



Implementación de una metodología de evaluación de impactos ambientales en un proyecto genérico de producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*

Andrea Castrillón Rojas

Trabajo de grado de maestría presentado para optar al título de Magíster en Sostenibilidad

Director

Idi Amin Isaac Millan, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Maestría en Sostenibilidad

Medellín

2025

---

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

---

## Tabla de contenido

Siglas, acrónimos y abreviaturas.....	6
Glosario.....	6
Resumen .....	7
Abstract.....	8
1. Introducción.....	9
2. Planteamiento del problema .....	10
3. Justificación.....	12
4. Objetivos.....	13
4.1 Objetivo General .....	13
4.2 Objetivos Específicos.....	13
5. Marco referencial.....	14
5.1 Marco conceptual .....	14
5.2 Estado del arte .....	15
6. Metodología .....	20
7. Resultados y análisis .....	21
7.1 Tipos de diseños para los parques eólicos.....	21
7.2 Consideraciones.....	23
7.3 Metodología de evaluación elegida y procedimiento para identificación de impactos	24
7.4 Resultados de la evaluación de impactos .....	38
7.5 Análisis general de resultados.....	54
7.5.1 Consideraciones complementarias de impactos exógenos y ciclo de vida .....	57
8. Conclusiones.....	58
9. Referencias .....	60

---

### Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Definición de términos utilizados en el análisis</i> .....	6
<b>Tabla 2</b> <i>Condición de profundidad para elegir un diseño de turbinas eólicas offshore</i> .....	22
<b>Tabla 3</b> <i>Tipos de configuración en proyectos de producción de hidrógeno a partir de energía eólica offshore</i> .....	23
<b>Tabla 4</b> <i>Criterios de evaluación de metodologías de EIA</i> .....	25
<b>Tabla 5</b> <i>Características técnicas de proyectos eólicos offshore desarrollados a nivel internacional</i> .....	27
<b>Tabla 6</b> <i>Descripción de condiciones ambientales de la zona de influencia sin proyecto</i> .....	28
<b>Tabla 8</b> <i>Descripción general de las actividades del proyecto</i> .....	29
<b>Tabla 9</b> <i>Matriz de evaluación de actividades y elementos</i> .....	32
<b>Tabla 10</b> <i>Relación de elementos e impactos - Descripción de impactos</i> .....	33
<b>Tabla 11</b> <i>Matriz de evaluación de actividades e impactos</i> .....	36
<b>Tabla 12</b> <i>Descripción de criterios de evaluación</i> .....	37
<b>Tabla 13</b> <i>Valoración de la importancia del impacto</i> .....	38
<b>Tabla 14</b> <i>Navegación de fichas de evaluación</i> .....	38
<b>Tabla 15</b> <i>Evaluación de IMPACTO 1</i> .....	39
<b>Tabla 16</b> <i>Evaluación de IMPACTO 2</i> .....	40
<b>Tabla 17</b> <i>Evaluación de IMPACTO 3</i> .....	41
<b>Tabla 18</b> <i>Evaluación de IMPACTO 4</i> .....	42
<b>Tabla 19</b> <i>Evaluación de IMPACTO 5</i> .....	43
<b>Tabla 20</b> <i>Evaluación de IMPACTO 6</i> .....	44
<b>Tabla 21</b> <i>Evaluación de IMPACTO 7</i> .....	45
<b>Tabla 22</b> <i>Evaluación de IMPACTO 8</i> .....	46
<b>Tabla 23</b> <i>Evaluación de IMPACTO 9</i> .....	47
<b>Tabla 24</b> <i>Evaluación de IMPACTO 10</i> .....	48
<b>Tabla 25</b> <i>Evaluación de IMPACTO 11</i> .....	49
<b>Tabla 26</b> <i>Evaluación de IMPACTO 12</i> .....	50
<b>Tabla 27</b> <i>Evaluación de IMPACTO 13</i> .....	51
<b>Tabla 28</b> <i>Evaluación de IMPACTO 14</i> .....	52
<b>Tabla 29</b> <i>Resultados de la importancia de los impactos</i> .....	53

---

### Lista de figuras

<b>Figura 1</b> <i>Metodología a aplicar</i> .....	20
<b>Figura 2</b> <i>Energía eólica y electrolizador offshore</i> .....	21
<b>Figura 3</b> <i>Energía eólica offshore y electrolizador onshore</i> .....	22
<b>Figura 4</b> <i>Tipos de configuraciones en el diseño de turbinas para proyectos eólicos</i> .....	23
<b>Figura 5</b> <i>Resultados y clasificación de la importancia de los impactos evaluados</i> .....	54

### Siglas, acrónimos y abreviaturas

<b>ACV</b>	Análisis de Ciclo de Vida
<b>ANLA</b>	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
<b>CONFIG</b>	Configuración
<b>EIA</b>	Evaluación de Impactos Ambientales
<b>IEA</b>	Siglas en inglés – International Energy Agency
<b>IRENA</b>	Siglas en inglés - International Renewable Energy Agency
<b>MADS</b>	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
<b>RAIR</b>	Riesgo Ambiental Integral por Recurso
<b>RAM</b>	Riesgo Ambiental por Medio

### Glosario

**Tabla 1**

*Definición de términos utilizados en el análisis*

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
<b>Fitoplancton</b>	Corresponde a organismos microscópicos y fotosintéticos, es decir, aquellos que son capaces de elaborar su propio alimento a partir de la luz solar, y se encuentran en ambientes acuáticos (ríos, mar, lagos, embalses). Normalmente son muy sensibles a la calidad del agua y cumplen un papel ecológico fundamental, ya que ponen a disposición de otros organismos diferentes tipos de nutrientes, manteniendo un equilibrio bioquímico en el ecosistema.
<b>Hidrobiota</b>	Hace referencia a los organismos vivos que habitan los ecosistemas acuáticos, en los que se incluyen bacterias, algas, peces, plantas acuáticas, entre otros.
<b>Individuos bentónicos</b>	Son organismos asociados principalmente al sustrato de los cuerpos de agua, es decir, no flotan libremente en la columna de agua como lo suele hacer el fitoplancton. Pueden ser inmóviles (esponjas o mejillones), o móviles (macroinvertebrados), estos últimos individuos incluyen grupos como los insectos acuáticos, moluscos (caracoles y almejas), crustáceos, anélidos (lombrices y sanguijuelas). Son normalmente utilizados como bioindicadores de la calidad del agua, ya que, su presencia, ausencia o abundancia refleja condiciones ambientales como contaminación, oxigenación o alteración del hábitat, además, cumplen un papel ecológico fundamental como agentes transformadores de la materia orgánica y fuente de alimento para otros organismos.
<b>Individuos ícticos</b>	Hace referencia específica a la ictiofauna, es decir, los peces en los ecosistemas acuáticos, y cumplen funciones ecológicas que van desde la regulación de especies con la cadena trófica, hasta el transporte de nutrientes.
<b>Individuos zooplanctónicos</b>	Son organismos que se alimentan principalmente del fitoplancton y materia orgánica en suspensión, por lo tanto, son esenciales en la cadena trófica del ecosistema, ya que estos, a su vez sirven como alimento para peces y otros organismos.
<b>Jetting</b>	Se trata de un método de preparación del terreno para la instalación de cables submarinos, el cual utiliza chorros de agua a alta presión, de manera que el cable se entierre a la profundidad deseada. Normalmente se utiliza en sustratos blandos.
<b>Plugging</b>	Hace referencia a un método utilizado para la instalación de cableado submarino, el cual consiste en realizar un tipo de arado en el área requerida.

---

## Resumen

Con el crecimiento exponencial de la población y la alta demanda energética actual, en el mundo se cuestiona cada vez más el uso de fuentes no renovables. Es así como en la actualidad, en el marco de la Agenda 2030, se están buscando alternativas que van hacia la descarbonización y a métodos de producción energética que generen menos impactos socioambientales.

Entre las estrategias que van encaminadas a proyectos de transición energética se busca la implementación de tecnologías basadas en el hidrógeno verde, el cual requiere energías renovables para su producción tales como la eólica o la solar. Si bien se trata de proyectos que implican desafíos tecnológicos positivos y mejoras en políticas encaminadas a la sostenibilidad, no están exentos de controversias referentes a los impactos socioambientales coligados.

En este trabajo se pretende realizar una revisión de los proyectos actuales para la producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*, haciendo énfasis en los impactos ambientales que se pueden presentar durante las etapas de construcción, operación y mantenimiento, que permitan conocer a fondo cuáles serían las implicaciones ambientales a la luz de la aplicación de esta alternativa en países como Colombia.

*Palabras clave:* hidrógeno verde, eólica *offshore*, impactos ambientales, sostenibilidad, transición energética

---

### **Abstract**

With the exponential growth of the population and the current high energy demand, the use of non-renewable sources is increasingly being questioned in the world. This is how, currently, within the framework of the 2030 Agenda, different alternatives are being considered to go towards decarbonization and to energy production methods that generate less socio-environmental impacts.

Among the strategies that are aimed at energy transition projects, one of the most interesting is the deployment of technologies based on green hydrogen, which requires renewable energies for its production, such as wind or solar. Although these projects involve positive technological challenges and improvements in policies aimed at sustainability, they are not exempt from controversies regarding the associated socio-environmental impacts.

This work aims to review current projects in process of hydrogen production from offshore wind energy, emphasizing on the environmental impacts that may occur during the construction, operation and maintenance stages, which will allow us to know in depth which are the environmental implications in light of the application of this alternative in countries such as Colombia.

*Keywords:* green hydrogen, offshore wind, environmental impacts, sustainability, energy transition

---

## 1. Introducción

El cambio climático, la necesidad de diversificar las fuentes de energía y la transición hacia economías bajas en carbono han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías de generación de energía limpia a nivel global. En este contexto, la producción de hidrógeno verde (obtenido a partir de fuentes renovables como la energía eólica *offshore*) se presenta como una alternativa estratégica para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, fomentar la seguridad energética y promover el desarrollo sostenible.

Colombia, dada su ubicación geográfica estratégica, presenta un potencial significativo para el aprovechamiento de los recursos marinos, especialmente en la región Caribe. Sin embargo, el desarrollo de proyectos de esta naturaleza implica una serie de desafíos técnicos, sociales y, particularmente ambientales, que deben ser cuidadosamente evaluados para garantizar su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo. La evaluación de impactos ambientales (EIA) constituye, por tanto, una herramienta fundamental para identificar, valorar y gestionar los posibles efectos que estas intervenciones pueden generar sobre los ecosistemas marinos y costeros, así como sobre sus servicios ecosistémicos y las comunidades que dependen de ellos.

Actualmente, en Colombia no se dispone de una metodología estandarizada y específica para la evaluación de los impactos ambientales derivados de proyectos de producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*. En este contexto, el presente trabajo propone la implementación de una metodología previamente desarrollada y aplicable a este tipo de proyectos, adaptándola a las condiciones de un escenario genérico representativo del contexto nacional. Esta evaluación busca aportar elementos técnicos que faciliten la toma de decisiones y promuevan un desarrollo responsable de este tipo de iniciativas en el país.

---

## 2. Planteamiento del problema

El consumo energético sigue siendo la principal causa del cambio climático, ya que representa alrededor del 60% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero – GEI (NACIONES UNIDAS, 2024).

Con la expansión global, y las altas tasas de producción y consumo que se abrieron paso en el siglo XX, la producción energética mundial que hoy es liderada por la explotación de combustibles fósiles se está viendo afectada no solo por la disminución en sus reservas sino por la presión que ejerce el sector ambiental donde se ve manifestada en impactos que derivan de la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y, que, como efecto dominó incide de forma directa en la aceleración del aumento de la temperatura de la tierra (Wyczykier, 2022).

De acuerdo con datos a 2024, las fuentes de electricidad limpia superaron el 40% de la electricidad mundial, donde la eólica y solar son la cuarta fuente de energía en el mundo mostrando un crecimiento significativo, sin embargo, los cambios en la generación eléctrica mediante combustibles fósiles a corto plazo estarán supeditados a las fluctuaciones del clima, tal como se vio en el año 2024 donde hubo un incremento de esta en un 1.4% (EMBER, 2025). En este sentido, las emisiones continúan en crecimiento y la dependencia de fuentes no renovables lleva al mundo a un punto de no retorno. De acuerdo con lo establecido en el Acuerdo de París, el aumento de la temperatura global no debe superar los 1.5°C, y para lograr esto se requiere que casi el 60% del petróleo y gas, así como el 90% del carbón permanezcan sin extraer de cara al 2050 (Welsby, Price, Pye, & Ekins, 2021).

Por lo anterior, y sumando el crecimiento exponencial de la población, se hace necesario evaluar e incorporar metodologías no convencionales en las que la generación de impactos sea mínima, y que, además, cubran la demanda energética mundial.

En este sentido, en el mundo se avanza en una hoja de ruta que comprende un avance en las políticas distributivas, donde se espera el establecimiento de estrategias de cooperación internacional, así como inversión en investigación y desarrollo, de manera que se incentive el uso eficiente de la energía en todos los sectores, con la implementación de una economía circular y nuevos proyectos piloto de energías renovables (IRENA, 2022).

Entre los proyectos para la expansión de las energías renovables en el mundo se tiene el hidrógeno verde, cuya producción parte de energía eólica y solar con posibilidades de desarrollo *onshore* (en tierra) y *offshore* (en mar). Colombia también por su parte, se ha sumado a este objetivo, implementando una

---

hoja de ruta hacia la producción de hidrógeno (Ministerio de Minas y Energía, 2021), así como proyectos eólicos offshore (WORLD BANK GROUP, 2022).

En este caso, se hará un enfoque en la producción de hidrógeno verde a partir de energía eólica *offshore*, que, si bien se percibe como una fuente prometidora de energía, no deja de ser controversial en referencia a los impactos socioambientales asociados que su implementación podría derivar, por lo que se hace importante analizar los proyectos actualmente en proceso de implementación junto a los impactos intrínsecos y la manera en que se hace su manejo. Esto podría contribuir a un análisis ambiental de la implementación de este tipo de proyectos en Colombia.

---

### 3. Justificación

La población mundial es altamente dependiente del consumo energético proveniente de los combustibles fósiles. Según datos estadísticos, en el año 2024 la producción de energía mediante el carbón fue aproximadamente del 35%, mientras que para el gas natural fue del 22% y finalmente, el petróleo con el 3% (IEA, 2025). En este sentido, la mayoría de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el mundo provienen de combustibles fósiles, lo cual ha comprometido la vida en la tierra, todo esto a razón de los patrones de consumo excesivos que demandan y afectan recursos vitales tales como el agua, aire y suelo.

Uno de los retos más importantes actualmente, se enfoca en el desarrollo y puesta en marcha de proyectos que impulsen la transición energética mediante energías renovables, con las cuales se espera un avance en el proceso de descarbonización y, asimismo, la reducción de emisiones GEI. Entre los mecanismos que actualmente se estudian e incluso ya cuentan con una hoja de ruta en varios países (incluido Colombia) es el hidrógeno, el cual no es netamente una fuente de energía, pero sí un portador de ella. Además, se trata del elemento más abundante del planeta (Iberdrola, 2024).

En este caso, el proceso de obtención de hidrógeno que atañe a este trabajo es el conocido como hidrógeno verde, el cual se obtiene sin generación de emisiones contaminantes a la atmósfera y que, aún se encuentra en menor escala de desarrollo por algunos países en el mundo, pero que, a su vez se proyecta como una solución energética a futuro para diferentes sectores económicos como la industria y el transporte.

La producción del hidrógeno verde entonces requiere una fuente de energía no renovable, que, para el caso de estudio se analizará la energía eólica *offshore* dada la proyección con la que cuenta a nivel mundial. Sin embargo, es importante resaltar que, si bien se trata de una solución a las problemáticas ambientales actuales, no está exenta de críticas y controversias debido a los posibles impactos socioambientales que derivan el proceso de producción, por lo que, en este trabajo, se espera contribuir al proceso de identificación de impactos que permitan anticiparse a las posibles consecuencias que pueden traer este tipo de proyectos referentes al medio ambiente y medio social, y de igual manera, contribuir al establecimiento de estrategias y políticas que regulen las nuevas tecnologías de producción energética, especialmente en Colombia.

---

## 4. Objetivos

### 4.1 Objetivo General

Implementar una metodología de evaluación de impactos ambientales en un proyecto genérico de producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*, que permita un análisis ambiental de este tipo de proyectos en Colombia.

### 4.2 Objetivos Específicos

- Investigar las fases y actividades que comprenden el desarrollo de proyectos de producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*, haciendo énfasis en las etapas de construcción y operación.
- Efectuar la identificación, evaluación y caracterización de los principales impactos ambientales que se presentan durante el desarrollo de proyectos de producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*, tomando como apoyo políticas o estudios ambientales asociados a esta temática, así como metodologías integrales aplicables en Colombia.
- Realizar un análisis ambiental general respecto a los impactos identificados para un proyecto genérico de producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*, incluyendo recomendaciones que reúnan medidas de manejo para algunos de ellos.

---

## 5. Marco referencial

### 5.1 Marco conceptual

El hidrógeno fue descubierto en 1766 por Henry Cavendish, y diferentes experimentos llevaron a descubrir que, cuando la electricidad era introducida en el agua podría generar una reacción que lo produciría sin generar emisiones de gases de efecto invernadero. Y, que si para su producción se llegara a utilizar energía producida a partir de energías renovables no se generaría ningún tipo de emisión durante toda la cadena de producción del mismo (Mokrzycki & Gawlik, 2024), a este tipo de producción se le conoce actualmente hidrógeno verde.

Se dice que, poniendo en marcha proyectos de generación de energía a partir de la producción de hidrógeno verde se podría reducir la generación de CO<sub>2</sub> en 10.2 Gt/año. Además, se ha analizado que, el consumo de agua para este fin es incluso menor al sector de la agricultura que gestiona un aproximado del 70% de uso de agua en el mundo (Mokrzycki & Gawlik, 2024).

La Comisión Europea ha incluido el potencial del hidrógeno verde en sus actuales políticas (Mokrzycki & Gawlik, 2024), y, con la Agenda 2030 se han establecido estrategias de producción de hidrógeno para la promoción de capacidades tecnológicas y operativas que contribuyan a la transición energética.

Entre las diferentes alternativas para la generación de energía se cuenta con la energía eólica cuyas turbinas pueden instalarse en tierra o en el mar (lo que se conoce como energía eólica *offshore*), estas últimas con un alto potencial para producir mayor cantidad de energía dada su alta capacidad operativa (Gómez & Castro, 2024).

Dado el alto potencial eólico costa afuera, Colombia se ha sumado a la elaboración de una hoja de ruta para la producción de energía *offshore* que permitiría el desarrollo energético del país a un mediano y largo plazo. Hasta el momento se han analizado las áreas disponibles para aprovechamiento, las diferentes limitaciones ambientales y sociales, así como los posibles escenarios de este desarrollo (WORLD BANK GROUP, 2022).

Si bien el desarrollo energético *offshore* en Colombia no se inclina propiamente a la generación de hidrógeno verde, esta podría incluirse en los usos y soluciones potenciales a la demanda energética, y, mientras se consideran los desarrollos tecnológicos necesarios para la construcción, operación y almacenamiento de este tipo de proyectos, es interesante realizar un análisis desde el punto de vista ambiental.

---

## 5.2 Estado del arte

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS -, así como las demás iniciativas propuestas que encaminan a lo que hoy se conoce como la Agenda 2030, se considera imperativo buscar alternativas que permitan la continuidad en el suministro energético y que disminuyan la emisión de GEI. Esta meta se enmarca en el objetivo #7 el cual se enfoca en garantizar el acceso a una energía segura, sostenible y moderna, con la cual se permita el desarrollo en el sector de la agricultura, comunicaciones, educación, sanidad, transporte y en general, de la industria, y que, de manera consecuente, se apunte al logro del objetivo #10, cuyo enfoque trata de encontrar estrategias que permitan hacer frente al cambio climático (NACIONES UNIDAS, 2024).

De acuerdo con el concepto introducido por el científico Johan Rockström sobre los límites planetarios, la humanidad enfrenta un desafío con el cambio climático, considerando este como un límite ya transgredido con relación a las variables de emisiones de CO<sub>2</sub> (ppm) y el desequilibrio energético en la superficie de la tierra (medido en unidades de radiación por unidad de área - W/m<sup>2</sup>), esta última referida al equilibrio entre la energía que llega a la tierra y la que sale. El seguimiento de estas variables es sumamente importante ya que influyen de manera directa en la temperatura del planeta, cuyo aumento en la media global fue limitada con una barrera de seguridad de 2°C. Este límite fue establecido con el objetivo de minimizar el riesgo de desencadenar impactos en otros aspectos (límites regionales) tales como la circulación termohalina (circulación oceánica) y aumento en el nivel del mar (Rockström, Steffen, Noone, & Person, 2009).

Hoy día se estima que el sector del transporte es responsable de un cuarto de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo dada su dependencia a los combustibles fósiles, mientras que, el sector industrial es el responsable de un tercio de las emisiones, donde más del 70% de estas se asocian a los subsectores del hierro, acero, cemento, químicos, petroquímicos y aluminio, para los cuales se presentan desafíos en los que se ve representada toda la cadena de valor desde la producción, el consumo y la disposición (IRENA, 2024).

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), líder en proyectos de transición energética en el mundo, ha analizado las problemáticas presentadas no solo en términos ambientales sino también geopolíticos, encabezando estrategias en las que se posibilite la migración de la demanda energética mediante combustibles fósiles a producción a partir de energías renovables para ciertos sectores económicos, que permitan el logro de la meta límite del 1.5°C a 2°C máximos en la escala del calentamiento global establecida en el Acuerdo de París en el año 2015, y a su

---

vez lograr una reducción de casi 37 gigatoneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> anuales para el año 2050 (IRENA, 2022).

Una de las mayores opciones que se avizora actualmente para dar continuidad al suministro energético mundial corresponde a la aplicación de tecnologías basadas en el hidrógeno verde. Se espera que, para el 2050 su producción incremente hasta 400 millones de toneladas, sin embargo, llegar a esta meta implica enfrentarse a diferentes desafíos entre los que se tiene la creación de políticas que soporten el crecimiento de este tipo de energía, así como la creación de un ambiente propicio que permita la aceleración del proceso desplegándolo a una escala mayor. En 2017 solo Japón contaba con estrategias nacionales de hidrógeno, ahora, más de 30 países han desarrollado o se encuentran en proceso de preparación de estrategias basadas en tecnologías de generación de energía a partir de hidrógeno (IRENA, 2022)

Para la industria se plantean diferentes métodos de producción de hidrógeno verde, entre los cuales se tienen la producción a partir de biomasa (transformación de biomasa en gas por oxidación), hidrógeno biológico (procesos metabólicos mediante enzimas), y la producción a partir de agua (por electrólisis). En este último caso, para que el hidrógeno se pueda catalogar como “verde” se requiere que el aporte energético de la reacción de electrólisis tenga su origen en energías renovables tales como eólica y/o solar. Actualmente, como se planteó previamente, algunos países han tomado la iniciativa siendo el caso de Japón y Alemania, este último con un proyecto piloto liderado por Shell con electrolizadores de hasta 10MW de capacidad (de Simón-Martín, Cortés-Nava, Rodríguez-Parra, & Carro-de Lorenzo, 2021).

El hidrógeno verde es incluido en las agendas públicas de diferentes países, haciendo un enfoque en sectores productivos como el transporte y el consumo doméstico, dado que se garantiza una emisión nula de GEI utilizando como fuente primaria energías renovables como la energía eólica y solar. En lo que respecta a América Latina se tienen dos megaproyectos con sede en Chile y hay proyección para otros países en los que se apuesta al desarrollo de alternativas (Wyczykier, 2022).

Para este trabajo el planteamiento se hará desde una perspectiva de producción de hidrógeno 100% renovable, siendo el caso de la producción de hidrógeno *offshore*, a partir de energía eólica marina.

De acuerdo con el Consejo Global de Energía Eólica (GWEC, por sus siglas en inglés) en el año 2022 se tuvo un acumulado de capacidad energética proveniente de energía eólica *offshore* de 64.3 GW, siendo este el segundo año con mayor adición en este tipo de energía en la historia. Por otro lado, se prevé que la tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR, por sus siglas en inglés) de la energía eólica marina en los próximos cinco años sea del 32%. Con una tasa de crecimiento tan prometedora, es probable que para 2027 las nuevas instalaciones dupliquen sus niveles de 2023 (IRENA, 2023).

---

En la actualidad se encuentran varios proyectos en desarrollo principalmente en Países Bajos con los Proyectos NorthH2 y PosHYdon, cuyo principal objetivo es la producción de hidrógeno verde; en Noruega con el proyecto Hywind Tampen, el cual espera un suministro energético mediante energía *offshore* y que, de igual manera, podría proyectarse a futuras aplicaciones de hidrógeno; Reino Unido con el proyecto Dolphyn con plataformas flotantes para la producción de hidrógeno verde; Alemania y el Mar del Norte, con el proyecto AquaVentus cuyo objetivo también es la producción de hidrógeno mediante electrólisis; y así, se cuenta con diferentes proyectos sobre la mesa, los cuales aúnan esfuerzos en reducir las emisiones de CO2 con la producción de una energía más limpia.

Colombia, por su parte, con una capacidad instalada de energía hidroeléctrica de 67.25% en el año 2022, y siendo vulnerable a los escenarios hidrológicos que se presentan como el fenómeno de El Niño, que a su vez hace necesario se utilicen otro tipo de energías como respaldo, tales como las térmicas que cubren un 50% de la demanda energética, lleva a que las emisiones GEI sean mayores durante esta temporada climática (Planas & Cárdenas, 2024). Dadas estas circunstancias, Colombia se ha sumado al proceso de implementación de energías renovables con la inclusión de una hoja de ruta hacia la producción de hidrógeno, incluyendo la posibilidad de realizar estudios para cuantificar el potencial de producción de energía a partir de energía eólica *offshore* (Ministerio de Minas y Energía, 2021). De acuerdo con (Patiño, Velásquez, Ramírez, Betancur, & Montoya, 2023) las áreas para la instalación de proyectos *onshore* y *offshore* en Colombia son un poco limitadas, estimándose un total de 67.8G W (19 GW *onshore* y 48.8 GW *offshore*), sin embargo, es importante considerar factores ambientales, sociales y tecnológicos.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energías renovables, con sus siglas en inglés IRENA, respecto a la forma en la que se establecen los permisos para ejecutar proyectos de tal magnitud, se plantean dos modelos, uno conocido como el modelo centralizado y otro descentralizado, sin embargo, puede realizarse un tipo de fusión entre ambos, trabajando de manera híbrida (IRENA, 2023).

En el caso de **modelo centralizado**, se establece que el gobierno es el encargado de llevar a cabo todas las evaluaciones de impacto ambiental y social, así como los estudios de viabilidad del sitio (geográficos y geotécnicos), interactúa con las partes interesadas y otorga su consentimiento para el desarrollo de energía eólica marina, todo esto en el marco de un proceso de subasta competitivo. Un ejemplo son Los Países Bajos, donde el estado es quien entrega un proyecto eólico marino “empaquetado” a un desarrollador de energía eólica marina (IRENA, 2023).

El **modelo descentralizado** ofrece una mayor flexibilidad para gobierno y desarrolladores, donde estos últimos deberán obtener los diferentes permisos que viabilicen el proyecto en los aspectos ambientales, sociales y económicos. En el caso del gobierno, su función solo sería otorgar áreas para

---

desarrollo de proyectos. Un ejemplo que se presenta en este caso es del Reino Unido donde los desarrolladores son quienes deben cumplir los requisitos (IRENA, 2023).

En el **modelo híbrido** se permiten diferentes configuraciones, sin embargo, de manera general se puede decir que el gobierno se puede encargar de las fases iniciales, sin embargo, para aquellas en las que se requieran estudios especializados, sería el desarrollador privado quien los ejecute (IRENA, 2023).

En conclusión, el hidrógeno verde se ha convertido en una de las rutas para la transición energética en el mundo, sin embargo, su producción mediante la hidrólisis requiere energía que, con el objetivo de que se tenga un balance de emisiones cero, se debe partir de la instalación de parques eólicos (*offshore* y *onshore*) y paneles solares. No obstante, esta solución energética no está exenta de controversias y discusiones en torno a los impactos socioambientales, así como una dependencia aún incipiente a los recursos fósiles dados los componentes de sus materiales de construcción.

De igual manera, se tiene que, la demanda de agua para la obtención del hidrógeno mediante electrólisis es significativa. Se dice que para la fabricación de 1 tonelada de hidrógeno requiere en promedio 9 toneladas de agua, y esta debe encontrarse en estado “puro”, por lo que a su vez implica un tratamiento (se estima que, con 2 toneladas de agua contaminada se obtiene solo 1 tonelada de agua tratada). Con base en lo anterior, se estimarían entonces 18 toneladas de agua para la producción de 1 tonelada de hidrógeno (Slav, 2020). Por otro lado, el uso de agua salada también tiene implicaciones relacionadas con la posible desalinización y sus residuos, lo cual también tiene implicaciones ambientales (Wyczykier, 2023).

Según (Ramakrishnan, y otros, 2024), la producción de energía mediante plataformas de viento *offshore* tiene grandes ventajas dadas las velocidades que puede alcanzar el viento en este tipo de locaciones, siendo además más consistente que los proyectos *onshore* permitiendo una mayor producción energética. Ahora, comparando con lo expuesto antes frente a la demanda del recurso hídrico que requiere el proceso de electrólisis, se han considerado estudios para usar el agua del mar, sin embargo, se requieren múltiples procesos que le permitan tener compatibilidad con los electrolizadores, tales como la filtración para la remoción de microorganismos y sedimentos. De hecho, en varios de los procesos posibles, planteados por (Ramakrishnan, y otros, 2024) se requiere la adición de catalizadores que posibiliten el intercambio iónico para la electrólisis final que tendría como producto el hidrógeno. Esto, podría llevar a pensar desde el ámbito ambiental que, se debe tener un manejo adecuado de las aguas resultantes, las cuales podrían tener trazas de metales, altos niveles de pH, así como salmueras por la disociación de iones. Con base en lo anterior, se puede resaltar la importancia de evaluar los procesos que conlleva la producción

---

de hidrógeno, con el fin de identificar impactos imprevistos que permitan un adecuado manejo de los mismos.

Precisamente, la transición energética se convierte en un reto mundial para el que se debe buscar una solución. Si bien el camino trazado muestra el progreso en la meta de la transición energética, es imperativo se involucren las entidades gubernamentales en donde el marco político holístico, la inversión y la cooperación permitan no solo una reducción en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero y continuar en la ruta de 1.5°C o 2 °C, sino también la generación de empleo, economía inclusiva y un mundo más igualitario (IRENA, 2022), de igual manera, se requiere tomar acción de manera más contundente, ya que, actualmente, los altos costos de los combustibles fósiles dada la falta de alternativas, hace que la economía para las personas sea cada vez más difícil, sin contar con los riesgos a los que la humanidad se puede ver sometida en términos ambientales, logrando desequilibrios y resultados irreversibles en un corto periodo de tiempo. Es así como se vuelve necesaria una visión integral de los proyectos desde el inicio de la cadena de valor, con el fin de identificar las diferentes aristas, impactos y posibles manejos que potencialmente pueden llevarse a cabo, sin tener que condicionar la producción energética a una reducción en el desarrollo económico mundial. Cabe aclarar que, sí es imperativo crear estrategias en las que se incentive la optimización energética y la economía circular en los procesos productivos.

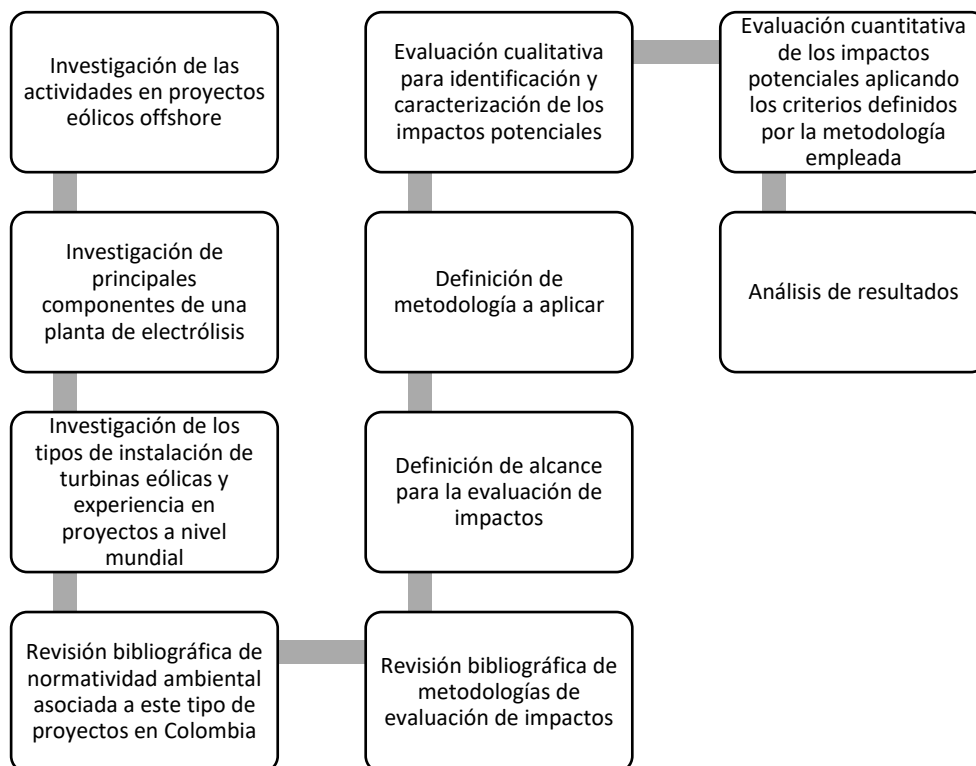
## 6. Metodología

En este trabajo se utilizarán metodologías mixtas y lógico-deductivas, que, desde el ámbito cualitativo se partiría de una revisión bibliográfica y estado del arte, así como revisión tecnológica y conceptualización básica que permitirán conocer el desarrollo de proyectos de este tipo en sus diferentes etapas, así como perspectivas y datos particulares que puedan aplicarse al caso de estudio planteado. De igual manera, se analizarán las características y elementos relevantes que involucran los proyectos de generación de energía de este tipo, que llevarían a la cuantificación de los impactos ambientales asociados. Posterior a este proceso, se realizaría un análisis de los resultados en el marco de los conceptos y consideraciones actuales frente al caso de estudio, posibilitando conclusiones al respecto (ver **Figura 1**).

Cabe aclarar que, la información utilizada para el desarrollo de este caso de estudio es secundaria, que de acuerdo con (Sabino, 1992) es indagación bibliográfica que puede incluir una amplia gama de fenómenos, ya que proceden de un contacto con la práctica y que han sido recogidos y procesados por otros investigadores. Se utilizarán en este caso, monografías, libros, revistas indexadas y diferentes artículos de investigación en bases de datos reconocidas, entre otros.

**Figura 1**

*Metodología a aplicar*



## 7. Resultados y análisis

### 7.1 Tipos de diseños para los parques eólicos

Para la identificación y evaluación de impactos ambientales en proyectos es indispensable efectuar un análisis de las diferentes etapas que comprenden el proceso de producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*, y de esta manera se podrán determinar las consideraciones a tener en cuenta para el proceso de evaluación de impactos bajo una metodología que pueda ser aplicable en proyectos localizados en Colombia.

Existen diferentes tecnologías y metodologías para abordar proyectos de energía eólica *offshore*, electrolizadores, tuberías de transporte, almacenamiento y otros elementos estructurales. Básicamente se tienen dos tipos de instalaciones (diferentes a los modelos mencionados en el numeral “5.2 Estado del arte” para emitir permisos para la ejecución de estos proyectos), la primera consiste en el **sistema centralizado** que consiste en un parque eólico y electrolizador ubicados costa afuera (**Figura 2**), incluyendo además la estructura de almacenamiento del hidrógeno en tierra, mientras que el **sistema descentralizado** incluye un electrolizador en tierra (**Figura 3**) junto al almacenamiento de hidrógeno (Ligeza, Łaciak, & Ligeza, 2023).

**Figura 2**

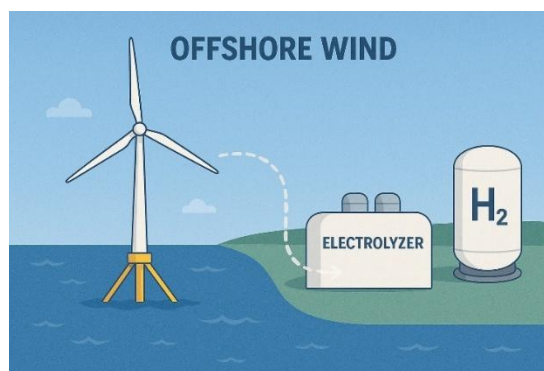
*Energía eólica y electrolizador offshore*



*Nota.* Imagen generada con IA

### Figura 3

#### Energía eólica *offshore* y electrolizador *onshore*



Nota. Imagen generada con IA

Por otro lado, es relevante considerar las diferentes alternativas tecnológicas disponibles para la instalación de parques eólicos *offshore*. En general, en zonas próximas a la costa y con baja profundidad se implementan estructuras con pilotes fijos, debido a su estabilidad y menor complejidad constructiva. En contraste, en áreas con mayores profundidades, donde las condiciones del lecho marino limitan este tipo de soluciones, se emplean plataformas flotantes que permiten la operación de aerogeneradores en mar abierto. En la **Tabla 2** se presenta el principal condicionante asociado a la profundidad de instalación en los diseños de parques eólicos *offshore*, la cual fue elaborada a partir de los datos recopilados en los documentos (WORLD BANK GROUP, 2022), (NORD-LOCK GROUP, s.f), así como del análisis de diversos proyectos en fase de planeación y construcción en Países Bajos, Noruega y Alemania, asimismo, en la **Figura 4** se muestra un esquema general de las configuraciones utilizadas en el diseño de turbinas para estos proyectos.

### Tabla 2

#### Condición de profundidad para elegir un diseño de turbinas eólicas *offshore*

Tipos de diseños en turbinas eólicas <i>offshore</i>	
< 50 m:	Se prefiere tecnología de turbinas fijas (bottom-fixed).
50–100 m:	Transición tecnológica. Algunos proyectos aún optan por turbinas fijas si el suelo marino lo permite.
>100 m:	Se vuelve económica y técnicamente necesario usar turbinas flotantes.

**Figura 4**

*Tipos de configuraciones en el diseño de turbinas para proyectos eólicos*



Nota. Fuente (NORD-LOCK GROUP, s.f)

Con el objetivo de consolidar las ideas previamente expuestas, en la **Tabla 3** se resumen los tipos de instalaciones posibles.

**Tabla 3**

*Tipos de configuración en proyectos de producción de hidrógeno a partir de energía eólica offshore*

Tipos de configuración	Tipo 1 Sistema centralizado	Tipo 2 Sistema descentralizado	Tipo 3 Sistema descentralizado	Tipo 4 Sistema centralizado
Turbinas eólicas	Pilotes fijos	Pilotes fijos	Flotantes	Flotantes
Electrolizador	Flotante	En tierra	En tierra	Flotante

## 7.2 Consideraciones

De acuerdo con lo expuesto en el numeral anterior, en el presente estudio se opta por analizar un sistema descentralizado, en línea con el objetivo principal de evaluar la aplicabilidad de este tipo de proyectos en el contexto colombiano. Si bien los electrolizadores en instalaciones *offshore* permiten prescindir de los cables de exportación eléctrica, esta configuración implica afrontar importantes desafíos técnicos, tales como el empleo de materiales altamente resistentes a la corrosión, elevados costos de mantenimiento y una logística compleja. Estas condiciones podrían representar limitaciones relevantes para su implementación en Colombia. En cambio, un enfoque descentralizado ofrece la posibilidad de aprovechar infraestructura existente, lo cual contribuye a reducir tanto los costos y como la complejidad técnica del proyecto.

---

Adicionalmente, se considerará el desarrollo de proyectos eólicos tanto con estructuras de pilotes fijos como flotantes, dado que esta elección depende, en gran medida, de las condiciones del recurso eólico, el cual puede ser más favorable en zonas de mayor profundidad. Según lo establecido en el documento '*Hoja de Ruta para el Despliegue de la Energía Eólica Costa Afuera en Colombia*', se han identificado seis (6) áreas compatibles con proyectos de fondo fijo y ocho (8) áreas potencialmente aptas para aerogeneradores flotantes (WORLD BANK GROUP, 2022), por lo que una evaluación de este tipo puede ser muy útil para el desarrollo de estos proyectos en el país.

Con base en lo anterior, y de acuerdo con lo descrito en la **Tabla 3** la evaluación de impactos se llevará a cabo considerando las configuraciones Tipo 2 y Tipo 3.

Es importante señalar que, dada la naturaleza *offshore* de estos proyectos, su localización puede coincidir con áreas ambientalmente sensibles, las cuales albergan ecosistemas estratégicos como manglares, humedales costeros, praderas de pastos marinos, arrecifes coralinos y zonas de reproducción o alimentación de especies marinas. Estos ecosistemas cumplen funciones ecológicas esenciales, tales como la protección costera, la captura de carbono, el mantenimiento de la biodiversidad y el soporte de actividades pesqueras para las comunidades locales. Por lo tanto, su presencia constituye un factor crítico en el análisis de impactos, dado que la intervención directa o indirecta en estas áreas podría generar afectaciones significativas tanto en la fase constructiva como operativa de los proyectos.

### **7.3 Metodología de evaluación elegida y procedimiento para identificación de impactos**

Tomando como premisa los análisis efectuados por parte de (Toro-Calderón, Martínez-Prada, & Arrieta-Loyo, 2013) y (Mijangos-Ricárdez & López-Luna, 2013) se analizaron diferentes métodos de evaluación de impactos y se consideraron criterios clave como la estructura metodológica, complejidad, aplicabilidad al entorno marino e incluso en elaboración de Estudios de Impacto Ambiental en Colombia, así como la integración de evaluaciones con técnicas cuantitativas y cualitativas, utilidad en la toma de decisiones y flexibilidad. En la **Tabla 4** se presenta un análisis de los criterios por metodología existente.

**Tabla 4**

*Criterios de evaluación de metodologías de EIA*

Método	Tipo de evaluación	Nivel de detalle	Cuantificación	Adecuación al entorno marino	Fortalezas específicas	Limitaciones principales	Utilidad para EIA de eólica offshore
Conesa	Mixto (cualitativo y cuantitativo)	Alto	Sí (escala de importancia)	Alta (si se ajusta por componente marino)	Permite ponderar impacto con múltiples atributos (intensidad, extensión, reversibilidad, etc.)	Requiere adaptación para componentes marinos y sinergias complejas	Muy alta
Matriz de Leopold	Cualitativo	Medio-Alto	Parcial (semi cuantitativa)	Media	Buena visualización de interacciones actividad vs. componente	Puede volverse muy extensa; no pondera impactos por relevancia	Media-alta
Batelle	Cuantitativo	Alto	Sí (ponderación y puntuación)	Media-baja (centrado en medio físico)	Permite integrar múltiples variables en un índice único	Puede invisibilizar impactos sociales o marinos si no se ajusta según necesidades. No toma en cuenta interacciones Causa - Efecto	Media
RAM – Ecopetrol	Cuantitativo (RAIR)	Muy alto	Sí (valoración de riesgo ambiental integral)	Alta (aplicable a proyectos industriales complejos)	Considera riesgo, vulnerabilidad y consecuencias	Complejidad alta; requiere gran cantidad de información base	Muy alta
Arboleda – EPM	Cuantitativo y comparativo	Alto	Sí	Alta	Integra enfoque técnico-operativo con perspectiva ambiental	Requiere adaptación al contexto marino y análisis sinérgico	Alta
Listas de chequeo	Cualitativo	Bajo	No	Baja	Simples y rápidas de aplicar	Superficiales; no permiten jerarquizar impactos ni sinergias	Baja
Diagramas de flujo	Cualitativo (visual)	Bajo	No	Baja	Claridad en secuencia de acciones e impactos	No permiten evaluar magnitud ni importancia	Baja-media
Redes de interacción	Cualitativo estructurado	Medio	No	Media	Muestra relaciones complejas y sinergias	Difícil cuantificación; puede volverse subjetiva	Media-alta

---

Según (Mijangos-Ricárdez & López-Luna, 2013) la metodología de Evaluación de Impactos Ambientales (EIA) debe ser interdisciplinaria, sistemática, con alto valor de organización y uniformidad, aplicables a cualquier fase del proyecto o actividad. Por lo anterior, se consideraron las siguientes condiciones para la selección de la metodología:

- Que sea aplicable al marco normativo actual colombiano, incluyendo precisiones que requieran los términos de referencia para presentación de Estudios de Impacto Ambiental para proyectos de tal envergadura.
- Una metodología que permita una visión integral que incluya la complejidad del proyecto, y la caracterización del medio físico-biótico susceptible a los impactos que se presenten.

La selección y aplicación de los métodos y herramientas utilizados para la identificación y valoración de impactos ambientales resulta determinante en el establecimiento de su nivel de importancia, constituyéndose a su vez en el punto de partida para la formulación de medidas de manejo orientadas a la prevención, mitigación, corrección y compensación de dichos impactos (Toro-Calderón, Martínez-Prada, & Arrieta-Loyo, 2013).

En el caso particular de Colombia, no existen metodologías oficiales para la evaluación de impactos ambientales. Por lo tanto, en este estudio se adopta como base los términos de referencia y lineamientos generales expedidos por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) en el año 2024 para proyectos de generación de energía eólica costa afuera (MINAMBIENTE, ANLA, 2024).

En concordancia con las etapas propias de la elaboración de un EIA, es fundamental realizar un análisis cualitativo y cuantitativo, el primero permite identificar los componentes y elementos ambientales susceptibles de ser afectados durante la ejecución de las diferentes actividades del proyecto, facilitando la visualización de las posibles interacciones entre ellos, por su parte el segundo (análisis cuantitativo) se orienta a establecer la magnitud de los impactos mediante la aplicación de criterios de valoración previamente definidos.

Considerando un proyecto de esta naturaleza es previsible que se desarrollen actividades tanto en áreas costeras como continentales, involucrando el aprovechamiento de recursos naturales -tales como agua y vegetación- para la adecuación de las zonas de construcción, así como procesos asociados al levantamiento de infraestructuras y disposición de materiales. Dada su complejidad técnica, su interacción directa con ecosistemas marinos sensibles y su potencial de generar impactos acumulativos y sinérgicos a diferentes escalas espaciales y temporales, la metodología propuesta por (Conesa, 2009) se destaca como la herramienta más integral y robusta para la evaluación ambiental.

Una de las principales fortalezas de esta metodología es su estructura multicriterio, que permite valorar cada impacto con base en atributos clave, reconociendo no solo la diversidad de los impactos potenciales, sino que ofrece un marco sistemático y lógico para jerarquizarlos en función de su importancia relativa, además, permite reconocer las interrelaciones entre los componentes ambientales y etapas que conforman la construcción y operación de los proyectos. Finalmente, se destaca su alta aplicabilidad en la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental en Colombia, los cuales son el paso más importante para la obtención de Licencias Ambientales en la construcción de proyectos de esta envergadura.

La aplicación de la metodología establecida por (Conesa, 2009) se inicia con la descripción de un entorno hipotético representativo de las condiciones en las que potencialmente podría desarrollarse el proyecto, similar a un ecosistema típico del contexto colombiano. Esta caracterización se fundamenta en la evaluación de zonas con potencial eólico costa afuera contenida en el documento del (WORLD BANK GROUP, 2022), considerando, además, ciertas limitaciones técnicas, ambientales y sociales identificadas allí (ver **Tabla 6**). Adicionalmente, se incorpora información de fuentes complementarias como (NOAA, s.f.) y (Malagón-Castro, 2003) en relación con la geomorfología y geotecnia en el suelo marino, y de (García-Hoyos, Franco-Herrera, Ramírez-Barón, & López-Cerón, 2010) respecto a la dinámica costera y oceánica.

En este contexto, se consideran también las características técnicas de dos tipos de configuraciones tecnológicas comúnmente implementadas a nivel internacional (parques eólicos con pilotes fijos y con plataformas flotantes), las cuales se presentan en la **Tabla 5** discriminadas por proyecto y país desarrollador.

Posteriormente, en la **Tabla 7** se presenta la descripción general de las actividades que conformarían las etapas de construcción y operación en las cuales se enfocará este análisis.

**Tabla 5**

*Características técnicas de proyectos eólicos offshore desarrollados a nivel internacional*

Característica	Hywind Tampen	Hywind Scotland	Norther
<b>País</b>	Noruega	Escocia	Países bajos
<b>Tipo de turbinas</b>	Flotantes	Flotantes	Con pilotes fijos
<b>Número de turbinas</b>	11	5	44
<b>Capacidad de generación</b>	95 MW	30 MW	370 MW <sup>1</sup>
<b>Distancia entre turbinas</b>	2 km apróx. <sup>2</sup>	2.5 km apróx. <sup>2</sup>	Sin Información
<b>Extensión</b>	16 a 22.5 km <sup>2</sup> apróx. <sup>3</sup>	15 km <sup>2</sup>	44 km <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tomado de (NORTHER, 2025)

<sup>2</sup> Dato deducido posterior a análisis de las siguientes fuentes (EQUINOR, 2025), (EQUINOR, 2019), (Pradillo, 2018) y (Cruz, 2022)

<sup>3</sup> Este dato depende del estudio de impacto ambiental que pudo reducir la superficie ocupada por el proyecto (EQUINOR, 2019)

**Tabla 6**

*Descripción de condiciones ambientales de la zona de influencia sin proyecto*

DIMENSIÓN	COMPONENTES	ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN
MEDIO FÍSICO	GEOLOGÍA	Geomorfología	El suelo marino se caracteriza por una placa continental poco profunda, con pendiente suave, fondo arenoso y la presencia de rocas en algunas áreas, así como de dunas costeras. Las profundidades de la placa oscilan entre los 120 y 150 metros.
		Geotecnia	Se trata de un suelo cohesivo con alta proporción de material arcilloso, arenas finas y limos; sus sedimentos son blandos y poco consolidados.
		Dinámica oceánica, costera y navegabilidad	La zona se encuentra bajo la influencia de la convergencia intertropical y del movimiento meridional (vientos alisios), produciendo corrientes marinas superficiales de acuerdo con la estación y un régimen de mareas.  Por otro lado, el área cuenta con actividad de tráfico marítimo, por lo que es importante considerar este factor.
	AGUA	Calidad del agua	El agua marina se encuentra con un buen índice de calidad, con un pH de 7.5 y valores superiores a los 5mg/L de oxígeno disuelto.  Las fuentes que pueden ser objeto de uso en la zona costera son aptas para consumo humano con tratamientos primarios y secundarios.
		Oferta hídrica	Se espera utilizar el agua de mar como materia prima para el electrolizador, utilizando primero un proceso de desalinización y purificación, sin embargo, es posible que se demande agua para los campamentos y frentes de trabajo para el personal de las obras.
		AIRE	Calidad del aire
PAISAJE	Calidad visual	En el área se tienen paisajes terrestres y marinos con un alto valor estético y turístico.	
MEDIO BIÓTICO	ECOSISTEMA TERRESTRE	Flora	El área costera presenta cobertura vegetal nativa, con especies de vegetación halófila, arbustiva y herbácea propias de ecosistemas secos costeros. No se presentan especies endémicas, ni amenazadas, sin embargo, es imprescindible considerar ecosistemas como los manglares o humedales.
		Fauna terrestre	La zona cuenta con fauna típica de las zonas costeras, donde se incluyen aves (locales y migratorias), reptiles y mamíferos pequeños.
	ECOSISTEMA ACUÁTICO	Ecosistemas acuáticos	Los ecosistemas acuáticos cuentan con alta diversidad, entre ella se tiene la hidrobiota con individuos bentónicos, ícticos, fito y zooplanctónicos.  Es posible que en los suelos se tengan ecosistemas de alta fragilidad tales como arrecifes coralinos, manglares, humedales y playas.

**Tabla 7**

*Descripción general de las actividades del proyecto*

Actividad	Parques eólicos con pilotes fijos	Parques eólicos con plataformas flotantes	Descripción
<b>1. Etapa de construcción</b>			
<b>1.1 Construcción del parque eólico <i>offshore</i></b>			
- Adecuación de campamentos	- Descapote y excavaciones para acondicionamiento de la zona de construcción o instalación de campamentos		Considerando que las zonas en las que se desarrollará el proyecto son distantes, es probable que se requiera el montaje y operación de instalaciones temporales para el alojamiento y alimentación del personal.
- Preparación del sitio de instalación de aerogeneradores y sistemas auxiliares	- Estudios geotécnicos y batimetrías	- Elaboración de batimetrías y estudio de métodos de anclaje para el suelo del área elegida	Esta actividad consiste en realizar actividades iniciales tales como la caracterización, adecuación y habilitación de los sitios marinos y terrestres donde se instalarán cada uno de los componentes del proyecto.
	- Acondicionamiento del lecho marino (dragado y limpieza del lecho marino para instalación de pilotes)	- Instalación de los puntos de anclaje o sistemas de fondeo	En tierra implicará actividades de remoción de vegetación, descapote y la realización de excavaciones superficiales. Por otro lado, en el lecho marino se deberá hacer remoción y limpieza.
	- Acondicionamiento del terreno donde se construirán el electrolizador (planta) y la subestación <i>onshore</i>		
- Instalación del parque eólico <i>offshore</i>	- Transporte marítimo e instalación de cimentaciones en el lecho marino	- Remolque de plataformas flotantes	Esta actividad consiste en realizar el montaje físico de las turbinas <i>offshore</i> en su ubicación definitiva. Es importante considerar que, de acuerdo con el tipo de sistema a instalar se podrán utilizar diferentes metodologías tales como <i>jetting</i> , <i>plugging</i> o dragado.
	- Montaje de estructura, góndolas y torres aerogeneradoras	- Anclaje de plataformas	

Actividad	Parques eólicos con pilotes fijos	Parques eólicos con plataformas flotantes	Descripción
- <b>Infraestructura submarina (tendido cableado)</b>	- Tendido de cableado hasta subestación intermedia o una costera <i>onshore</i>	- Tendido de cableado flexible e instalación de cables suspendidos de la plataforma al fondo marino, las cuales darán estabilidad a la plataforma	En esta actividad también se podrían utilizar las metodologías mencionadas previamente para enterrar el cableado. Para ello, de manera anticipada se requiere una inspección geofísica y geotécnica del fondo marino, esto podría generar alertas en caso de presencia de rocas que requieran ser removidas y efectuar así la limpieza del lecho.
- <b>Subestación de transformación <i>onshore</i> y sistema eléctrico</b>	- Construcción de subestación eléctrica - Instalación de transformadores y sistemas de control - Interconexión con la planta de electrólisis		Esta actividad se desarrolla en tierra e implica el montaje de la infraestructura eléctrica, donde se incluye transformadores, celdas de alta tensión y líneas de distribución para el electrolizador.
<b>1.2 Construcción de planta de electrólisis (<i>onshore</i>)</b>			
- <b>Construcción y montaje</b>	- Obras civiles para cimentaciones y plataformas - Montaje de electrolizadores - Sistemas de agua purificada, refrigeración, compresión y seguridad		Para esta fase se ejecutarán obras civiles y montaje de la plataforma que tendrá la planta de electrólisis.
- <b>Sistema de almacenamiento, logística y transporte del Hidrógeno verde</b>	- Instalación de tanques de almacenamiento - Construcción de estaciones de carga - Sistemas de seguridad y transporte		En esta fase se espera la instalación de tanques de almacenamiento, tránsito de vehículos y maquinaria.
<b>2. Etapa de operación</b>			
- <b>Mantenimiento</b>	- Mantenimiento de vías de acceso y estructuras que componen el sistema completo de generación		El mantenimiento <i>offshore</i> requerirá acceso mediante barcos y plataformas elevadoras. Posiblemente se requieran embarcaciones especializadas.
- <b>Operación del proyecto</b>	- Transmisión y distribución de energía - Almacenamiento, distribución y mantenimiento de tanques de almacenamiento		De manera inicial se realizarán pruebas eléctricas, eficiencia de producción, entre otros.  Es importante considerar en este caso el

Actividad	Parques eólicos con pilotes fijos	Parques eólicos con plataformas flotantes	Descripción
		- Monitoreo y control	transporte terrestre y vía marítima para la puesta en marcha del sistema de generación.

Una vez identificadas las condiciones iniciales del entorno en ausencia del proyecto, así como las actividades que conforman su desarrollo, se procedió a la elaboración de una matriz de interacción que relaciona cada actividad con los componentes y elementos ambientales susceptibles a ser afectados (

**Tabla 8**). Esta herramienta facilita la identificación preliminar de los impactos potenciales, los cuales se presentan en la **Tabla 9** junto con sus definiciones.

Cabe señalar que, los impactos considerados en este análisis fueron seleccionados a partir del listado de impactos ambientales específicos, establecido por el Ministerio de Ambiente y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), el cual sirve como referencia para la identificación y clasificación de los impactos en el marco normativo para la evaluación ambiental de proyectos en Colombia (MINAMBIENTE, 2021).

**Tabla 8**

*Matriz de evaluación de actividades y elementos*

DIMENSIÓN	MEDIO FÍSICO						MEDIO BIÓTICO			
	GEOLOGÍA		AGUA			AIRE	PAISAJE	ECOSISTEMA TERRESTRE	ECOSISTEMA ACUÁTICO	
COMPONENTES	Geomorfología	Geotecnia	Dinámica oceánica, costera y navegabilidad	Calidad del agua	Oferta hídrica	Calidad del aire	Calidad visual	Flora	Fauna terrestre	Ecosistemas acuáticos
ELEMENTOS										
<b>1. Etapa de construcción</b>										
<b>1.1 Construcción del parque eólico <i>offshore</i></b>										
- Adecuación de campamentos		X			X			X	X	
- Preparación del sitio de instalación de aerogeneradores y sistemas auxiliares	X	X	X	X		X	X		X	X
- Instalación del parque eólico <i>offshore</i>	X	X	X	X		X	X		X	X
- Infraestructura submarina (tendido cableado)	X		X	X		X				X
- Subestación de transformación <i>onshore</i> y sistema eléctrico		X			X	X	X	X	X	
<b>1.2 Construcción de planta de electrólisis (<i>onshore</i>)</b>										
- Construcción y montaje		X		X	X	X	X	X	X	
- Sistema de almacenamiento, logística y transporte del Hidrógeno verde						X			X	
<b>2. Etapa de operación</b>										
- Mantenimiento			X	X	X					

- Operación del proyecto

X X X

**Tabla 9**

*Relación de elementos e impactos - Descripción de impactos*

DIMENSIÓN	COMPONENTES	ELEMENTOS	IMPACTO	DESCRIPCIÓN
MEDIO FÍSICO	GEOLOGÍA	Geomorfología	<b>Alteración de las condiciones geológicas y geoforma del terreno y/o lecho marino</b>	En este caso el desarrollo de actividades de intervención directa sobre el lecho marino, tales como dragados, hincado de pilotes, anclajes e instalación de cables puede modificar las características físicas, estructurales o morfológicas del lecho.
			<b>Cambio en los procesos de erosión costera</b>	Hace referencia a la modificación en la dinámica natural, transporte o acumulación de sedimentos en zonas costeras a causa de posibles cambios en el oleaje o corrientes.
		Geotecnia	<b>Cambios en las características geomecánicas de estabilidad</b>	Con las actividades constructivas tales como la instalación de pilotes, anclajes o cableado se pueden alterar las propiedades físicas y mecánicas del lecho marino, asimismo, se puede presentar en las actividades constructivas <i>onshore</i> modificando cohesión, densidad, porosidad o capacidad de carga del suelo.
	AGUA	Dinámica oceánica, costera y navegabilidad		<b>Cambio en los patrones de oleaje a nivel local</b>
			<b>Cambio en el patrón sedimentológico</b>	Cambio en el patrón sedimentológico que modifica el perfil de playa por procesos de erosión y acumulación.
		Calidad del agua	<b>Cambios en las características de la calidad fisicoquímica, hidrobiológica, microbiológica del recurso hídrico</b>	A razón de las diferentes actividades este impacto hace referencia a la alteración de los parámetros de calidad del agua. Entre las actividades se podrían tener resuspensión de sedimentos marinos, vertimientos que podrían afectar la biodiversidad.

DIMENSIÓN	COMPONENTES	ELEMENTOS	IMPACTO	DESCRIPCIÓN
		Oferta hídrica	Cambio en la oferta hídrica	En la construcción de este tipo de proyectos normalmente se requiere captación de agua para el personal, así como de algunos sistemas de refrigeración, y, principalmente para el proceso de electrólisis, la cual, de acuerdo con lo informado por (Slav, 2020) se estimarían 18 Ton de agua para producir 1 Ton de hidrógeno.
	AIRE	Calidad del aire	Cambios en la calidad del aire	Como resultado de las actividades propias del desarrollo del proyecto en las que se incluye la operación de maquinaria diesel, transporte marítimo y terrestre, así como generadores de energía es posible que se alteren las condiciones atmosféricas locales dada la emisión de contaminantes gaseosos, material particulado y compuestos orgánicos volátiles (COV).
			Cambios en los niveles de presión sonora	Este impacto se puede dar en el medio marino y en el medio terrestre, donde los niveles de presión sonora podrían ser puntuales, continuos o intermitentes y pueden ser consecuencia de la fase constructiva del proyecto tanto en el océano como en la costa.
	PAISAJE	Calidad visual	Cambio en la calidad visual del paisaje	Se presenta un impacto visual de acuerdo con la instalación de las estructuras que conforman el proyecto.
		Flora	Disminución de la cobertura vegetal	Este impacto se genera principalmente en la zona costera con las actividades de construcción de la subestación y planta de electrólisis, ya que para ello se requiere el aprovechamiento de vegetación, limpieza y excavación de áreas.
MEDIO BIÓTICO	ECOSISTEMA TERRESTRE	Fauna terrestre	Fragmentación de ecosistemas terrestres	Con la construcción de la infraestructura costera, así como de las vías de acceso al proyecto se pueden presentar interferencias en la conectividad ecosistémica, desplazamiento de especies y funcionamiento de los hábitats, tales como migración o reproducción.  De igual manera, los aerogeneradores pueden generar impactos sobre las rutas migratorias de aves.

DIMENSIÓN	COMPONENTES	ELEMENTOS	IMPACTO	DESCRIPCIÓN
			<b>Fragmentación de ecosistemas acuáticos</b>	<p>Por un lado, la construcción de aerogeneradores con pilotes fijos puede crear barreras físicas o acústicas para algunas especies marinas; por otro lado, los aerogeneradores con estructuras flotantes pueden interferir con rutas migratorias de mamíferos marinos o tortugas.</p> <p>El parque eólico normalmente cuenta con zonas de navegación restringida y esto puede limitar el corredor biológico de las especies acuáticas.</p>
	<b>ECOSISTEMA ACUÁTICO</b>	Ecosistemas acuáticos	<b>Cambio en los ecosistemas acuáticos, marino-costeros y/o continentales</b>	<p>El tendido de cables submarinos, así como la adecuación del terreno sobre el cual se establecerá la infraestructura puede generar un cambio en las comunidades de hidrobiota, es decir puede alterar la abundancia y estructura del biotopo del área en la que se localizará el parque eólico. De igual manera, se pueden presentar afectaciones sobre arrecifes de coral. Lo anterior a razón de la alteración de la calidad del agua tales como la turbiedad (sólidos suspendidos), ruido, temperatura, entre otros.</p>

Con la información primaria recopilada, asociada a la evaluación cualitativa de los impactos, fue posible construir una matriz de interacción que relaciona los impactos potenciales identificados – catorce (14) en total- con las distintas actividades previstas durante las fases de construcción y operación del proyecto (**Tabla 10**). Esta matriz constituye la base para desarrollar la evaluación cuantitativa de cada uno de los impactos, permitiendo determinar su magnitud, importancia y priorización.

**Tabla 10**

*Matriz de evaluación de actividades e impactos*

DIMENSIÓN	MEDIO FÍSICO									MEDIO BIÓTICO				
	Alteración de las condiciones geológicas y geoforma del terreno y/o lecho marino	Cambio en los procesos de erosión costera	Cambios en las características geomecánicas de estabilidad	Cambio en los patrones de oleaje a nivel local	Cambio en el patrón sedimentológico	Cambios en las características de la calidad fisicoquímica, hidrobiológica, microbiológica del recurso hídrico	Cambio en la oferta hídrica	Cambios en la calidad del aire	Cambios en los niveles de presión sonora	Cambio en la calidad visual del paisaje	Disminución de la cobertura vegetal	Fragmentación de ecosistemas terrestres	Fragmentación de ecosistemas acuáticos	Cambio en los ecosistemas acuáticos, marino-costeros y/o continentales
<b>1. Etapa de construcción</b>														
<b>1.1 Construcción del parque eólico <i>offshore</i></b>														
- Adecuación de campamentos			X				X			X	X			
- Preparación del sitio de instalación de aerogeneradores y sistemas auxiliares	X	X	X		X	X		X	X	X			X	X
- Instalación del parque eólico <i>offshore</i>	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X
- Infraestructura submarina (tendido cableado)	X		X			X			X				X	X
- Subestación de transformación <i>onshore</i> y sistema eléctrico			X					X	X	X	X	X		
<b>1.2 Construcción de planta de electrólisis (<i>onshore</i>)</b>														
- Construcción y montaje			X				X	X	X	X	X	X		
- Sistema de almacenamiento, logística y transporte del Hidrógeno verde			X				X	X	X	X	X	X		
<b>2. Etapa de operación</b>														
- Mantenimiento						X	X	X						
- Operación del proyecto						X	X	X						

De acuerdo con la metodología propuesta por (Conesa, 2009), en la

**Tabla 11** se establecen los criterios empleados para la evaluación cuantitativa de los impactos, y en la **Tabla 12** su clasificación.

**Tabla 11**

*Descripción de criterios de evaluación*

CRITERIO	CALIFICACIÓN	VALOR
Naturaleza	Impacto beneficioso	+
	Impacto perjudicial	-
	Previsible pero difícil de cualificar o sin estudios específicos	x
Intensidad (IN) (Grado de destrucción)	Baja	1
	Media	2
	Alta	4
	Muy alta	8
	Total	12
Extensión (EX) (Área de influencia)	Puntual	1
	Parcial	2
	Extenso	4
	Total	8
	Crítico	(+4)
Momento (MO) (Plazo de manifestación)	Largo plazo (>10 años)	1
	Medio plazo (1-10 años)	2
	Corto plazo (<1año)	3
	Inmediato	4
	Crítico	(+4)
Persistencia (PE) (Permanencia del efecto)	Fugaz (mín)	1
	Momentáneo (<1año)	1
	Temporal (1-10 años)	2
	Persistente (11-15 años)	3
	Permanente (>15 años)	4
Reversibilidad (RV) (Reconstrucción por medios naturales)	Corto plazo (<1año)	1
	Medio plazo (1-10 años)	2
	Largo plazo (11-15 años)	3
	Irreversible (>15 años)	4
	Recuperabilidad (MC) (Reconstrucción por medios humanos)	Recuperable de manera inmediata
Recuperable a corto plazo		2
Recuperable a medio plazo		3
Recuperable a largo plazo		4
Mitigable, sustituible y compensable		4
Sinergia (SI) (Potenciación de la manifestación)	Irrecuperable	8
	Simple	1
	Sinergismo moderado	2
Acumulación (AC) (Incremento progresivo)	Muy sinérgico	4
	Simple	1
Efecto (EF) (Relación causa - efecto)	Acumulativo	4
	Indirecto	1
Periodicidad (PR) (Regularidad de la manifestación)	Directo	4
	Irregular	1
	Periódico	2
	Continuo	4

CRITERIO	CALIFICACIÓN	VALOR
<b>IMPORTANCIA (I)</b> (Grado de manifestación cualitativa del efecto)	$I = \pm [3IN + 2EX + MO + PE + RV + MC + SI + AC + EF + PR]$	

**Tabla 12**

*Valoración de la importancia del impacto*

IMPORTANCIA		
13	24	Irrelevante
25	50	Moderado
51	75	Severo
76	100	Crítico

#### 7.4 Resultados de la evaluación de impactos

A continuación, se presentan las fichas de evaluación correspondientes a cada uno de los impactos identificados, elaboradas tras la aplicación de los criterios de evaluación previamente descritos.

Como herramienta de consulta, se incluye la **Tabla 13** de navegación que permite visualizar y acceder de forma práctica a cada una de las fichas de evaluación.

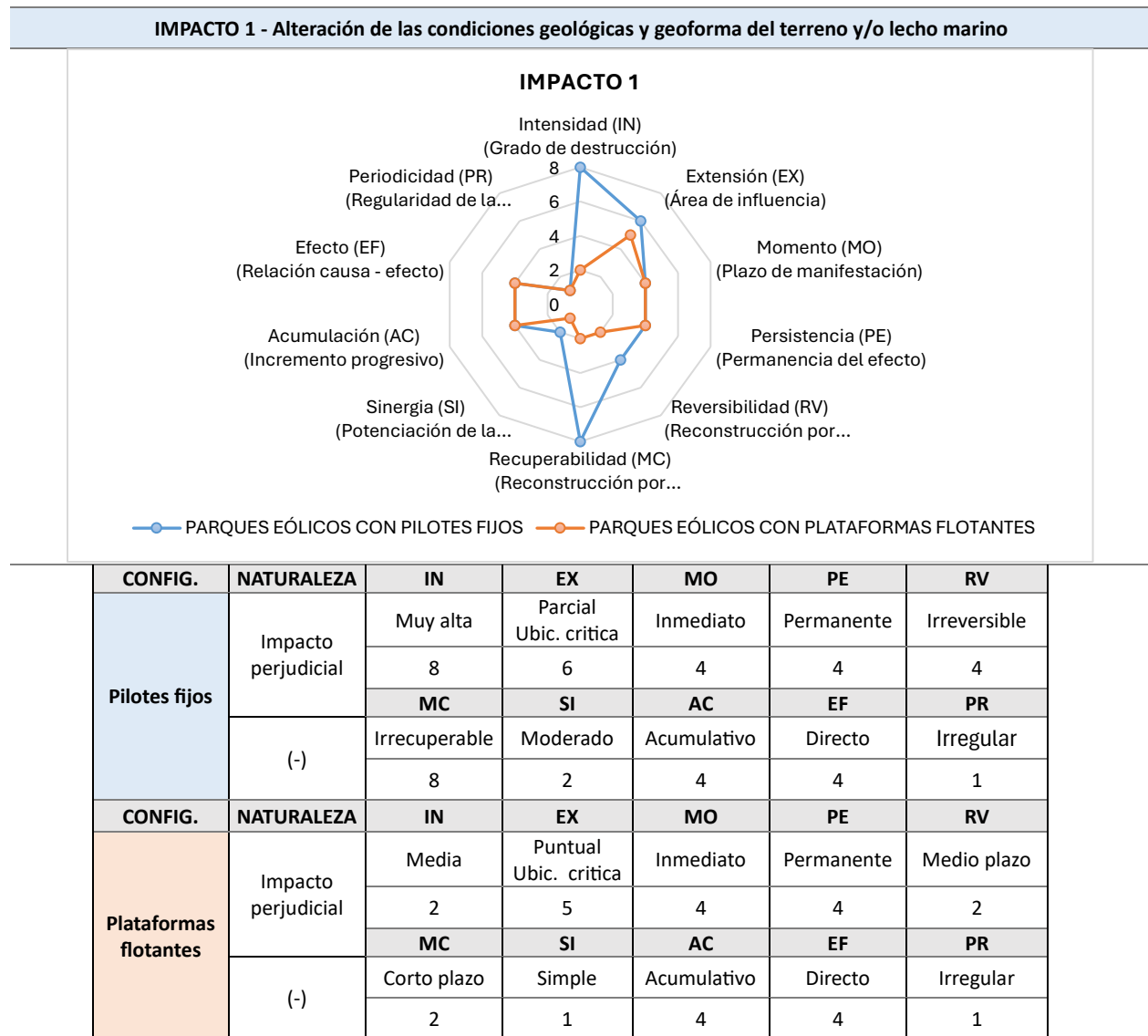
**Tabla 13**

*Navegación de fichas de evaluación*

ID	IMPACTO	TABLA
IMPACTO 1	Alteración de las condiciones geológicas y geoforma del terreno y/o lecho marino	<b>Tabla 14</b>
IMPACTO 2	Cambio en los procesos de erosión costera	<b>Tabla 15</b>
IMPACTO 3	Cambios en las características geomecánicas de estabilidad	<b>Tabla 16</b>
IMPACTO 4	Cambio en los patrones de oleaje a nivel local	<b>Tabla 17</b>
IMPACTO 5	Cambio en el patrón sedimentológico	<b>Tabla 18</b>
IMPACTO 6	Cambios en las características de la calidad fisicoquímica, hidrobiológica, microbiológica del recurso hídrico	<b>Tabla 19</b>
IMPACTO 7	Cambio en la oferta hídrica	<b>Tabla 20</b>
IMPACTO 8	Cambios en la calidad del aire	<b>Tabla 21</b>
IMPACTO 9	Cambios en los niveles de presión sonora	<b>Tabla 22</b>
IMPACTO 10	Cambio en la calidad visual del paisaje	<b>Tabla 23</b>
IMPACTO 11	Disminución de la cobertura vegetal	<b>Tabla 24</b>
IMPACTO 12	Fragmentación de ecosistemas terrestres	<b>Tabla 25</b>
IMPACTO 13	Fragmentación de ecosistemas acuáticos	<b>Tabla 26</b>
IMPACTO 14	Cambio en los ecosistemas acuáticos, marino-costeros y/o continentales	<b>Tabla 27</b>
<b>CÁLCULO DE IMPORTANCIA DE CADA IMPACTO</b>	N.A.	<b>Tabla 28</b>

**Tabla 14**

*Evaluación de IMPACTO 1*



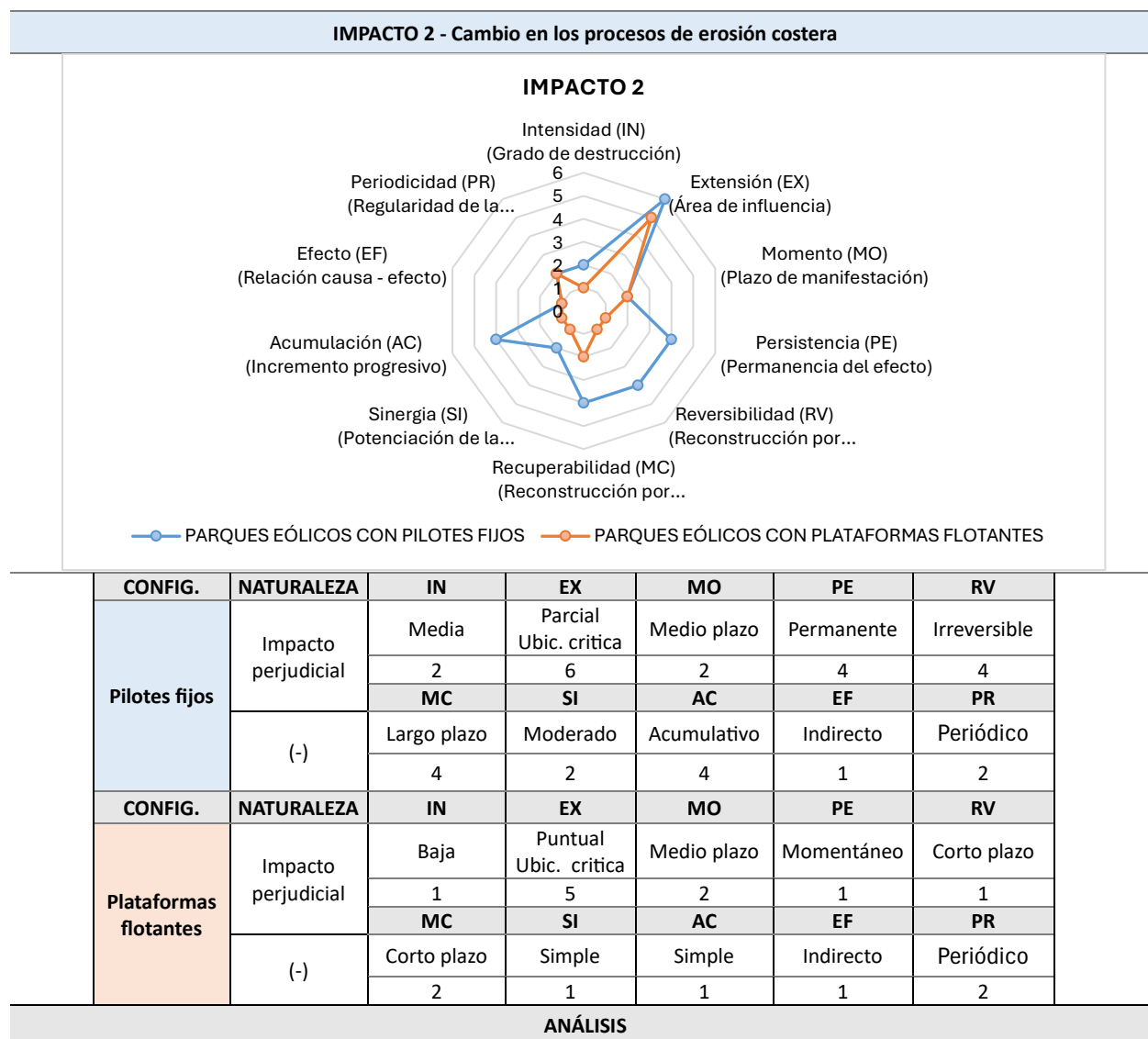
**ANÁLISIS**

**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** Se considera una intensidad alta ya que la instalación de pilotes fijos implica una alteración en el fondo marino, modificando la geoforma en cada punto de la fundación y sus alrededores. Si bien cada generador instalado afecta de manera puntual ciertas áreas, el parque eólico en su totalidad tiene una extensión media, y se considera un "Impacto de ubicación crítica" dado que puede afectar de manera indirecta ecosistemas frágiles, así como áreas de conectividad ecológica, de esta manera se incrementa la calificación en 4 puntos de acuerdo con Conesa. Respecto a los criterios de reversibilidad y permanencia se toma en cuenta la vida útil del proyecto, que supera los 15 años.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** En este caso la extensión es menor, dado que se centra únicamente en los puntos de anclaje, y no hay afectación extensa en el lecho marino. Considerando un lecho con sedimentos blandos es posible la reversibilidad del impacto en el mediano plazo, además, el área afectada es puntual en los sitios de anclaje. Contrario a los pilotes fijos, al tener un área de impacto menor se podría recuperar en el mediano plazo, pudiendo quedar algunas secuelas, y si hay un desmonte completo del proyecto, es posible que se recupere mucho más rápido. Adicionalmente, se toma una sinergia simple ya que el impacto sobre el lecho es menor, pero durante su instalación puede potenciar otros impactos como la erosión.

**Tabla 15**

*Evaluación de IMPACTO 2*



**ANÁLISIS**

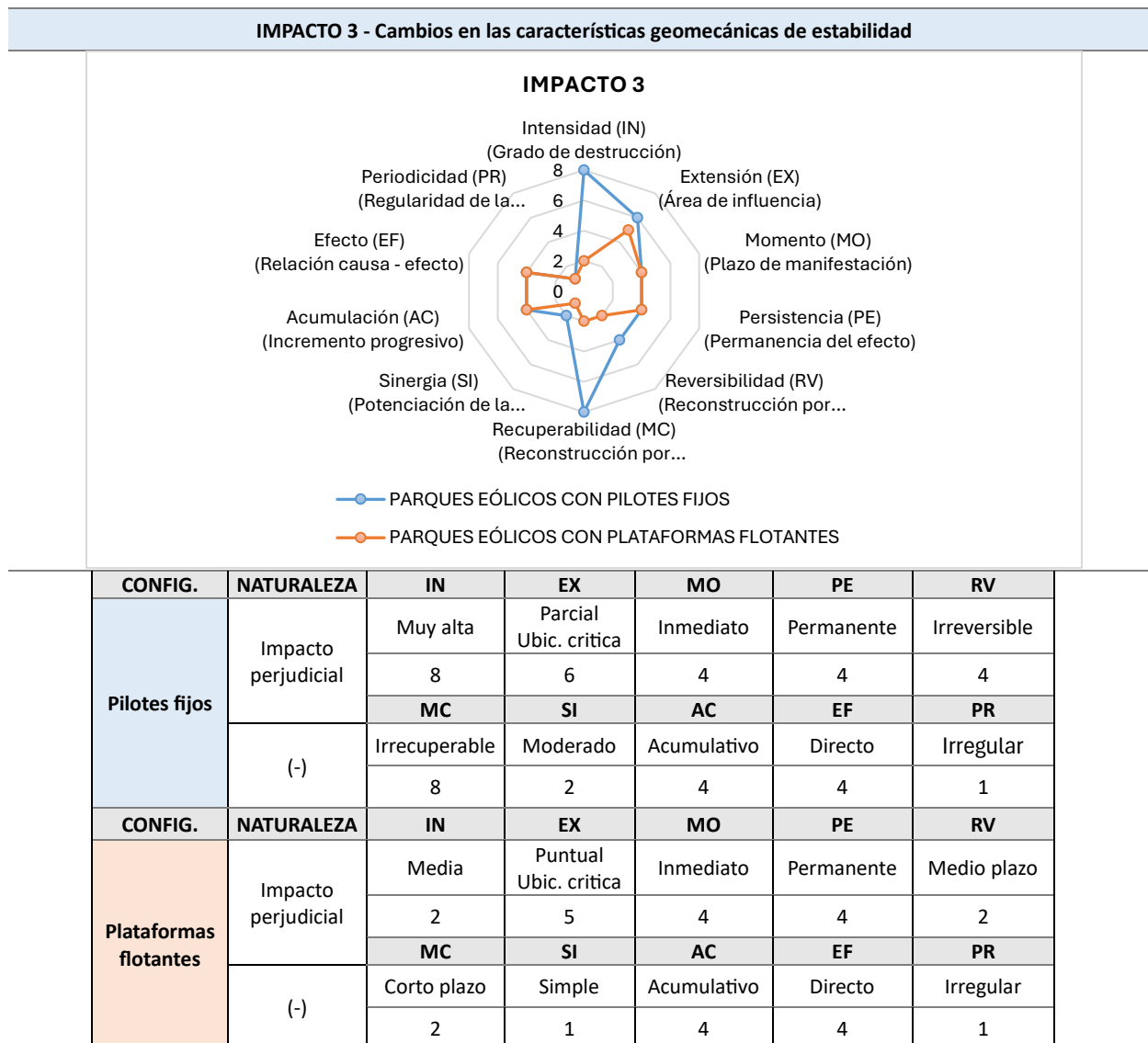
**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** Para este impacto, una estructura con pilotes fijos puede afectar el patrón hidrodinámico local, por esta razón se determinó una intensidad media, de igual manera la extensión se considera parcial, por generar impactos en zonas específicas de la costa. Respecto al momento (MO) es importante tener en cuenta que los procesos de erosión costera no se manifiestan de forma inmediata, por lo que se espera que entre 1 y 10 años se manifieste el impacto. Por otro lado, se considera que la erosión es un efecto indirecto del impacto sobre las condiciones geológicas y geoforma durante la instalación de los pilotes, y se considera irreversible por causas naturales, sin embargo, si se implementan ciertas medidas es posible recuperar a largo plazo.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** Las plataformas flotantes generan una alteración mínima sobre los procesos de erosión costera, y de presentarse la extensión sería muy puntual y tardaría mucho tiempo en manifestarse, dándose, además, una persistencia momentánea, ya que el impacto es débil y es posible que su reversibilidad sea a corto plazo.

En general, para este impacto es importante considerar que, los procesos de erosión son cíclicos y también dependen de la variación climática y estacional, así se espera una manifestación periódica, independiente de cuál sea la configuración determinada para el desarrollo del proyecto.

**Tabla 16**

*Evaluación de IMPACTO 3*



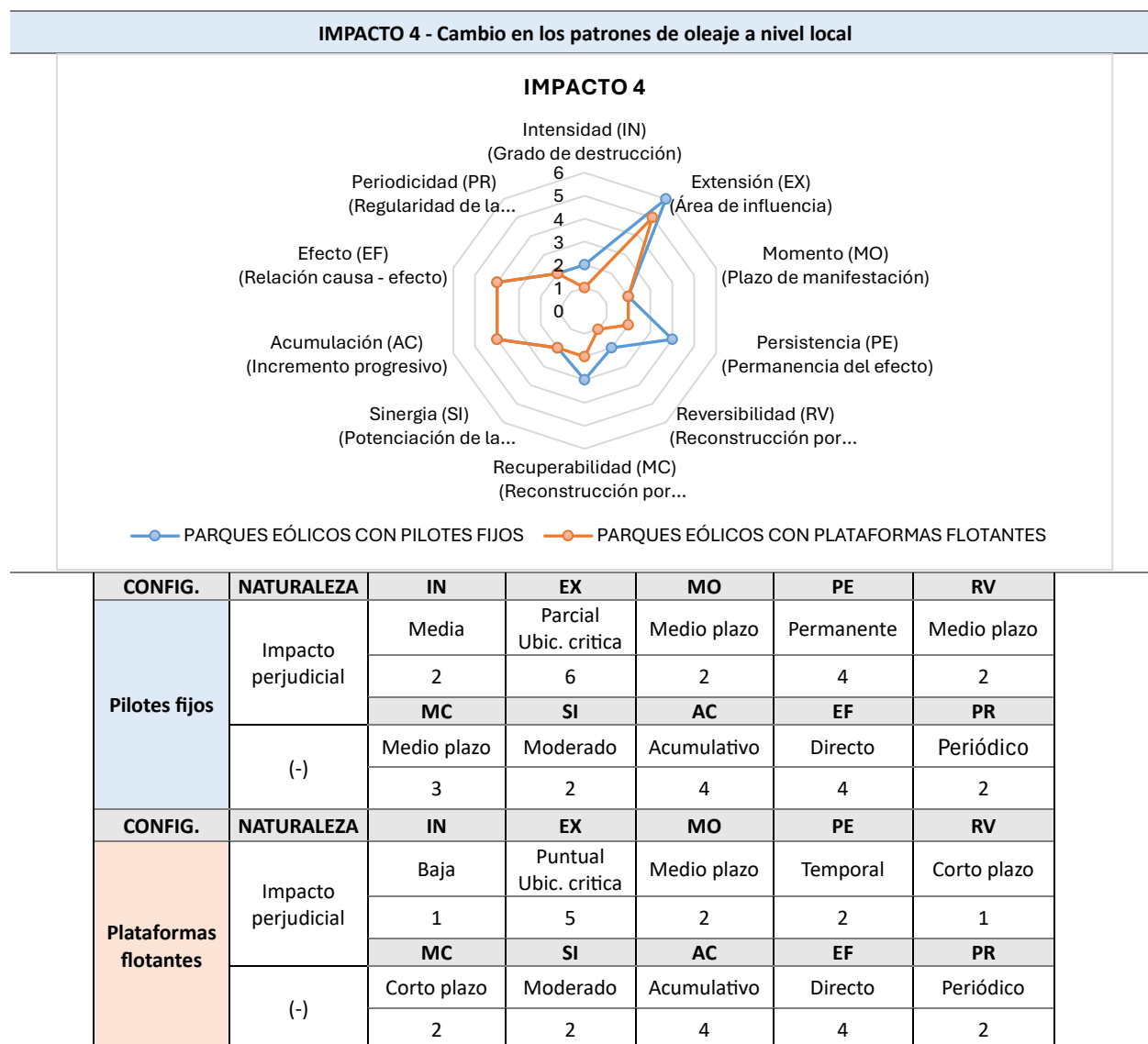
**ANÁLISIS**

**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** Este impacto tiene un comportamiento similar al IMPACTO 1, en este caso la construcción de los pilotes altera la estructura del suelo marino que podrían afectar a su vez ecosistemas de individuos bentónicos, lo que lo hace un impacto sinérgico, además de acumulativo, considerando que no solo será la construcción de un pilote sino un conjunto de ellos que conforman el parque eólico. Este impacto ocurre una única vez, y no se replica en el tiempo, por lo que se toma con una periodicidad regular.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** Dada la extensión del impacto, menor a la que se da con pilotes fijos, este impacto tiene una sinergia simple, no tendría por qué generarse interacciones entre otros impactos ambientales. Los criterios de este impacto tienen calificaciones similares al IMPACTO 1 teniendo en cuenta que son impactos relacionados con las condiciones geológicas.

**Tabla 17**

*Evaluación de IMPACTO 4*



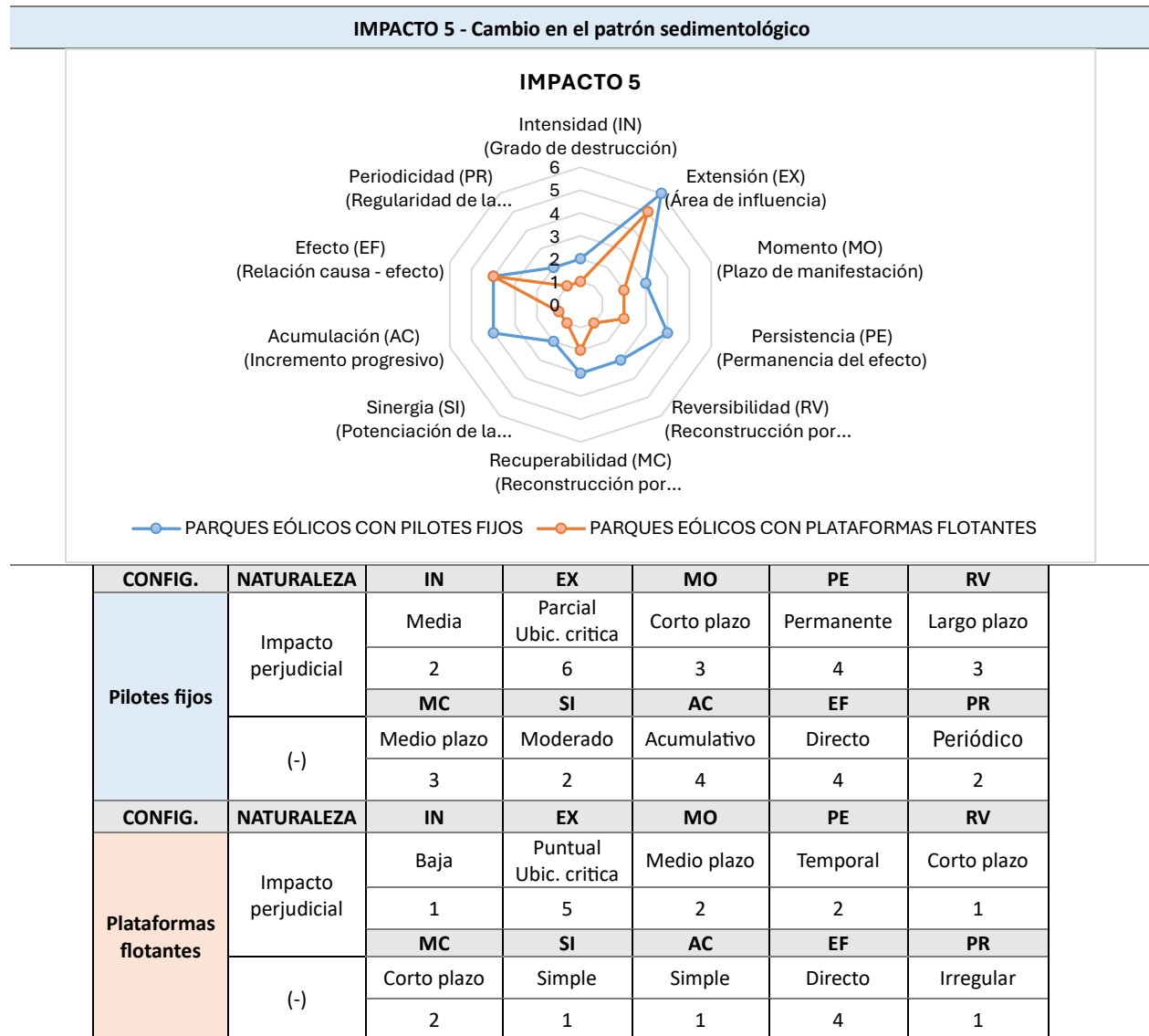
**ANÁLISIS**

**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** La construcción de este tipo de parques suele modificar a mediano plazo y parcialmente el patrón de oleaje. En este caso el área afectada podría ser moderada (parcial). Se considera reversible una vez se desmonten los pilotes, sin embargo, es posible que se tarde un poco, de meses a años, dependiendo de la morfología afectada. También se evidencia su sinergia, ya que puede potenciar impactos de erosión y dinámica sedimentaria. La manifestación del impacto depende de los oleajes, por lo tanto, se estima periódico.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** En esta configuración las estructuras permiten cierto paso del oleaje y el efecto sobre él es baja, así como una extensión puntual. La manifestación puede darse a mediano plazo, considerando que sobre él inciden otros impactos, y a su vez el oleaje va determinándose al pasar el tiempo por las estructuras. Se tomó una persistencia temporal, ya que si bien el efecto seguirá mientras estén instaladas las plataformas, este es reversible y dado su tipo de instalación la intensidad es muy baja.

**Tabla 18**

*Evaluación de IMPACTO 5*



**ANÁLISIS**

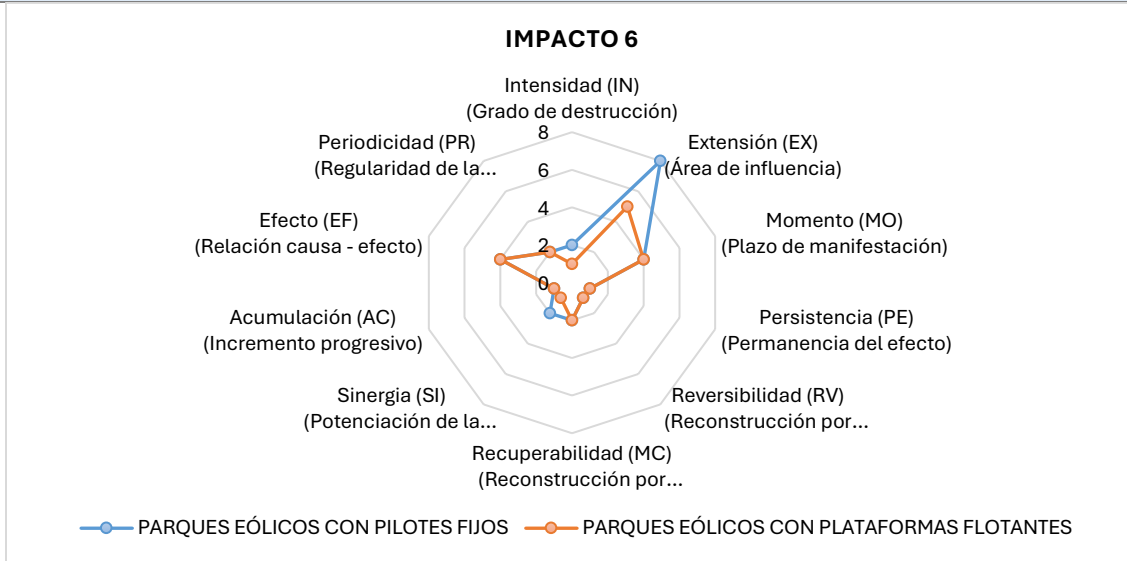
**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** Se toma como un impacto indirecto teniendo en cuenta que es una modificación progresiva proveniente de un impacto mayor tal como la modificación en las condiciones geológicas y geoforma, creándose corrientes y turbulencia que repercute en el patrón sedimentológico, de igual manera, es un impacto sinérgico que puede gestar nuevos impactos tales como cambios en la calidad del agua fisicoquímica e hidrobiológica, y procesos de erosión en la zona costera. Se espera que este impacto se manifieste en el corto plazo y que se presente periódicamente ya que hay influencia del oleaje estacional y condiciones climáticas (tormentas y demás). Por otro lado, se espera que sea reversible naturalmente a largo plazo, sin embargo, depende de las condiciones ambientales (energía hidrodinámica, tipo de sedimento, profundidad y las áreas socavadas).

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** En este caso se considera que las plataformas flotantes generan mínimas alteraciones en el flujo del fondo ya que el anclaje solo se da en puntos específicos y variarían poco las corrientes o el oleaje. De presentarse la extensión sería muy puntual y temporal, debido a que permanece durante el tiempo que permanecen los anclajes, sin embargo, tiende a estabilizarse rápidamente.

**Tabla 19**

*Evaluación de IMPACTO 6*

**IMPACTO 6 - Cambios en las características de la calidad fisicoquímica, hidrobiológica, microbiológica del recurso hídrico**



CONFIG.	NATURALEZA	IN	EX	MO	PE	RV
Pilotes fijos	Impacto perjudicial	Media	Extenso Ubic. critica	Inmediato	Momentáneo	Corto plazo
		2	8	4	1	1
	(-)	MC	SI	AC	EF	PR
		Corto plazo	Moderado	Simple	Directo	Periódico
Plataformas flotantes	Impacto perjudicial	Baja	Puntual Ubic. critica	Inmediato	Momentáneo	Corto plazo
		1	5	4	1	1
	(-)	MC	SI	AC	EF	PR
		Corto plazo	Simple	Simple	Directo	Periódico
		2	1	1	4	2

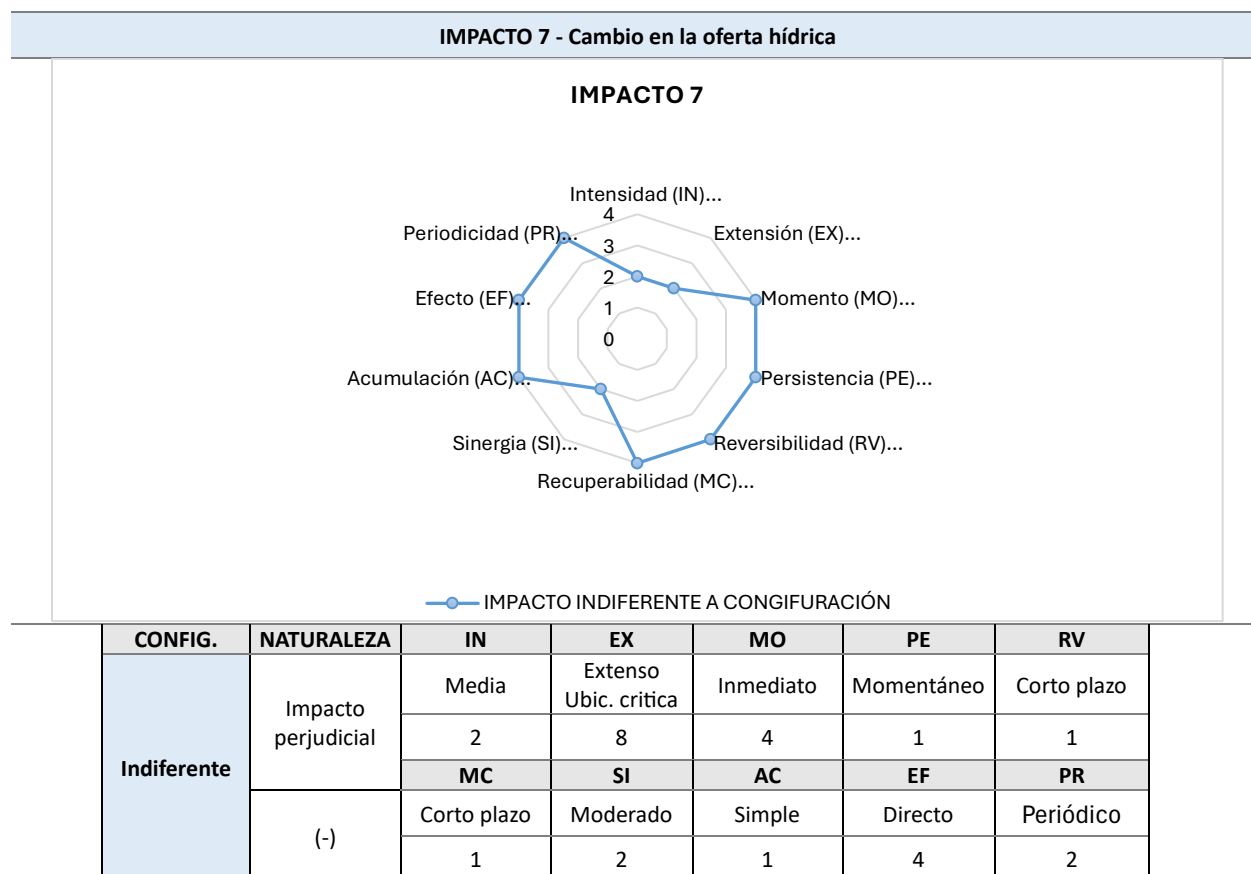
**ANÁLISIS**

**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** Este impacto es directo, ya que proviene de las actividades de preparación del lecho donde se realizará la instalación de los pilotes, donde los materiales de construcción e hincado pueden incrementar la turbidez y resuspensión de sólidos, esto puede repercutir sobre los ecosistemas acuáticos, lo que lo hace sinérgico. Además, se trata de un evento puntual que no es acumulable con el tiempo considerando que la dinámica del cuerpo hídrico permite autodepuración o mezcla, esto lo hace reversible naturalmente, y de presentarse algún tipo de derrame de algún material es posible implementar alguna medida de mitigación a corto plazo. La calificación más alta se trata del criterio que hace referencia al área de influencia, considerando que es un sector crítico y que puede expandirse a otras áreas de acuerdo con las corrientes y los periodos climáticos.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** Para los criterios de reversibilidad, recuperabilidad y momento se espera un comportamiento similar a los proyectos que tienen una configuración de pilotes fijos, sin embargo, al tratarse de plataformas flotantes la magnitud del impacto tiende a disminuir específicamente en la extensión y la afectación sinérgica, ya que no se espera que se potencie de manera significativa otros impactos.

**Tabla 20**

*Evaluación de IMPACTO 7*



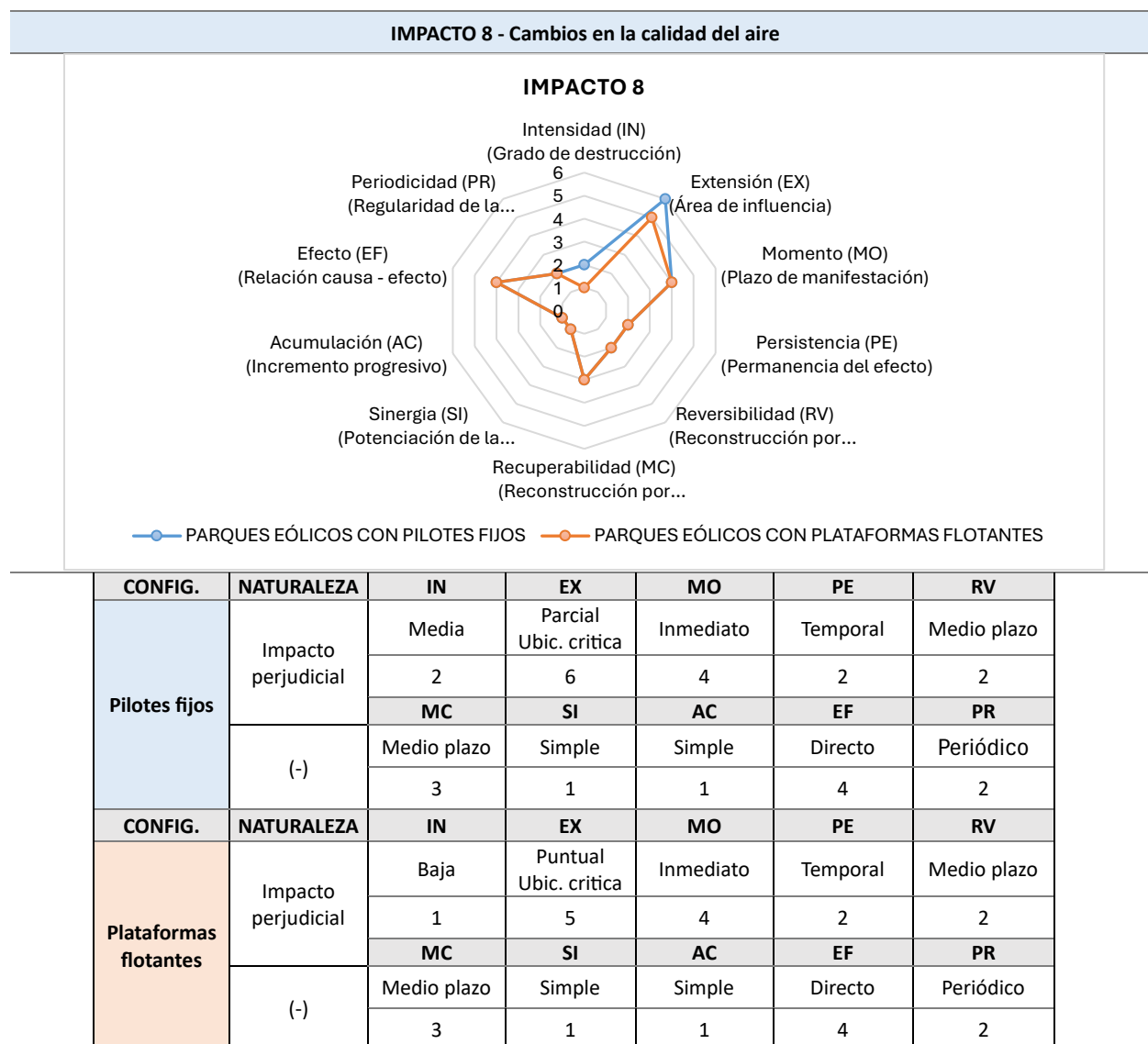
**ANÁLISIS**

Este impacto se evalúa de manera indiferente a la configuración que se elija para el parque eólico, ya que está más relacionado con la demanda hídrica para para los campamentos donde se alojará el personal que temporalmente se encargará de la construcción, así como de los frentes de trabajo. Asimismo, se considera la etapa de operación para el electrolizador el cual ejercerá presión sobre el recurso hídrico ya sea porque se utilizará agua dulce para posterior purificación, o en su defecto, desalinización y pureza en caso de utilizar agua de mar.

En este caso, el impacto es permanente ya que se dará mientras esté operativa la planta de electrólisis, de igual manera, se considera sinérgico porque podría ejercer presión sobre las fuentes hídricas locales donde haya otros proyectos o incluso los sistemas de abastecimiento de la comunidad. Se considera recuperable por medios humanos, en caso de establecerse procesos de recirculación, sin embargo, estos podrían tomar largo tiempo de implementación e inversión.

**Tabla 21**

*Evaluación de IMPACTO 8*



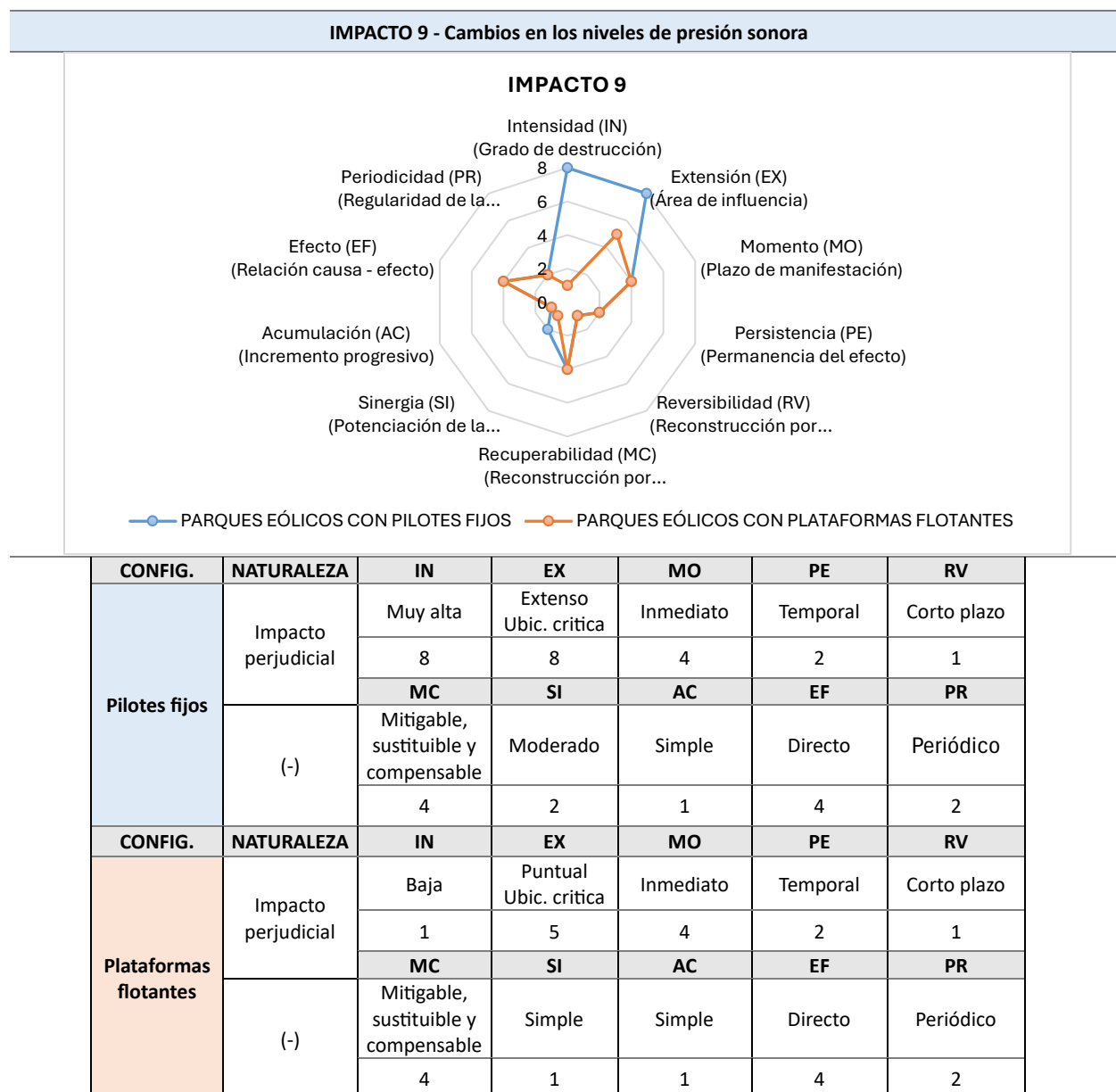
**ANÁLISIS**

**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** Durante la construcción se generan emisiones difusas provenientes de la maquinaria, transporte marítimo y terrestre, este último relacionado con el transporte de equipos y la etapa de operación con actividades de logística y mantenimiento. El efecto en este caso persiste temporalmente durante la construcción que puede llegar hasta los 10 años. Normalmente requiere maquinaria pesada y mayores emisiones, ya que los trabajos de construcción implican actividades prolongadas. Se considera reversible si se implementan medidas como buenos mantenimientos en la maquinaria y el uso de combustibles limpios. Por último, el impacto se manifiesta periódicamente durante el periodo constructivo.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** En este caso las emisiones son menores, teniendo en cuenta que el montaje inicia en tierra y no requiere tanta maquinaria con operación marina directa, así, la intensidad y la extensión son menores que con una construcción con pilotes fijos.

**Tabla 22**

*Evaluación de IMPACTO 9*



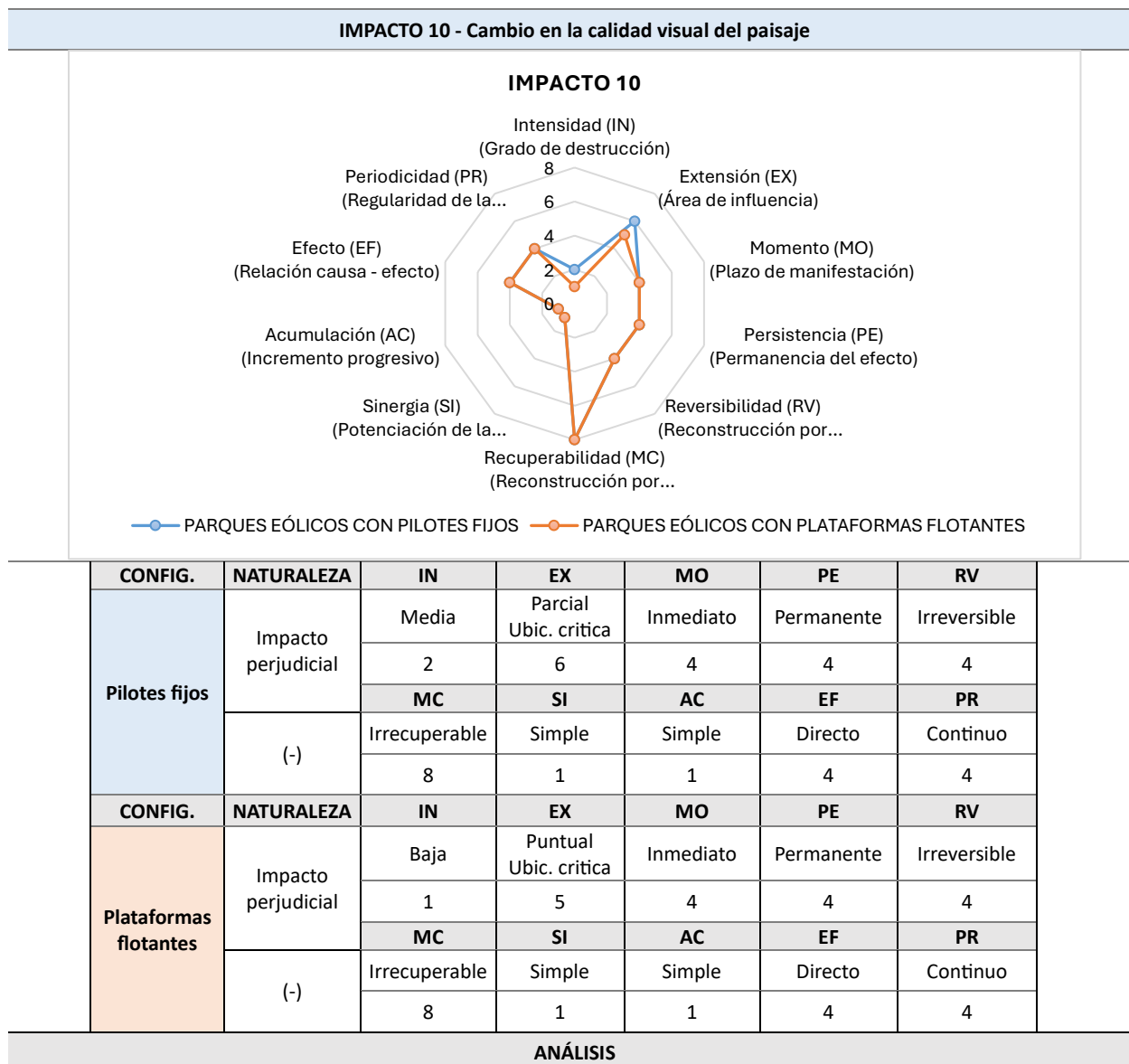
**ANÁLISIS**

**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** Los niveles de presión sonora para el hincado de pilotes son intensos, afectando la fauna marina, lo que lo hace sinérgico. Se considera un impacto con extensión amplia en el medio marino, sin embargo, es posible mitigar este impacto de alguna manera, para lo cual sería posible instalar sistemas de atenuación de ruido llamados "anillos de burbujas" (Iberdrola, 2025) instalados alrededor de los pilotes para la protección de los mamíferos marinos. De igual forma, es importante que antes de realizar actividades se haga también un monitoreo de la presencia de estos para implementar acciones adecuadas al respecto. Este impacto tiene la duración del proceso constructivo que va hasta los 10 años y es reversible de manera inmediata.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** En este caso como no hay hincado de pilotes, o se espera la emisión de ruido significativo, por lo tanto, se toma una intensidad baja y extensión puntual. De igual manera, como los niveles son bajos, y los episodios son puntuales y únicamente en ciertas fases del proyecto, no se espera sinergia con otros impactos.

**Tabla 23**

*Evaluación de IMPACTO 10*



**ANÁLISIS**

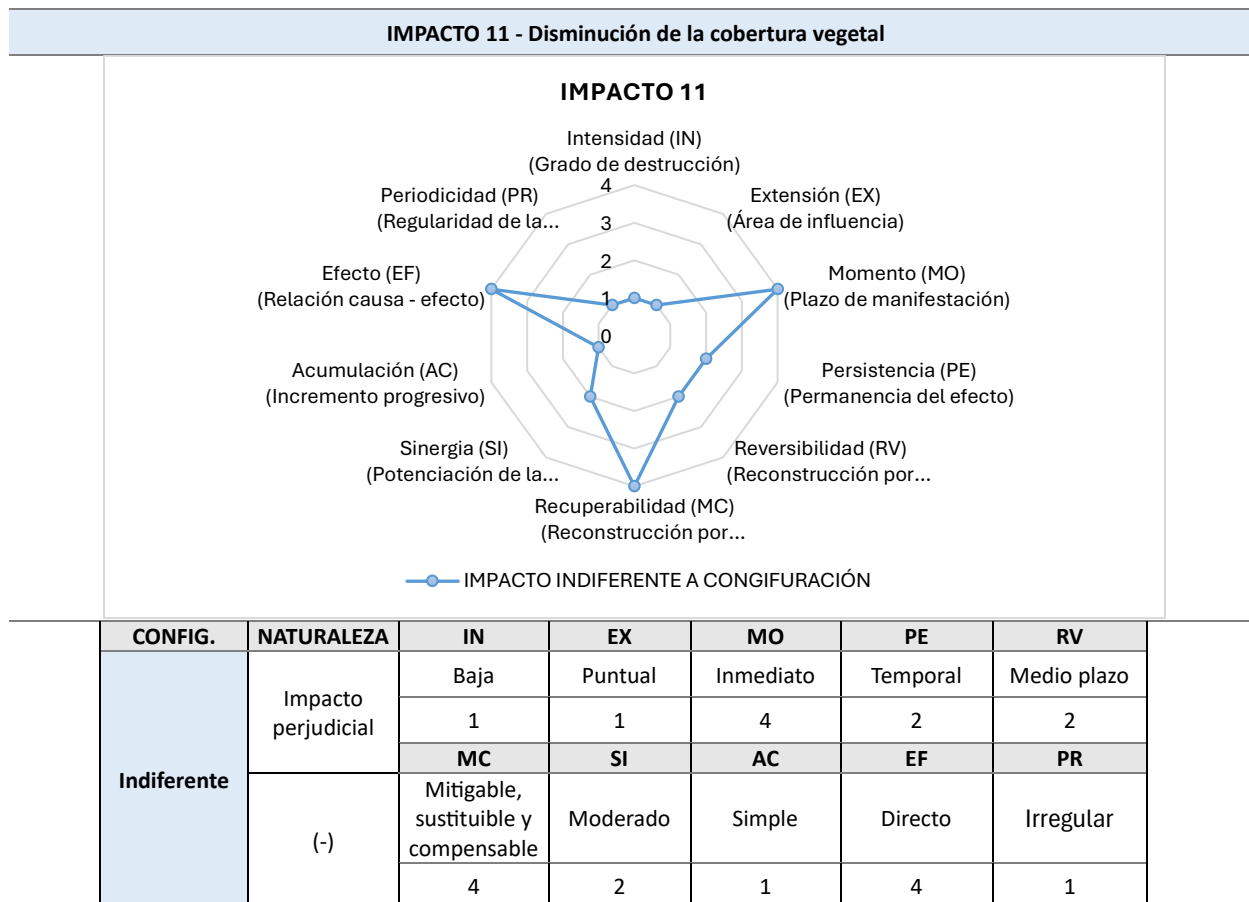
**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** Generalmente los pilotes fijos se instalan a una menor distancia de la costa, por lo que con esta configuración este impacto puede tener una mayor magnitud.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** Este tipo de parques se pueden instalar a una distancia mayor de la costa, por lo tanto, la visibilidad desde la costa pueda verse disminuida y el impacto visual sea mucho menor.

Cabe aclarar que para ambas configuraciones se dará una manifestación inmediata para cuando se instalen los aerogeneradores y permanecerá durante la vida útil del proyecto, donde se podrán implementar algunas medidas referentes al diseño, pero el efecto no se elimina completamente, es así como se determina como un impacto que tarda más de 15 años en recuperarse, en este caso, la vida útil del proyecto que oscila hasta los 30 años.

**Tabla 24**

*Evaluación de IMPACTO 11*

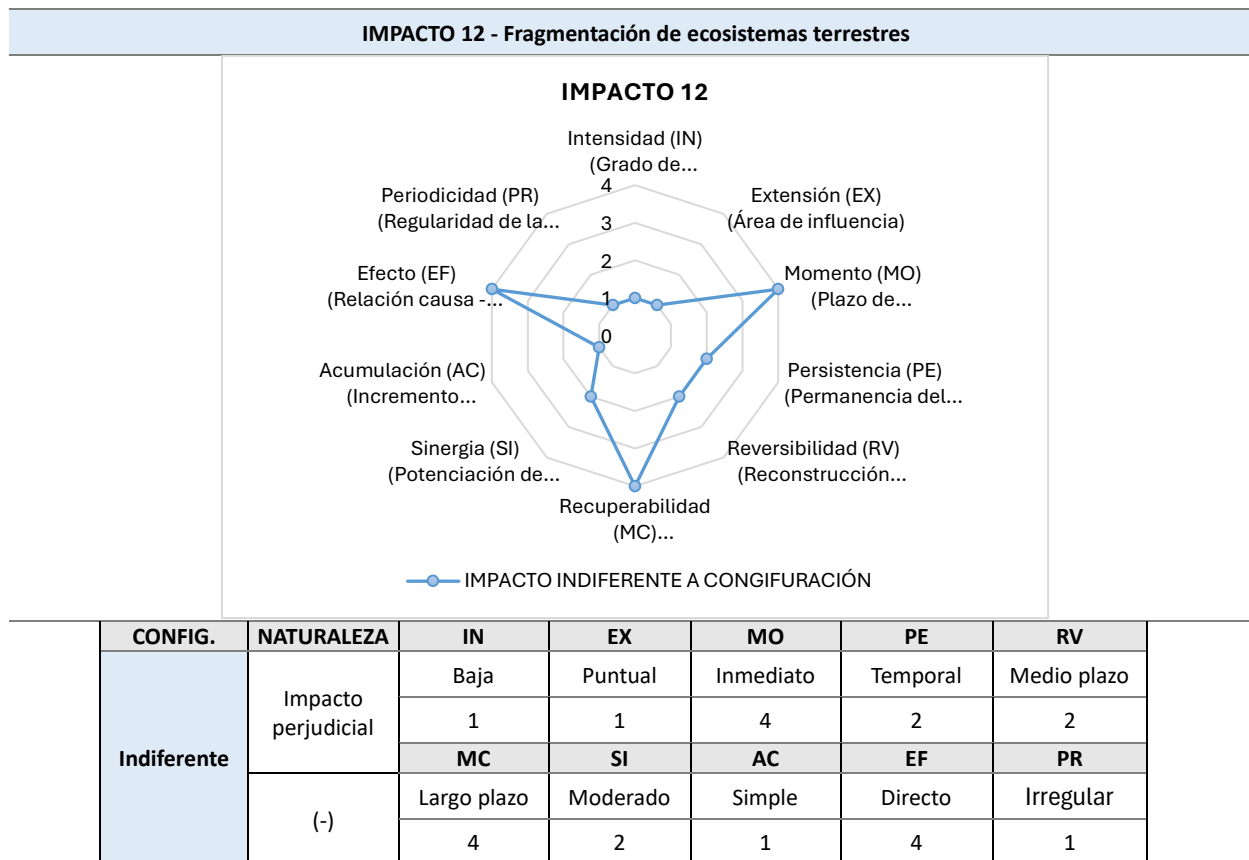


**ANÁLISIS**

Este impacto al darse en tierra para la etapa de adecuación y construcción de campamentos y planta de electrólisis se tomará como un impacto que es indiferente al tipo de parque eólico definido para el proyecto. De materializarse este impacto se puede dar la fragmentación del hábitat para ecosistemas terrestres, lo que lo hace sinérgico mas no acumulativo ya que es una acción puntual durante el desarrollo del proyecto. La ventaja es que el impacto tiende a ser compensable, lo que hace recuperable el efecto negativo. También se toma una intensidad baja, ya que se espera no afectar grandes áreas boscosas.

**Tabla 25**

*Evaluación de IMPACTO 12*



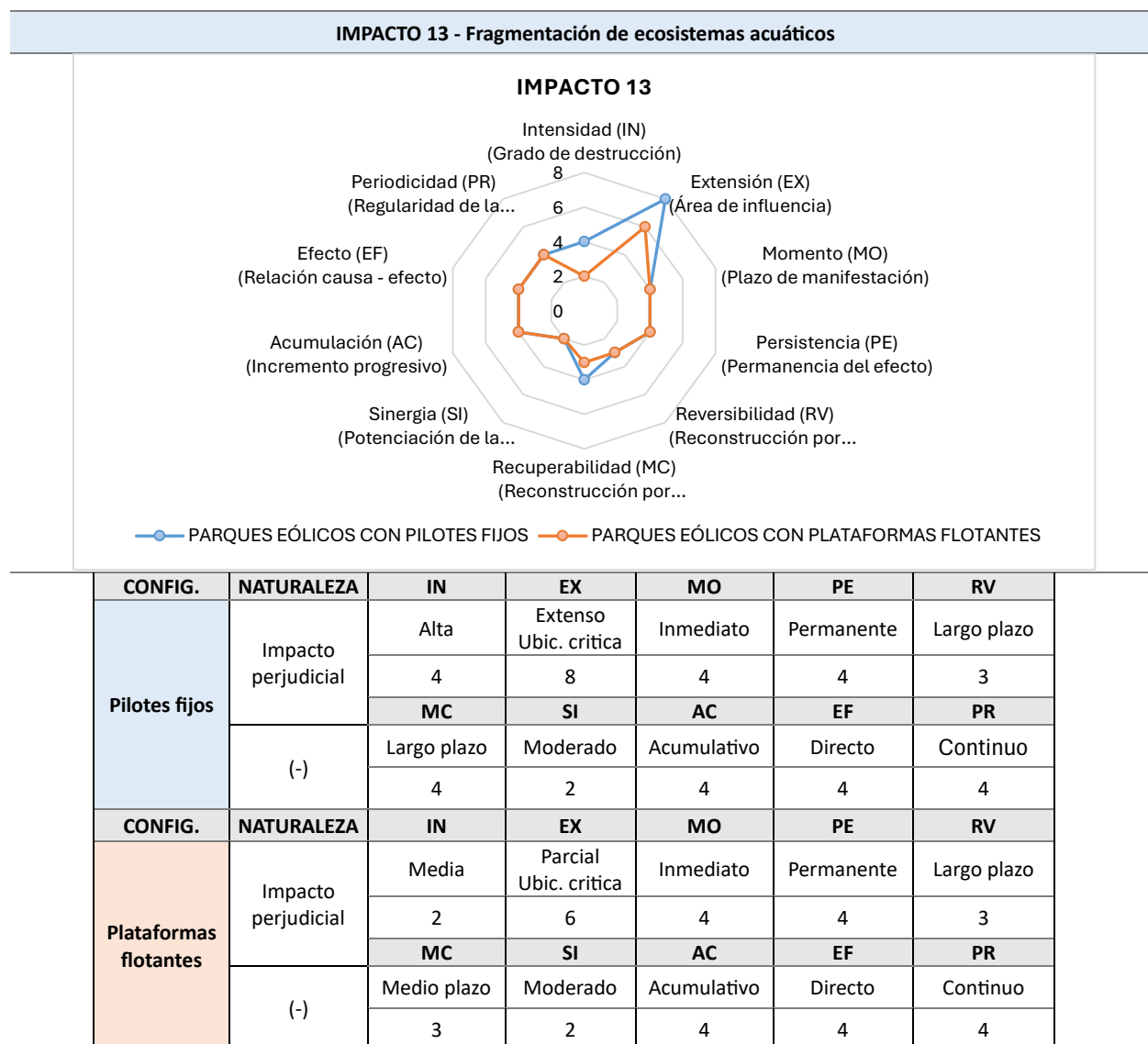
**ANÁLISIS**

La fragmentación de ecosistemas terrestres está relacionada con la disminución de la cobertura vegetal (IMPACTO 11), sin embargo, la fragmentación de hábitat tiene una recuperabilidad a largo plazo, considerando que se pueden ejecutar estrategias de restauración y compensación, pero el crecimiento de esta cobertura depende del tiempo y la adaptabilidad de los individuos a estos nuevos corredores biológicos.

Este impacto ocurre una única vez, cuando se adapta el terreno para instalación de estructuras en tierra y no se toma como acumulativo, ya que se trata de un impacto puntual con baja intensidad dada el área de influencia considerada.

**Tabla 26**

*Evaluación de IMPACTO 13*



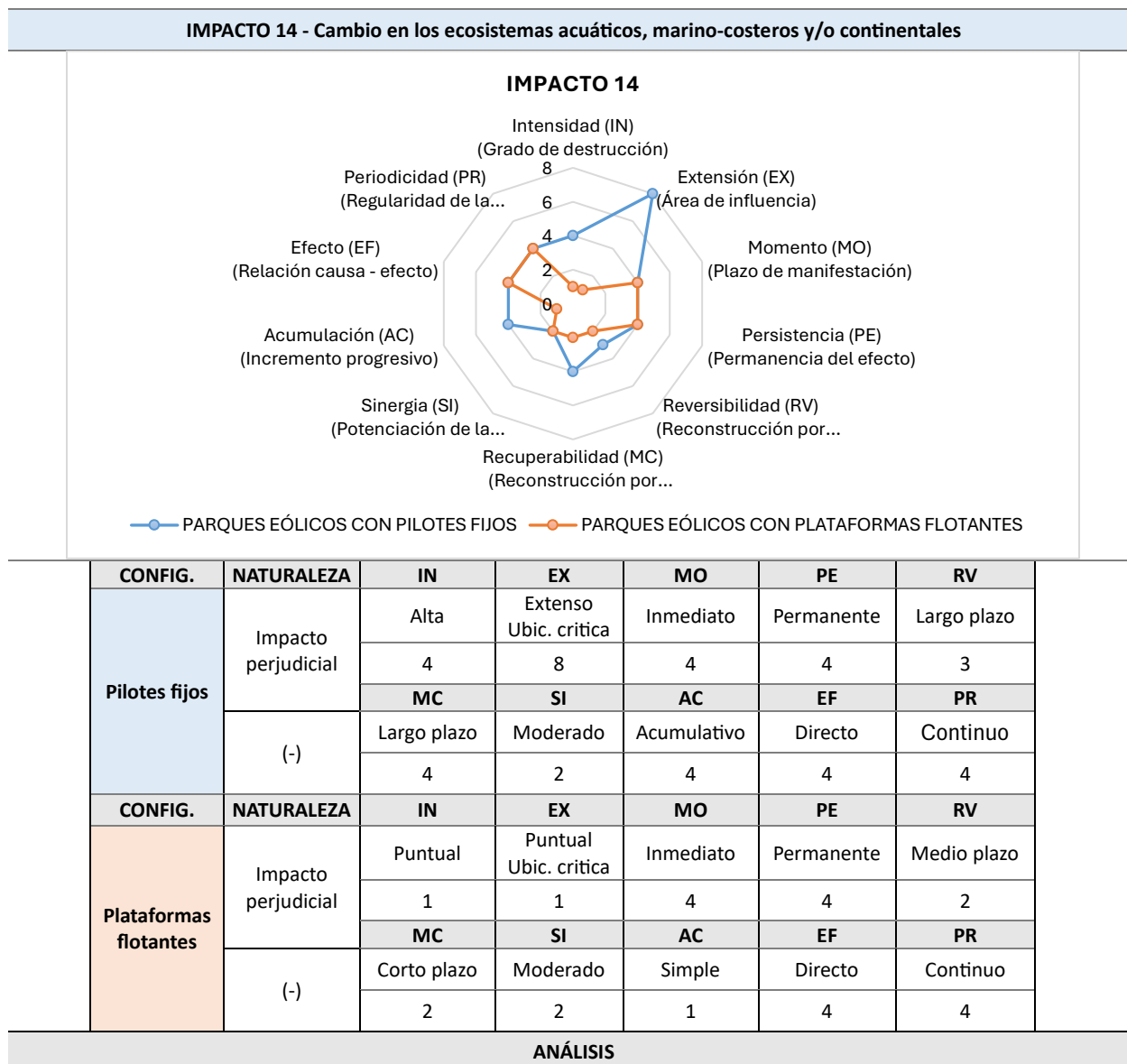
**ANÁLISIS**

**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** Si bien los efectos de cada pilote son localizados, al tener un parque eólico que puede extenderse a una mayor área, según (Iberdrola, 2025) el conjunto de un parque de aerogeneradores en el mar puede ocupar una superficie de más de 300 km<sup>2</sup>, por esto se considera un impacto extenso. Además, se da inmediatamente a la hora de adecuación del área e instalación de los pilotes. Para que se dé la recuperación por medios naturales se estima un plazo entre 11 y 15 años mientras los ecosistemas se readaptan, sin embargo, habrá evidentemente una pérdida de individuos. Se considera un impacto sinérgico ya que puede generar otro tipo de impactos que van desde los socioeconómicos hasta la afectación de la conectividad ecológica y pérdida de especies. Teniendo en cuenta que será un parque eólico, el impacto se puede acumular y ser continuo mientras se encuentren instaladas las estructuras.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** la diferencia con la configuración de pilotes fijos es que el área afectada es menor, por lo tanto la intensidad también lo es, sin embargo, sigue siendo un impacto acumulativo ya que los anclajes se distribuyen en un área significativa de un parque eólico, de igual manera, es sinérgico con afectación en los servicios ecosistémicos y proyectos productivos locales, dado el desplazamiento de grupos hidrobiológicos (peces, macroinvertebrados bentónicos y demás).

**Tabla 27**

*Evaluación de IMPACTO 14*



**ANÁLISIS**

**PARQUES EÓLICOS CON PILOTES FIJOS:** este impacto presenta rangos iguales al IMPACTO 13, teniendo en cuenta que los pilotes ya no se califican como barreras ya construidas que afectan a los ecosistemas acuáticos, sino que se califica todo el proceso constructivo de ellos, así como su operación, etapas en las cuales se puede presentar muerte de individuos tanto acuáticos (peces, mamíferos, comunidades bentónicas) como terrestres (aves costeras), lo que lo hace intensivo y extensivo.

**PARQUES EÓLICOS CON PLATAFORMAS FLOTANTES:** respecto a esta estructura se considera un impacto puntual y local, ya que los anclajes ocupan menor área y modifica en menor escala las comunidades bentónicas. Al ser un impacto de menor magnitud se puede decir que su acumulación es simple, que de presentarse puede modificar la dinámica pesquera.

Con base en los criterios evaluados para cada uno de los impactos, se procedió al cálculo de su valor de importancia aplicando la ecuación definida por (Conesa, 2009) y presentada en la

**Tabla 11.** Los resultados obtenidos a partir de este procedimiento se sintetizan en la **Tabla 28.**

**Tabla 28**

*Resultados de la importancia de los impactos*

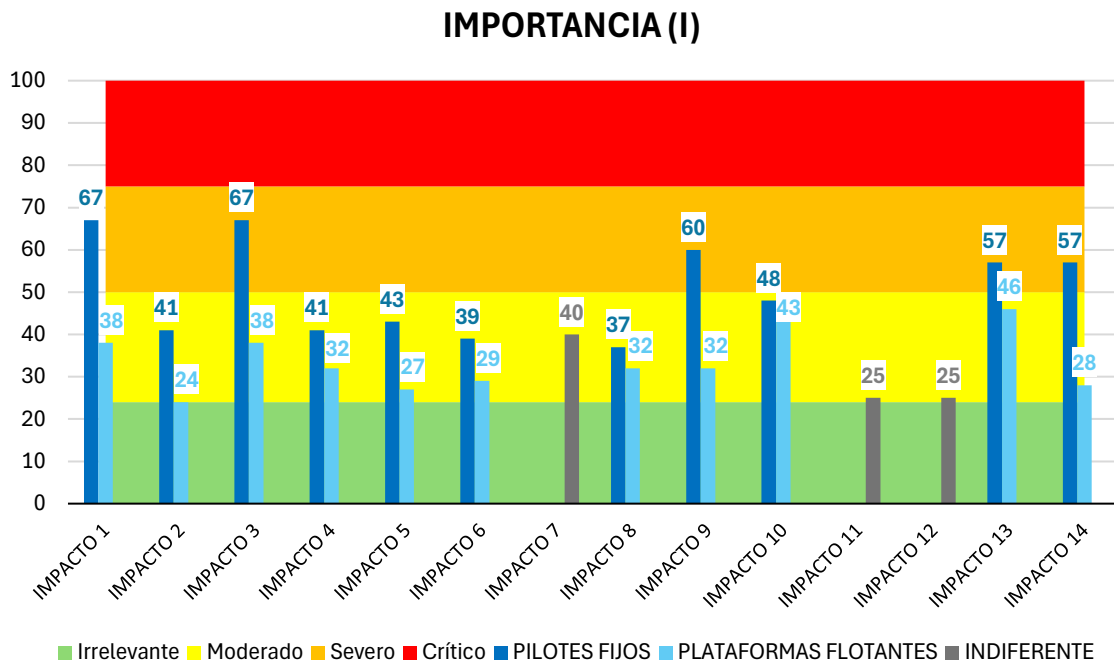
CONFIGURACIÓN	IMPACTO 1	IMPACTO 2	IMPACTO 3	IMPACTO 4	IMPACTO 5	IMPACTO 6	IMPACTO 7
PILOTES FIJOS	67	41	67	41	43	39	
PLATAFORMAS FLOTANTES	38	24	38	32	27	29	
INDIFERENTE							40

CONFIGURACIÓN	IMPACTO 8	IMPACTO 9	IMPACTO 10	IMPACTO 11	IMPACTO 12	IMPACTO 13	IMPACTO 14
PILOTES FIJOS	37	60	48			57	57
PLATAFORMAS FLOTANTES	32	32	43			46	28
INDIFERENTE				25	25		

Con el propósito de facilitar la visualización de la clasificación de los impactos según su nivel de importancia, en la **Figura 5** se presentan los resultados obtenidos, utilizando la clasificación por colores que permite identificar la categoría asignada a cada impacto conforme a su valoración.

**Figura 5**

*Resultados y clasificación de la importancia de los impactos evaluados*



### 7.5 Análisis general de resultados

Como parte del desarrollo metodológico, se realizó la evaluación de impactos ambientales considerando dos configuraciones tecnológicas para la fase de generación de energía en un proyecto de producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*:

- Parques eólicos *offshore* con cimentación de pilotes fijos
- Parques eólicos *offshore* con plataformas flotantes

A partir de este enfoque se identificaron y evaluaron catorce (14) impactos ambientales aplicando la metodología de (Conesa, 2009) en función de los criterios de intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, recuperabilidad, sinergia, acumulación, efecto y periodicidad. En el caso de los impactos marinos se consideró adicionalmente la condición de “ubicación crítica”, es decir, escenarios marinos de alta sensibilidad ecológica, lo que hace que el criterio de extensión, relacionado con el área de influencia sea mayor conforme a lo establecido en la metodología, adicionando cuatro puntos (4) al puntaje base.

---

Los impactos evaluados abarcaron las fases y actividades tanto en los componentes marinos como terrestres asociadas a la infraestructura logística, campamentos, frentes de trabajo y planta de electrólisis en tierra.

Los resultados arrojados posterior al proceso de evaluación de los impactos, muestran de manera general que los proyectos que emplean pilotes fijos presentan, de forma consistente, valores más altos de importancia ambiental en la mayoría de los impactos evaluados, mientras que los proyectos con plataformas flotantes generan impactos de menor importancia ambiental en la mayoría de los casos. Esta tendencia es particularmente marcada en los siguientes impactos:

- Alteración de las condiciones geológicas y geoforma del terreno y/o lecho marino (IMPACTO 1)
- Cambio en los procesos de erosión costera (IMPACTO 2)
- Cambios en las características geomecánicas de estabilidad (IMPACTO 3)
- Cambio en los patrones de oleaje a nivel local (IMPACTO 4)
- Cambio en el patrón sedimentológico (IMPACTO 5)
- Cambios en los niveles de presión sonora (IMPACTO 9)
- Fragmentación de ecosistemas acuáticos (IMPACTO 13)
- Cambio en los ecosistemas acuáticos, marino-costeros y/o continentales (IMPACTO 14)

Esta diferencia es particularmente significativa debido a que los pilotes fijos implican una mayor intervención directa sobre el lecho marino durante la instalación de estos, alteración física y mecánica de los sedimentos, generación de ruido submarino de alta intensidad durante la fase de construcción, modificación de patrones hidrodinámicos locales (este particularmente un impacto indirecto proveniente de otros impactos directos) y fragmentación de los servicios ecosistémicos suministrados por el hábitat de las comunidades hidrobiológicas.

Por su parte, los proyectos con plataformas flotantes presentan menores impactos al minimizar el contacto físico con el fondo marino, al utilizar anclajes dispersos y sistemas de amarre que generan afectaciones puntuales en el área de influencia y poca alteración en los patrones sedimentológicos, así como al ejercer una menor intensidad en el ruido submarino, que consecuentemente se derivan en menores riesgos ante las comunidades hidrobiológicas y poca alteración en los servicios ecosistémicos de los que se ve beneficiada la comunidad aledaña.

Es evidente que, en caso de optar por el desarrollo de proyectos *offshore* con cimentación de pilotes fijos, será necesario establecer una gestión ambiental más robusta y la implementación de medidas

---

de manejo específicas, las cuales deberán integrar no solo acciones correctivas y preventivas, sino también la incorporación de innovaciones tecnológicas y estrategias de planificación orientadas a minimizar las afectaciones ambientales identificadas.

Entre las posibles soluciones y estrategias de manejo que podrían implementarse en este tipo de proyectos se incluyen:

- Previo a la instalación de los pilotes se recomienda implementar monitoreos durante periodos críticos de reproducción de especies marinas sensibles (mamíferos, peces migratorios, tortugas, entre otros) de manera que se eviten estas temporadas para la etapa constructiva.
- Instalación de sistemas de control y detección de presencia de fauna conocidos como Monitoreo Acústico Pasivo (PAM, por sus siglas en inglés), el cual utiliza el sonido y los diferentes rangos de frecuencia para identificar la presencia de ciertos mamíferos bajo el agua (SINAY, 2024).
- El uso de anillos de burbujas con diferentes capas que permitan la reducción del nivel de pulso acústico emitido por las actividades de hincado de pilotes (Iberdrola, 2025).
- Monitoreos mediante GPS, radares de alto rendimiento y cámaras de alta resolución (teledetección) para determinar las líneas de vuelo en la migración de aves, así como su presencia en los parques eólicos (Iberdrola, 2025).
- Diseños óptimos que requieran un menor número de pilotes con igual rendimiento en la generación de energía.
- Uso de combustibles más limpios para las embarcaciones y medios de transporte terrestre que reduzcan la contaminación del agua, así como de la calidad de aire. De igual manera, conservar la programación de los mantenimientos preventivos programados.
- Creación de arrecifes artificiales (Universidad de Alicante, 2023).

Este tipo de acciones no solo generan beneficios ambientales y sociales, sino que además fortalecen la viabilidad económica del proyecto, al incrementar su atractivo para inversionistas y entidades financiadoras que priorizan el cumplimiento de estándares de sostenibilidad y buenas prácticas ambientales.

---

### **7.5.1 Consideraciones complementarias de impactos exógenos y ciclo de vida**

Si bien la presente evaluación de impacto ambiental se centró en el análisis de los impactos directos, locales y diferenciados en función de la configuración tecnológica (pilotes fijos y plataformas flotantes), es importante reconocer la existencia de impactos ambientales exógenos o indirectos, los cuales no se manifiestan en el área de emplazamiento del proyecto, pero son inherentes al ciclo de vida completo de la infraestructura involucrada. Este tipo de análisis cobra especial relevancia al ser abordado desde los enfoques de economía circular y Análisis del Ciclo de Vida (ACV), dado que proporciona una visión holística de las cargas ambientales y de los flujos de recursos durante todo el ciclo de vida del proyecto, permitiendo estrategias de diseño sostenible, eficiencia de las materias primas y reducción de emisiones en todas las etapas del proceso.

En el caso de proyectos de producción de hidrógeno a partir de energía eólica *offshore*, estos impactos exógenos están estrechamente relacionados con:

- La fabricación de los componentes estructurales
- Extracción y transformación de materias primas
- Transporte especializado de componentes de gran dimensión
- Emisiones indirectas asociadas al consumo energético de los procesos industriales previos al montaje.

Aunque estos impactos no inciden directamente sobre los ecosistemas marinos y terrestres de la zona de influencia en la que se desarrollaron las matrices de evaluación de impactos ambientales, su relevancia dentro del marco de la sostenibilidad global del proyecto es considerable. En algunos casos, la huella de carbono proveniente de la fabricación de los componentes que hacen parte de las estructuras puede representar una proporción importante de emisiones durante el ciclo de vida del proyecto.

---

## 8. Conclusiones

La aplicación de la metodología de (Conesa, 2009) permitió establecer una diferencia clara entre los proyectos que emplean parques eólicos con pilotes fijos y aquellos que utilizan plataformas flotantes. Los resultados evidenciaron que la configuración con pilotes fijos genera, de manera sistemática, impactos de mayor relevancia ambiental, especialmente en el componente marino. Estos impactos presentan en general, alta persistencia, limitada reversibilidad (reconstrucción por medios naturales) y requerirán medidas específicas para su mitigación.

Así, se induce que los proyectos con plataformas flotantes tienen como resultado menores afectaciones ambientales teniendo en cuenta que realizan una mínima intervención sobre el lecho marino. Esta opción tecnológica demuestra ser más favorable desde el punto de vista de sostenibilidad ambiental. No obstante, es importante reconocer que, a pesar de sus ventajas ambientales, los parques eólicos flotantes aún no alcanzan un nivel de madurez tecnológica comparable al de los proyectos con pilotes fijos. A nivel global el desarrollo de esta tecnología se encuentra en una etapa incipiente, limitada principalmente a proyectos piloto, con escasas implementaciones comerciales a gran escala. Lo cual evidencia la necesidad de continuar avanzando en investigación y consolidación de marcos normativos que permitan su despliegue efectivo y competitivo en escenarios reales.

Adicionalmente, la magnitud de los impactos está condicionada a la ubicación de este tipo de proyectos, especialmente cuando estos se desarrollan en zonas de alta importancia ecosistémica. En estos casos, será necesario aplicar medidas de manejo más rigurosas, orientadas a prevenir afectaciones significativas, sinérgicas y acumulativas en el entorno.

Considerando que este tipo de proyectos puede tener una vida útil aproximada de hasta 30 años, es imperativo investigar e incorporar innovaciones tecnológicas y estrategias alternativas que permitan minimizar o compensar los impactos que cuentan con persistencia permanente, es decir, que manifiestan sus efectos durante periodos superiores a los 15 años de operación.

Asimismo, previo al desarrollo de estos proyectos, es indispensable realizar estudios y monitoreos ambientales de línea base que abarquen las variaciones estacionales y climáticas, de manera que puedan anticiparse mediante medidas de manejo, a los efectos generados. Esto permitirá, por ejemplo, programar la ejecución de obras fuera de periodos críticos de migración, dinámicas reproductivas o alimentación de especies terrestres y acuáticas que utilicen esos ecosistemas.

Particularmente en Colombia, resulta fundamental incorporar en la planificación de estos proyectos consideraciones adicionales relacionadas con la navegabilidad, la presencia de ecosistemas

---

estratégicos (como parques nacionales y zonas protegidas), así como la existencia de comunidades vulnerables en zonas costeras. En este sentido, documentos de referencia como el elaborado por el (WORLD BANK GROUP, 2022), que presenta una zonificación preliminar del potencial eólico *offshore* en Colombia, constituyen herramientas fundamentales que pueden ser de gran utilidad a la hora de definir la viabilidad y el diseño de producción de hidrógeno *offshore* en el país.

## 9. Referencias

- Conesa, V. (2009). *Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental*. Madrid: Grupo Mundi-Prensa.
- Cruz, I. (2022). *GUÍA INTRODUCTORIA AL TEMA “LA ENERGÍA EÓLICA MARINA FLOTANTE”*. Obtenido de [https://www.programainvestiga.org/pdf/guias2021-22/Guiaintrodutoriaaltema\\_EOLICAMARINAFLOTANTE.pdf](https://www.programainvestiga.org/pdf/guias2021-22/Guiaintrodutoriaaltema_EOLICAMARINAFLOTANTE.pdf)
- de Simón-Martín, M., Cortés-Nava, B.-R., Rodríguez-Parra, R., & Carro-de Lorenzo, F. (2021). El papel del hidrógeno verde en la transición energética de la industria. *Tecnología energética*, 200-206.
- EMBER. (2025). *Global Electricity Review 2025*. Londres: Ember. Obtenido de <https://ember-energy.org/app/uploads/2025/04/ES-2025-Executive-Summary-FINAL.pdf>
- EQUINOR. (2019). *Hywind Tampen*. Obtenido de Equinors tilsvar: <https://cdn.equinor.com/files/h61q9gi9/global/54ecd7f0247b086de20b2decce48f69700ba613e.pdf?oppsummering-av-ku-hoeringsuttalelser-og-tilsvar-equinor.pdf>
- EQUINOR. (2025). *Hywind Tampen*. Obtenido de <https://www.equinor.com/energy/hywind-tampen>
- García-Hoyos, L., Franco-Herrera, A., Ramírez-Barón, J., & López-Cerón, D. (2010). DINÁMICA OCÉANO-ATMÓSFERA Y SU INFLUENCIA EN LA BIOMASA FITOPLANCTÓNICA, EN LA ZONA COSTERA DEL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, CARIBE COLOMBIANO. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 307-335. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/mar/v39n2/v39n2a04.pdf>
- Gómez, J., & Castro, R. (2024). Green Hydrogen Energy Systems: A Review on Their Contribution to a Renewable Energy System. *Energies*, 1-41.
- Iberdrola. (2024). Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>
- Iberdrola. (2025). *Construcción de un parque eólico marino*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore/construccion-parques-eolicos-marinos>
- Iberdrola. (Febrero de 2025). *Protección de la biodiversidad marina en los parques eólicos offshore*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore/proteccion-biodiversidad-marina-parques-eolicos>

- 
- IEA. (2025). *Global Energy Review 2025*. Paris: IEA. Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf>
- IRENA. (2022). *World Energy Transitions outlook 2022 - 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi: IRENA.
- IRENA. (2023). *Enabling frameworks for offshore wind scale up: Innovations in permitting*. Abu Dhabi: IRENA.
- IRENA. (2024). *Enabling technologies - Hydrogen*. Obtenido de <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- Ligeza, K., Łaciak, M., & Ligeza, B. (2023). Centralized Offshore Hydrogen Production from Wind Farms in the Baltic Sea Area—A Study Case for Poland. *Energies*, 16, 1-24. doi:<https://doi.org/10.3390/en16176301>
- Malagón-Castro, D. (2003). ENSAYO SOBRE TIPOLOGÍA DE SUELOS COLOMBIANOS - ÉNFASIS EN GÉNESIS Y ASPECTOS AMBIENTALES -. *Ciencias de la tierra*, 319-342. Obtenido de [https://www.accefyn.com/revista/Vol\\_27/104/319-341.pdf](https://www.accefyn.com/revista/Vol_27/104/319-341.pdf)
- Mijangos-Ricárdez, O. F., & López-Luna, J. (2013). Metodologías para la identificación y valoración de impactos ambientales. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 17(50), 37-42. Obtenido de Metodologías para la identificación y valoración de impactos ambientales: [https://www.researchgate.net/publication/264407862\\_Metodologias\\_para\\_la\\_identificacion\\_y\\_valoracion\\_de\\_impactos\\_ambientales](https://www.researchgate.net/publication/264407862_Metodologias_para_la_identificacion_y_valoracion_de_impactos_ambientales)
- MINAMBIENTE. (2021). *LISTADO DE IMPACTOS AMBIENTALES ESPECÍFICOS*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Listado-de-Impactos-Ambientales-Especificos-2021-V.4.pdf>
- MINAMBIENTE, ANLA. (2024). *TdR Eólicos costa afuera*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/consulta/por-la-cual-por-la-cual-se-adoptan-los-terminos-de-referencia-para-la-elaboracion-del-estudio-de-impacto-ambiental-requerido-para-el-tramite-de-licencia-ambiental-de-los-proyectos-de-uso-de/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia*. Bogotá D.C.
- Mokrzycki, E., & Gawlik, L. (2024). The Development of a Green Hydrogen Economy: Review. *Energies*, 1-28.
- NACIONES UNIDAS. (2024). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

- 
- NOAA. (s.f.). *Ocean floor features*. Obtenido de <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-floor-features>
- NORD-LOCK GROUP. (s.f.). *LA ENERGÍA EÓLICA MARINA FLOTANTE AVANZA A GRAN VELOCIDAD*. Obtenido de <https://www.nord-lock.com/latam/aprendizajes/conocimiento/2020/offshore-floating-wind-energy/>
- NORTHER. (2025). *Norther Offshore Wind Farm*. Obtenido de <https://www.norther.be/>
- Patiño, J.-J., Velásquez, C., Ramírez, E., Betancur, R., & Montoya, J.-F. (2023). Renewable Energy Sources for Green Hydrogen Generation in Colombia and Applicable Case of Studies. *Energies*, 1-21.
- Planas, M. A., & Cárdenas, J. (Marzo de 2024). *Solar and Wind Energy Will Transform the Colombia Energy Matrix*. Obtenido de *Energía para el futuro - IDB Improving lives*: <https://blogs.iadb.org/energia/en/solar-and-wind-energy-will-transform-the-colombia-energy-matrix/>
- Pradillo, S. (2018). *Situación actual y perspectivas de la energía eólica marina en Europa*. Obtenido de Proyecto de fin de grado: [https://oa.upm.es/52964/1/TFG\\_Sergio\\_Santiago\\_Pradillo.pdf](https://oa.upm.es/52964/1/TFG_Sergio_Santiago_Pradillo.pdf)
- Ramakrishnan, S., Delpisheh, M., Convery, C., Niblett, D., Vinothkannan, M., & Mamlouk, M. (2024). Offshore green hydrogen production from wind energy: Critical review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-16.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., & Person, A. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*.
- Sabino, C. (1992). *El Proceso de Investigación*. Caracas: Editorial Panamericana.
- SINAY. (4 de Abril de 2024). *What is Passive Acoustic Monitoring?* Obtenido de MARITIME DATA SOLUTION: [https://sinay.ai/en/what-is-passive-acoustic-monitoring/#elementor-toc\\_\\_heading-anchor-3](https://sinay.ai/en/what-is-passive-acoustic-monitoring/#elementor-toc__heading-anchor-3)
- Slav, I. (Octubre de 2020). *OILPRICE*. Obtenido de The Green Hydrogen Problem That No One Is Talking About: <https://oilprice.com/Energy/Energy-General/The-Green-Hydrogen-Problem-That-No-One-Is-Talking-About.html>
- Toro-Calderón, J., Martínez-Prada, R., & Arrieta-Loyo, G. (2013). Métodos de Evaluación de Impacto Ambiental en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental - UNAD*, 43-53. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/29476>
- Universidad de Alicante. (15 de marzo de 2023). *ARRECIFES ARTIFICIALES PARA REGENERAR EL HÁBITAT MARINO DE FORMA SEGURA Y SOSTENIBLE*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=tMaYRYDHSZE>
- Welsby, D., Price, J., Pye, S., & Ekins, P. (2021). Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world. *Nature*, 230-234.

---

WORLD BANK GROUP. (2022). *Hoja de ruta para el despliegue de la energía eólica costa afuera en Colombia*. The Renewables Consulting Group.

Wyczykier, G. (2022). Senderos de la transición energética: el hidrógeno verde en la era del cambio climático. *REVISTA TEMAS SOCIOLOGICOS N°31*, 453-484.

Wyczykier, G. (2023). Las controversias sobre el hidrógeno verde: interrogantes para la descarbonización vía des fosilización. *Pilquen Sección Ciencias Sociales*, 120-142.