoptar el modelo de subastas de largo plazo (como Chile) pero reforzando la seguridad jurídica.
Relación entre energía, medio ambiente y desarrollo económico a partir del análisis jurídico de las energías renovables en Colombia	Milton Jose Pereira Blanco	2015	https://revistas.unilife.edu.co/index.php/saber/articulo/view/8828672	El documento plantea la idea que la seguridad jurídica es un activo económico tan importante como la tecnología misma	Regulatorios	El desarrollo económico sostenible en Colombia depende de que el Estado garantice reglas de juego claras. Los inversionistas no temen al riesgo técnico, temen al riesgo regulatorio (que cambien las leyes a mitad del proyecto o que una licencia se demore 5 años).
La Energía Nuclear en el Sector Eléctrico Colombiano: Una Alternativa Técnica y Sostenible	David Andrés Galeano	2023	http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-1000/2023000300007	El documento visualiza el sistema eléctrico colombiano como "vulnerable por diseño". Al depender tanto del agua (Hidroeléctricas), el país queda succionado por el clima (Fenómeno de El Niño).	Regulatorios	El documento concluye que el sector regulatorio aún no tiene un marco incipiente e insuficiente en Colombia para que la inversión privada pueda aportar en proyectos nucleares. Tampoco hay autoridad regulatoria y se recomienda que las entidades que vigilen el sector no deben ser las mismas que promueven el negocio de energía, como el caso de Colombia (donde el Ministerio de Minas y Energía es el Estado, no de mercado. En todos los casos estosos (Atucha, Angra, Laguna Verde), el Estado fue el inversor, el regulador y el promotor. La iniciativa privada para no la construcción de centrales en la nación, debido a las barreras de capital e inercia.
La política nuclear en América Latina: breve análisis sobre el uso de la energía nuclear en América Latina	Fernando E. Martín	2011	https://repositorio.lasociedades.edu.co/items/6e42bc67-a-c81c-414b-a93a-b1040baa7e0	La visión central del documento es que América Latina es un actor geopolítico único en el escenario nuclear. El documento sostiene que la región ha transformado una antigua fuente de rivalidad en un motor de integración, soberanía tecnológica y estabilidad regional.	Regulatorios	La regulación técnica del transporte garantiza la seguridad. El vacío regulatorio real para un SMR en Colombia sigue estando en la legislación nacional sobre la disposición final de residuos (AGP) y la responsabilidad civil en caso de accidente.
Reglamentación técnica para el transporte de materiales radioactivos	Ministerio de Minas y Energía	2019	https://www.minenergía.gov.co/documentos/78310/ANEXO_TRANSPORTE_CONTRACTUAL.pdf	La regulación técnica para el transporte de materiales radioactivos está estandarizada a nivel mundial por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) a través de su reglamento SSR-6 (que los países de América Latina adoptan y adaptan).	Regulatorios	La regulación técnica del transporte garantiza la seguridad. El vacío regulatorio real para un SMR en Colombia sigue estando en la legislación nacional sobre la disposición final de residuos (AGP) y la responsabilidad civil en caso de accidente.

Figura 10, Matriz documental análisis parte regulatorio