



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
(INGENIERÍA CIVIL) – (HIDRÁULICA)

DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS ECOSISTÉMICOS POR EL APROVECHAMIENTO  
ENERGÉTICO TERMOHALINO EN LAGUNAS COSTERAS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ETZAGUERY JANETH MARIN CORIA

TUTOR PRINCIPAL  
RODOLFO SILVA CASARÍN  
INSTITUTO DE INGENIERÍA  
COMITÉ TUTOR  
LILIA REYEZ CHÁVEZ  
INSTITUTO DE INGENIERÍA  
MARÍA LUISA MARTÍNEZ VÁZQUEZ  
INECOL  
EDGAR MENDOZA BALDWIN  
INSTITUTO DE INGENIERIA  
JESÚS GRACIA SÁNCHEZ  
INSTITUTO DE INGENIERIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Lo que sabemos es una gota de agua,  
lo que ignoramos es el océano.*

*Isaac Newton*

*Para ti Ámbar Saori  
Mi hija, mi fuerza.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Un agradecimiento profundo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para continuar preparándome en mi desarrollo profesional, ahora a nivel de Doctorado.

Un especial agradecimiento también al Centro Mexicano de Innovación en Energías del Océano (CEMIE-O) por el financiamiento otorgado antes de mi ingreso al doctorado y durante mi etapa de trámites. Además por las oportunidades de asistencia a talleres y cursos que me dejaron grandes aprendizajes y me permitieron conocer colegas de distintos lados de México y de Latinoamérica.

Al Instituto de Ingeniería, gracias por la facilidad para hacer la gestión correspondiente para obtener mi grado, disfruté mucho el tiempo en sus bellas instalaciones.

Doy las gracias a todos los miembros de mi comité tutorial por los acertados comentarios, sugerencias y aportaciones mencionadas a mi tesis. Sin intención de dar ningún orden agradezco a cada uno. Las palabras no me alcanzan para expresar mi gratitud hacia el Dr. Rodolfo Silva Casarín, mi director de tesis, quien me apoyó sobre manera. Desde que salí de la maestría me acogiste en el Instituto de Ingeniería integrándome al CEMIE-O y gracias a tu apoyo decidí ingresar mis documentos al doctorado en Ingeniería Civil y logré muchas cosas. Eres un gran ejemplo para mí, sobre todo en la formación de recursos humanos, en tu tolerancia y ayuda a tus alumnos, en lo divertido y fácil que haces ver todos los retos personales y académicos frente a las adversidades. Gracias por interceder por mí cuando las cosas se pusieron difíciles y por tenerme la paciencia de mis ritmos de trabajo más lentos por la llegada de mi bebé. Estos 4 años fueron un gran reto personal, y sin tu apoyo no lo hubiera logrado. Jamás terminaría de escribir en todo lo que me ayudaste, gracias Rodolfo, gracias siempre.

Al Dr. Edgar Mendoza Baldwin, gracias por tus palabras de aliento siempre y tu singular alegría en cada visita que tenía contigo en las instalaciones del Instituto, me quedan de ti unas palabras que nos dijiste en fin de año 2020, cuando ya no veía llegar el desenlace del doctorado: “nadie puede hacer todo solo, nadie puede avanzar solo” y es gracias a tu apoyo y el de los demás miembros del comité que hoy por hoy les estoy entregando este escrito. Gracias por la fuerza en tus comentarios siempre, así aprendí mucho y todo salió mejor.

Dra. Marisa Martínez le agradezco infinitamente su apoyo durante la escritura de mi artículo científico, todo mi análisis cobró otro sentido con sus sugerencias y con su ayuda. Me hacía mucha falta alguien que tuviera esa visión ambiental de las energías del océano, y pensando en que México tiene un gran potencial pero también hay que hacer las cosas bien salvaguardando la integridad de los ecosistemas costeros. Gracias doctora por sus palabras de ánimos, felicitaciones y principalmente por todo lo que me ayudó en los análisis ambientales de mi tesis. Espero poder seguir colaborando con usted.

Dra. Lilia Reyes, le agradezco mucho la ayuda brindada durante todo mi proceso de titulación, principalmente su apoyo, amabilidad y confianza para poder terminar mis estudios de doctorado. Gracias por todo el apoyo brindado durante en mi examen de candidatura, aún recuerdo su disposición hacia mí ya que estaba cerca mi fecha de parto.

Dr. Jesús Gracia, le agradezco mucho su amabilidad para continuar con este proceso, gracias por las atenciones y por agilizar las revisiones y firmas necesarias para que todo saliera a tiempo.

Gracias infinitas a todo mi comité tutorial por su apoyo y por su confianza para concluir este proceso.

Agradezco con el alma a mi hermana Karina Marin, en verdad gracias, sin tu ayuda estos últimos dos años del doctorado no hubieran sido los mismos. Cuando todo se tornó difícil fuiste tú quien me tendió la mano para ayudarme al cuidado de mi hija, tu sobrina, y te agradezco porque a la par que yo avancé en el doctorado ella tuvo un excelente maestra y mentora en sus primeros años. No es fácil la vida de mamá, pero si tienes quien te apoye como tú lo hiciste conmigo, las cosas cambian. Mi tesis tiene una dedicatoria muy grande para ti hermana, que me apoyaste cuando todo fue más difícil en mi vida personal y en la situación del país.

A mis padres les agradezco mucho su apoyo. Gracias mamá por cobijarme en tu casa con mi hija y por ayudarme con consejos y cuidados para ella mientras yo intentaba avanzar en mis estudios. Gracias papá por las alegrías brindadas y el apoyo, eres parte indispensable de mis alegrías. A ambos gracias por no dejarme sola, los amo papás.

A mis hermanas Guadalupe Marin y Nancy Marin gracias por ayudarme con Saori, aunque no estaban de tiempo completo porque ustedes también tienen sus obligaciones, su ayuda en muchos, muchos momentos, hizo que yo pudiera avanzar y entregar a tiempo muchos de mis compromisos del doctorado. Gracias Lupe porque siempre me preguntas todo y siempre eres la más interesada en conocer a fondo los detalles de lo que hago en mis estudios de posgrado, gracias por ayudarme mucho en la recta final, por cuidar a mi hija la primera vez que la dejó sola para irme a un curso, por tu amistad y cariño

incondicionales, gracias. Nancy, gracias por recibirme en tu casa un par de meses para que yo pudiera avanzar, es gracias a tu apoyo y palabras y obvio a los ratos de distracción brindados que todo pudo fluir bien y que todo está por concluir de la mejor manera. También gracias a tu pareja Marco Salazar, quien también me ayudó mucho con mi niña, gracias por todo cuñado, te mereces lo mejor.

A mis pequeñas sobrinas, Ximenita, Fernanda, Gretel y Quetzalli, les agradezco mucho también ser parte de este proceso, las recuerdo mucho de pequeñas y ahora la ayuda que me brindan para mi hija (que les lleva muchos años de diferencia) es un tesoro que no se compara con nada. Gracias por estar para ella y para mí, saben que las amo a todas y que siempre van a contar conmigo, sean un gran ejemplo para mi hija, así como yo espero serlo siempre para ustedes pequeñas.

Hija mía, Ámbar Saori, gracias por tu existencia. Sí, todo fue más complejo desde tu llegada, pero sin la fuerza que me brindaste y sin el ahínco que me planteé para que ambas saliéramos a flote nada hubiera sido igual, ten por seguro que de aquí en adelante, cada uno de mis pasos será pensando en un futuro mejor para ti, te amo hija. Lo que soy y seré lo lograré para ti y para mí.

Gracias mi Buitero, eres mi alegría, mi perrito salchicha, el más hermoso, aquí sigues!!!!

Aunque me tuve que ausentar por muchas razones de mis actividades del Instituto, agradezco mucho a mis amistades, en especial a mi vecina y amiga Paola Garduño, gracias por tu amistad, por escucharme y por siempre recordarme todo lo que aún no entregaba a tiempo. Gracias Axayacatl Prieto y Josué Hernández por continuar con nuestra amistad después de que terminamos la licenciatura, gracias por seguir dándome consejos y por estar para mí aún con la distancia, los aprecio mucho. Gracias a Mateo Roldán, Óscar Álvarez y Carlos Sánchez, amistades colombianas que me apoyaron mucho a entender muchos aspectos de la energía del gradiente salino, gracias además por recibirme en Colombia. Gracias Roberto Rivera por tu gran ayuda para mis planos, te mereces más que un agradecimiento, siempre vas a contar conmigo querido amigo, ya van muchos años de amistad y espero que sean más. Gracias Alejandro Huante por toda tu paciencia y apoyo para asesorarme con todos los trámites finales, ya habrá más tiempo para colaborar.

A todas aquellas personas que se mantuvieron en contacto y que de una u otra forma estuvieron cerca durante estos años, les agradezco infinitamente. Ahora siempre para adelante!!!

## Contenido

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 1  |
| 2. MARCO TEÓRICO .....  | 3  |
| 2.1. Fuentes de energía en México: las energías renovables oceánicas como alternativa. ....                                     | 3  |
| 2.2. Historia general de los avances en la Energía por Gradiente Salino.....  | 5  |
| 2.3. Fundamento teórico para la obtención de energía por gradiente salino.....  | 9  |
| 2.4. Clasificación de métodos para generación de energía a partir del gradiente salino.....                                     | 10 |
| 2.5. Consideraciones tecnológicas y estimaciones de la producción de energía en las técnicas PRO y RED                          | 14 |
| 2.6. Gestión ambiental en México.....   | 19 |
| 3. ANTECEDENTES .....   | 23 |
| 3.1. Estudios de restricciones e impactos ambientales asociados con la implementación de la tecnología de SGE en el mundo ..... | 23 |
| 3.2. El ecoturismo y las energías renovables: una sinergia exitosa.....   | 29 |
| 3.3. Generación de energía a pequeña escala .....   | 31 |
| 3.4. Casos de microgeneración y ecoturismo .....  | 35 |
| 3.5. Hipótesis.....   | 36 |
| 3.6. Objetivo general .....   | 37 |
| i Objetivo específicos .....  | 37 |
| 4. METODOLOGÍA.....   | 38 |
| 4.1. Marco general: Evaluación de impactos ambiental (EIA) .....  | 38 |
| ii Revisión de literatura .....   | 39 |
| iii Selección de marco metodológico.....  | 40 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.2. | Caracterización de los componentes y procesos de las tecnologías SGE que pueden generar impactos ..... | 40 |
| 5.   | Área de estudio .....  | 45 |
| 5.1. | Determinación de área de estudio .....   | 45 |
| 5.2. | Ubicación geográfica y características generales.....  | 46 |
| 5.3. | Marco legal.....   | 48 |
| 5.4. | Límites geográficos y usos actuales.....   | 50 |
| 5.5. | Características bióticas y abióticas.....  | 50 |
| i    | Estructura termohalina .....   | 50 |
| ii   | Batimetría.....  | 52 |
| iii  | Hidrodinámica.....   | 53 |
| iv   | Patrones de salinidad.....   | 54 |
| v    | Potencial teórico para generación de SGE en la Carbonera.....  | 57 |
| vi   | Características hidrogeológicas.....   | 57 |
| vii  | Características biológicas .....   | 59 |
| 6.   | RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....  | 62 |
| 6.1. | Posibles impactos ambientales de la implementación de SGE: visión general.....                         | 62 |
| 6.2. | Fase de construcción .....   | 66 |
| 6.3. | Fase de operación.....   | 73 |
| 6.4. | Fase de desmantelamiento.....  | 77 |
| 7.   | Conclusiones.....  | 78 |
| 8.   | BIBLIOGRAFÍA.....  | 80 |



## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Clasificación de los métodos de SGE de acuerdo al tipo de proceso involucrado. Modificada de Cipollina y Micale, 2016.....  | 10 |
| Figura 2. Principio de la tecnología RED para la generación de SGE (Tomada de Marín <i>et al.</i> , 2020)..   | 12 |
| Figura 3. Planta de energía del gradiente salino por la técnica RED ubicada en los Países Bajos.....  | 12 |
| Figura 4. Principio de la ósmosis retardada por presión. Modificada de Aaberg et al., 2004. ....  | 13 |
| Figura 5. Principio base de la técnica de ósmosis por presión retardada en un prototipo a escala. (Tomada de Marín <i>et al.</i> , 2020).....   | 14 |
| Figura 6. Comparación de resultados experimentales de la densidad de energía resultante de la implementación de la técnica PRO durante 4 décadas para soluciones de distinta concentración salina. Resumido en Achilli y Childress (2010).....  | 15 |
| Figura 7. Evolución de la gestión ambiental en México. Tomada de Calderón, 2010. ....   | 21 |
| Figura 8. El proceso de la evaluación ambiental (Hyman & Stiffel, 1988).....  | 39 |
| Figura 9. Componentes y procesos involucrados en las tecnologías RED y PRO que pueden producir impactos ambientales en sistemas costeros. Se presentan tres compartimientos: A, B y C. Notaciones: PE (Intercambiador de presión), SE (Sistema de electrodos), AEM (Membrana de intercambio aniónico), CEM (Membrana de Intercambio Catiónico). ....  | 41 |
| Figura 10. Ubicación de la laguna La Carbonera, Yucatán, México, mostrando áreas con propiedades salinas significativas, la ubicación de los sensores CTD (puntos rojos) y los sitios propuestos para la planta de energía RED (A y B). Los polígonos SZR1, SZAE1 y SZUR6 son áreas con categorías de protección dentro de la Reserva Estatal Ciénegas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán (RECMY). .... | 48 |
| Figura 11. Salinidad registrada por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015. Los puntos de muestreo de CTD están señalados en la Figura 10 (puntos rojos), punto noroeste (NE), sureste (SE), punto boca (zona marina), punto petén (zona estuarina) y punto ojo de agua (zona de agua dulce). Tomado de Marin, 2016. ....           | 51 |
| Figura 12. Temperatura registrada por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015. Los puntos de muestreo de CTD están señalados en la Figura 10 (puntos rojos), punto noroeste (NE), sureste (SE), punto boca (zona marina), punto petén (zona estuarina) y punto ojo de agua (zona de agua dulce) .Tomado de Marin, 2016. ....         | 52 |
| Figura 13. Batimetría de la laguna la Carbonera (Marin, 2016).....  | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 14. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva con forzamiento de viento del NO. Tomada de Marin, 2016. ....   | 54 |
| Figura 15. Patrones de salinidad en la laguna la Carbonera usados como condición inicial para modelar los cambios durante la excursión de la marea (Marin, 2016). ....   | 55 |
| Figura 16. Patrones de salinidad generados durante la máxima excursión de la marea sin forzamiento de viento (Marin, 2016). ....   | 56 |
| Figura 17. Patrones de salinidad generados durante la máxima excursión de la marea con forzamiento de viento de Norte (Marin, 2016). ....  | 56 |
| Figura 18. Estresores, receptores y posibles efectos por la implementación de SGE en la laguna La Carbonera en un esquema de tres etapas (construcción, operación y desmantelamiento) para los principales componentes de las tecnologías PRO y RED. Las letras indican el número de factores estresantes según la fase del proyecto y la relación que tienen con los efectos o respuestas en los receptores. .... | 63 |
| Figura 19. Ubicación potencial de la planta de energía piloto RED en las inmediaciones de la laguna la Carbonera; las líneas punteadas indican las tuberías (Ver en Marin-Coria et al., 2021). ....  | 67 |
| Figura 20. Distribución del espacio propuesto para la planta RED y el centro de ecoturismo en la laguna La Carbonera, 5250 m <sup>2</sup> (Ver en Marin-Coria et al., 2021). ....  | 68 |
| Figura 21. Vista aérea de los pueblos alrededor de la laguna La Carbonera (se muestra el muelle como referencia). ....   | 70 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Densidad de energía obtenida bajo condiciones de laboratorio con distintas concentraciones sólo en la solución diluida para la técnica PRO. ....               | 16 |
| Tabla 2. Densidad de energía obtenida bajo condiciones de laboratorio con distintas concentraciones de salinidad en ambas soluciones de entrada en la técnica PRO. .... | 17 |
| Tabla 3. Resumen de las densidades de potencia reportadas según el material de las membranas y el grosor de los espaciadores mediante electrodiálisis inversa. ....     | 19 |
| Tabla 4. Estudios en torno a la SGE que mencionan consideraciones técnicas o ambientales para el aprovechamiento en sitios potenciales. ....                            | 24 |
| Tabla 5. Comparación de diferentes parejas redox en RED con su nivel de impacto ambiental. ....   | 44 |
| Tabla 6. Especies reportadas en la Carbonera con importancia ecológica, comercial, usos antrópicos, y bajo alguna categoría de protección. ....                         | 60 |

## RESUMEN

Las tecnologías involucradas en la generación de energía por gradiente salino (SGE, sus siglas en inglés) están evolucionando con rapidez. Sin embargo, pocos estudios se han centrado en evaluar los posibles impactos ambientales de su implementación, debido principalmente a la falta de plantas piloto en medios reales. En la presente tesis se abordan los posibles impactos ambientales de la implementación hipotética de una planta piloto de electrodiálisis inversa de 50 kW instalada en la Laguna La Carbonera, en Yucatán, México. El soporte teórico se basó en la revisión de la literatura científica disponible, sobre aspectos ambientales en torno a la energía gradiente salino. Además, se revisaron artículos científicos sobre impactos ambientales de otras energías renovables del océano. Y finalmente, se analizaron los componentes y procesos involucrados en las tecnologías de ósmosis retardada por presión (PRO) y electrodiálisis inversa (RED). Se realizó una evaluación de impacto ambiental (EIA) bajo un esquema de tres etapas (construcción, operación y desmantelamiento). Para ello se determinaron los Factores de estrés, que indican aquellos componentes de las tecnologías o procesos involucrados en ellas, que pueden generar cambios en los elementos bióticos y abióticos de los ecosistemas, denominados Receptores. A su vez, se evaluaron las posibles modificaciones a la dinámica del ecosistema (Respuestas). Dado que se trata de una planta de energía a pequeña escala, se esperan sólo impactos locales y en algunos casos temporales. Los más preocupantes son los cambios en la estructura de la salinidad y cambios en el volumen de agua de la laguna, sin embargo, pueden establecerse medidas adecuadas de mitigación. Al proponer esta planta en un espacio no adecuado dentro de la laguna, podrían generarse grandes impactos en el sistema, tales como modificaciones en los caudales y tiempos de residencia del agua de la laguna costera, provocando daños al ambiente biótico y abiótico. Pero al implementar el análisis pertinente en la EIA, se mostró que una planta de SGE bien diseñada y propuesta en el sitio adecuado, puede tener un bajo impacto ambiental y al mismo tiempo ser beneficiosa para el ecoturismo local y la conservación del ecosistema, a la par que contribuye al suministro de energía limpia y renovable.

Palabras clave: Energía del Gradiente Salino, RED, PRO, evaluación de impacto ambiental, factores de estrés, receptores.

# 1. INTRODUCCIÓN

El aumento exponencial de la población mundial, la sobreexplotación y el agotamiento de combustibles fósiles son problemáticas que centran la atención en el aprovechamiento de energías limpias (Zhao *et al.*, 2012). La mayor parte del territorio en México es abastecida de combustibles fósiles de alto costo, con un número importante de deficiencias en el suministro y diversos impactos ambientales (Cancino-Solórzano *et al.*, 2010; Alemán-Nava *et al.*, 2014). En cuanto a las energías renovables, además de la energía solar, eólica, de biomasa y geotérmica, en el país se tiene un fuerte potencial para el uso de energías oceánicas. De esta fuente se puede generar energía a partir del oleaje, de las corrientes y mareas, del gradiente térmico y del gradiente salino (Edenhofer *et al.*, 2013). Esta última es conocida desde 1950's, también es llamada energía azul, energía del gradiente salino (SGE, por sus siglas en inglés) o potencial del gradiente salino (SGP, por sus siglas en inglés) (Jia *et al.*, 2014). La energía por gradiente salino se produce cuando entran en contacto dos masas de agua con distinta concentración de sal, lo cual propicia una liberación de energía impulsada por el diferencial químico entre ambas soluciones. Al controlarse su mezcla, este potencial químico puede utilizarse para generar electricidad. Es una forma de energía potencialmente limpia que no genera gases de efecto invernadero, y puede considerarse una fuente de energía limpia y renovable si se realiza de manera controlada (de acuerdo a datos cuantitativos en sistemas naturales) que no afecten la mezcla que de manera natural se da en el ciclo hidrológico en el planeta (Post *et al.*, 2013). Existen diversas técnicas de aprovechamiento para este tipo de energía, pero las más novedosas y estudiadas hasta la fecha son la Ósmosis por Retardada por Presión (PRO, por sus siglas en inglés) y la Electrodiálisis Inversa (RED, por sus siglas en inglés) (Thor & Holt, 2009; Jia *et al.*, 2014; Cipollina & Micale, 2016).

En ambientes naturales un gradiente de salinidad puede encontrarse en sistemas costeros como desembocaduras de ríos, estuarios y lagunas costeras (Kjerfve, 1986). México posee muchos de estos ecosistemas en sus 2,900,000 km<sup>2</sup> de Zona Económica Exclusiva, que abarca: el Océano Pacífico, el Golfo de California, el Golfo de México y el Mar Caribe (Lara-Lara, 2008). Tan solo el país cuenta con más de 51 ríos principales que desembocan en la costa y más de 130 lagunas costeras y estuarios (INECOL, 2007). Dichos sistemas naturales presentan un gradiente salino debido a su conexión al mar y todos ellos están caracterizados por su importancia ecológica y gran diversidad. En el caso de particular de las lagunas costeras, estas tienen funciones como la de ser sitio de crianza para diferentes especies (peces, crustáceos,

moluscos) que las habitan de modo permanente o temporal (cíclico o estacional) y representan hábitat migratorios y de reproducción para diversas especies de aves. Estos sistemas ayudan a la protección del litoral pues representan una interfaz entre el mar y el continente que muchas veces está rodeada de mangle, además de que son sistemas con alta productividad primaria y son una fuente importante de recursos pesqueros. Brindan diversos servicios ecosistémicos como la protección ante fuerzas como el viento y el oleaje, evitando la erosión y contribuyen al filtrado de las descargas de agua del continente al mar (Barbier *et al.*, 1994; Contreras & Castañeda, 2004).

El aprovechamiento de los recursos de este tipo de ecosistemas (masas de agua de distinta concentración de sal) debe garantizar el mantenimiento de sus funciones ecológicas. Y aunque mundialmente existen muchos avances tecnológicos en las técnicas de aprovechamiento PRO y RED, hay poca información al respecto de los posibles impactos ambientales debidos a la implementación de la SGE en sistemas naturales. La literatura científica en torno a la implementación de SGE en un sitio de estudio en particular es escasa. Algunos de los primeros trabajos que abordan ciertas condiciones ambientales que deben monitorearse mencionan la cantidad de agua a extraerse (ya sea definido como caudal ambiental, factor máximo de extracción, flujo de extracción, flujo de diseño, variación anual de caudal, etc.), otra son las características físicas y químicas de las soluciones de entrada (dulce/marina etc.), manejo de calidad del agua (por cuestiones de un pretratamiento del agua) y otras características son la estructura de la salinidad y la temperatura (variaciones temporales y anuales) (Berrouche & Pillay, 2012; Karunaratne H & Walpalage, 2013; Álvarez-Silva, 2014; Álvarez-Silva *et al.*, 2014; Ortega *et al.*, 2014; Emdadi *et al.*, 2016; Álvarez-Silva *et al.*, 2016). Sólo algunos trabajos mencionan que para la implementación de SGE es necesario un análisis de posibles afectaciones al balance de sedimentos, el cuidado en el uso de productos de limpieza (que al liberarse accidentalmente representan un foco de contaminación), el cuidado y la disposición de efluentes finales y membranas (Álvarez-Silva *et al.*, 2014) y otros mencionan la importancia de estudios hidrodinámicos y de forzantes ambientales que puedan afectar la estructura termohalina y por tanto la cantidad de energía que se genera a partir del gradiente salino (Álvarez-Silva y Osorio, 2015). Pese a estas consideraciones, hay pocos estudios de caso que evalúen o al menos mencionen los posibles impactos ambientales ya que no hay suficientes dispositivos en funcionamiento en sistemas potenciales. Incluso en un estudio que propone un sitio con fuerte potencial para SGE que tiene la categoría de humedal RAMSAR y Reserva de la Biosfera (Lago Urmia) en Irán, y cuenta con especies endémicas, sólo se trabajaron a detalle las implicaciones económicas de la implementación (Emdadi *et al.*, 2016).

Dado que hay pocos ejemplos de proyectos de SGE en funcionamiento en sitios naturales, es difícil identificar los impactos reales que tienen en su ambiente. Algunos trabajos mencionan que los impactos son similares a los de plantas purificadoras, plantas de desalinización de agua de mar o plantas de de otras energías del océano (Karunarathne H & Walpalage, 2013; HydroQuebec, 2015; Seyfried *et al.*, 2019; Mendoza *et al.*, 2019; Martínez *et al.*, 2020). Estos trabajos abarcan una descripción general sobre los posibles impactos al hábitat, a la vegetación local y la fauna asociada, a la calidad del agua, a las propiedades de los sedimentos y problemas sociales relacionados con la pesca y los derechos de navegación y modificaciones hidrodinámicas (cambios en los flujos y sus direcciones y zonas de mezcla) provocados por la posición de los dispositivos o sus interacciones con el ambiente. Sólo en Seyfried *et al.*, 2019, donde también se menciona que los impactos son similares a los de una planta desaladora, se abordan estos posibles impactos, con referencia a la tecnología SGE bajo un esquema de tres fases de un proyecto: construcción, operación y desmantelamiento.

La presente tesis tiene como objetivo presentar un marco general para la evaluación de los posibles impactos ambientales debidos a la implementación de SGE en un sistema con potencial de aprovechamiento. Dicha evaluación se aborda a través de la descripción de los Factores de estrés, que son aquellos componentes o procesos involucrados en las tecnologías PRO y RED que pueden generar cambios en los elementos bióticos y abióticos de los ecosistemas (Receptores). A su vez las Respuestas son las modificaciones a la dinámica de estos elementos. Posteriormente, esta evaluación es aplicada a un sistema potencial para la generación de energía eléctrica ubicado en el estado de Yucatán: la laguna costera la Carbonera.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Fuentes de energía en México: las energías renovables oceánicas como alternativa.**

La estructura energética mexicana se compone de las siguientes energías primarias: carbón, petróleo (crudo y condensado), gas natural, energía nuclear, hidráulica, viento geotérmico y biomasa (bagazo de caña de azúcar, madera y residuos forestales). Las principales energías secundarias son el coque y los gases líquidos del petróleo, la gasolina, las naftas, el queroseno, el gasóleo, el gas seco y la electricidad. Estas energías se utilizan para satisfacer las necesidades de los sectores tradicionales de consumo

(residencial, comercial, industrial y de transporte) (Cancino-Solórzano *et al.*, 2010). Dentro de esta estructura, sólo la energía geotérmica y la hidroeléctrica tienen impacto en el país dentro de las energías renovables, pese a que el país está dotado de abundantes recursos de energía renovable.

En el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 se plantearon como objetivos el “Rescate del sector energético” pero sólo a partir de brindar impulsos desde el gobierno federal a Petróleos Mexicanos (PEMEX) y a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), enfocados en la estimulación de la competitividad, el crecimiento económico y del empleo. En cuanto a las energías renovables, la nueva política energética del Estado mexicano menciona, impulsará el “desarrollo sostenible” mediante la incorporación de poblaciones y comunidades a la producción de energía con fuentes renovables, pero no se hace alusión a cuáles ni cómo. También se menciona que estas energías renovables son fundamentales para dotar de electricidad a las pequeñas comunidades aisladas que aún carecen de ella y que suman unos dos millones de habitantes (Diario Oficial de la Federación, 2019). Y aunque esto es un argumento importante en el nuevo Plan de Desarrollo, hace falta claridad en el tipo de energías renovables que este impulsará y apoyará, ya que de esto depende en muchos sentidos el uso racional y sostenible de los recursos naturales y la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, que no se mencionan como los objetivos prioritarios.

En el país, todavía no se ha logrado aprovechar muchas de las fuentes de energía renovable disponibles en el territorio. Algunas de las razones incluyen que las preocupaciones ambientales no han sido lo suficientemente altas en la agenda del país, que el costo de las energías renovables se percibe como más alto que el de la energía convencional y que el conjunto de subsidios directos y ocultos distorsionan el mercado energético mexicano (Lokey, 2009; Cancino-Solórzano *et al.*, 2010; Alemán-Nava *et al.*, 2014). Pero a medida que la economía crezca, el nivel de vida aumente y la conciencia ambiental local progrese, la necesidad de energía limpia ciertamente ascenderá (Huacuz, 2005).

Dentro de las fuentes alternativas de energía, sólo se pondrá foco en las energías renovables de fuente oceánica (en particular a la energía generada a partir de las diferencias de salinidad). Principalmente debido al apoyo y desarrollo del mega proyecto de energías oceánicas en el Centro Mexicano de Innovación en Energías del Océano (CEMIE-O). El cual está impulsando el desarrollo científico de las energías marinas en el país a través de la colaboración de más de 40 instituciones en México.



Las energías oceánicas engloban la energía por marea y corrientes oceánicas, por oleaje y las debidas al diferencial de temperatura y salinidad. La más avanzada en cuanto al desarrollo tecnológico y sus impactos en el ambiente son las energías generadas a partir de las mareas y el oleaje (IEA, 2007; Copping *et al.*, 2016). Entre los beneficios de estas energías destacan las escasas o nulas emisiones de dióxido de carbono al ambiente (salvo en los ensamblajes de materiales).

Existen cifras que comparan la producción mundial de electricidad a partir de estas fuentes. La energía por marea (amplitud y corrientes locales) tiene un potencial mundial teórico estimado en alrededor de 1800 TWh/año, el oleaje con 29 500 TWh/año de potencial teórico y gradiente térmico oceánico, con un potencial mundial estimado de 44 000 TWh/año. Específicamente de la energía que puede extraerse del gradiente salino, a nivel mundial la producción de energía por medio de esta fuente está estimada en más de 1600 TWh de electricidad por año (Skramestro & Skilhagen, 2008). Los primeros estudios, en los años 70' del siglo pasado, la cuantificación del potencial teórico de Energía de Gradiente Salino en desembocaduras de ríos fue estimando entre 1.4 y 2.6 TW (en Álvarez-Silva *et al.*, 2016). Estudios más recientes han cuantificado un potencial teórico de 0.23 TW (Aaberg, 2003), 3.13 TW (Stenzel & Wagner, 2010) y 1.724 TW (Kuleszo *et al.*, 2010) (15,102 TWh/a, equivalente al 74% del consumo mundial de electricidad en 2011), donde sólo la última evaluación consideró la salinidad del océano cerca de las desembocaduras de los ríos (en Álvarez-Silva *et al.*, 2016).

En cuanto a consumos, en el 2017 se estimó en 164 285 TWh, por lo que el potencial energético de todas las energías oceánicas sería suficiente para suplir el 46.8 % de la demanda mundial anual. Para los años 2024, 2035 y 2050, México tiene el compromiso de disminuir el nivel de consumo de combustibles fósiles utilizados para generar energía eléctrica al 65 %, 60 % y 50 %, respectivamente. Con el objetivo de alcanzar estas metas se creó la “Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento para la Transición Energética”, que regula el uso de las fuentes de energía renovable y las tecnologías limpias para la generación de electricidad (Posada *et al.*, 2019).

## **2.2. Historia general de los avances en la Energía por Gradiente Salino**

En 1954 fue descrito por primera vez el potencial energético del gradiente salino. Pattle (1954) señaló que esta fuente de energía aún no había sido estudiada. Este autor mostró que al mezclarse irreversiblemente

un volumen  $V$  de un disolvente puro con un volumen mayor de una solución cuya presión osmótica es  $P$ , la energía libre que se pierde es igual a  $PV$ . Dado que la presión osmótica del agua de mar es aproximadamente de 20 Atmósferas<sup>1</sup>, al mezclarse ésta con el agua de un río, se pierde energía libre. Y este tipo de energía estaba aún sin explotar (Pattle, 1954). Esta fuente de energía podría ser explotada mediante fuerzas osmóticas o bien al utilizar la naturaleza iónica de la sal, mediante el uso de membranas (incorporando membranas de intercambio iónico) para separar los iones de las soluciones que promueve que dichas soluciones tengan una diferencia de potencial. Pattle diseñó un módulo con capas alternas de agua dulce y salada separadas por membranas de intercambio iónico, lo que ocasionó la presencia de dos corrientes de distinta salinidad dando un flujo neto de iones (es decir, una corriente iónica) a través de los módulos de membrana (Edenhofer *et al.*, 2013). Esta corriente se convertiría en una corriente eléctrica en un circuito cerrado externo gracias a la presencia de electrodos adecuados en los dos extremos de los módulos y en presencia de una pareja Redox adecuada. Fue entonces que las bases para uno de los métodos de generación de SGE se implementaron exitosamente: la técnica de electrodiálisis inversa (RED) (Micale *et al.*, 2016).

Durante los siguientes 20 años no se realizaron avances significativos en torno a este tipo de energía renovable. No fue hasta la crisis energética por el petróleo en 1973 que las energías renovables nuevamente tuvieron foco de atención. En 1974, Norman describió un sistema basado en el uso de membranas osmóticas. Dicho sistema constó de dos módulos, uno de agua dulce y otro de agua salada separados por una membrana semipermeable. En este sistema, el agua dulce fluye por medio de ósmosis a través de la membrana hacia el módulo de agua salada generando un cambio en la presión hidrostática debido a la diferencia de presión osmótica de las dos corrientes. Este cambio de presión hidrostática se convertiría entonces en energía mediante el uso de una turbina hidráulica y un generador. En 1975 Loeb y Norman nombraron a esta tecnología osmosis por presión retardada (PRO) (Skilhagen *et al.*, 2008).

En 2009 fue propuesto un método llamado mezclas capacitivas (CapMix), el cual hace uso de electrodos capacitivos que eliminan y acumulan iones de una solución con alta salinidad para posteriormente liberarlos al entrar en contacto con una solución de baja salinidad. Dicha técnica puede controlar el proceso de mezcla y se puede coleccionar una cierta cantidad de energía (Brogioli, 2009; Micale *et al.*, 2016).

Hoy en día diversos países están involucrados en la cosecha de energía azul. La compañía WETSUS (que es un centro de excelencia para las tecnologías sustentables del agua) después de diversas pruebas de laboratorio, desarrolló un prototipo de 20W por medio de la tecnología RED y en colaboración con la

compañía REDSTACK tienen un proyecto en Harligen que produce varios kilovatios. La compañía estima que la energía del gradiente salino podría proporcionar hasta un 7% de las necesidades energéticas globales mediante la explotación de la mitad del flujo mundial de los ríos (Berrouche y Pillay, 2012). Por otro lado, en los Países Bajos se ha llevado a cabo desde el 2014 el proyecto “Blue Energy” con WETSUS, REDSTACK y varias empresas industriales (Fujifilm, Hak, Alliander, Magneto Special Anodes), quienes inauguraron una planta RED con una capacidad nominal de 50 kW de energía utilizando el agua dulce del lago IJsselmeer y el agua salada del mar del Norte disponible en Afsluitdijk. A futuro se plantea para el mismo sitio una planta capaz de generar 200 MW, la cual tendría un costo de USD\$600 millones para la construcción (Berrouche y Pillay, 2012; Micale *et al.*, 2016).

En Noruega, durante el 2009, la compañía Statkraft, que trabaja con energías renovables, en colaboración con la Universidad de Ciencia y Tecnología de Noruega, pusieron en marcha la primera planta de energía limpia por medio de la técnica PRO en el fiordo Oslo en la localidad de Hurum. Con esta planta dieron a conocer el potencial de generación de energía a partir de la técnica PRO, con estimaciones mundiales que sugieren un potencial de producción en el orden de 1600 TWh por año (Skilhagen *et al.*, 2008; Aaberg, 2003). En esa planta funcionó a una capacidad de 10kW con reportes iniciales de densidad de potencia de 1W/m<sup>2</sup>. Sin embargo, la producción por membrana debe ser mayor a 5W/m<sup>2</sup> para hacer a esta tecnología económicamente viable (Skramestro y Skilhagen, 2008).

En cuanto a costos para ambas tecnologías, para una planta de 200 MW de RED en IJsselmeer con un costo total de construcción de aproximadamente 600 millones de dólares americanos, el costo de la producción de energía sería de USD 90/MWh. Y el costo para la tecnología PRO sería entre USD 65-125 en Tofte, Noruega.

En alianza, la empresa Statkraft (líder mundial en el campo de gradientes salinos por la técnica ósmosis por presión retardada-PRO) y la empresa HydroQuebec (productor de energía renovable en Canadá en plantas hidroeléctricas) están llevando a cabo un proyecto que tiene como principales objetivos el mejoramiento de técnicas de pretratamiento de aguas, evaluaciones de la calidad del agua en el diseño de las membranas usadas en la técnica de ósmosis y la evaluación de las repercusiones del proceso de generación de energía en el desarrollo sostenible (HydroQuebec, 2015).

Un proyecto más en la tecnología RED fue el proyecto reaPower financiado por la Unión Europea, cuyo principal objetivo fue el desarrollo del primer prototipo para trabajar en un entorno real utilizando sistemas

naturales saturados en estanques de sal (en lugar de agua de mar) y agua salobre (en vez de agua dulce). Se trata de un consorcio de 11 socios de Bélgica, Alemania, Italia, los Países Bajos, el Reino Unido y los Estados Unidos para la implementación de la tecnología RED. Dichas instituciones han logrado mayores rendimientos energéticos gracias a la salinidad de las dos corrientes que alimentaron el prototipo RED, y se encuentran trabajando en una nueva generación de membranas de intercambio iónico (IEM's) (Micale *et al.*, 2016).

La mayor parte de los proyectos hoy en día, están centrados en mejoras de las técnicas y materiales para hacer a estas tecnologías competitivas en sectores industriales y de vivienda. En cuanto al desarrollo tecnológico para las técnicas PRO y RED, se ha mencionado que el acoplamiento de dichas unidades a plantas desalinizadoras o plantas de tratamiento de agua residual (mediante la utilización subproductos), mejoraría la producción de energía por arriba de los reportes actuales y se reduciría el consumo de energías no renovables, dando paso a la apertura de nuevas perspectivas y mercados. En Japón, en 2009 el Instituto de Tecnología de Tokio encargó un prototipo de la estación generadora PRO cerca del Centro de Desalinización de Agua de Mar Uminonakamichi Nata en Fukuoka. La meta fue extraer energía del gradiente salino en la interface entre las soluciones concentradas provenientes de una planta de desalinización de agua de mar y agua dulce procedente de una planta de tratamiento de aguas residuales. Dicho prototipo fue parte del proyecto Mega-ton Water Project (2010-2013) con una capacidad de un millón de metros cúbicos al día de soluciones de ingreso (HydroQuebec, 2015). En Corea el proyecto 'Global Membrane Distillation, Valuable Resource Recovery, and Pressure Retarded Osmosis' (GMPV) está actualmente en desarrollo con el objetivo de dar a conocer una planta de desalinización híbrida (agua de mar 1 000 m<sup>3</sup>/día) acoplada a una unidad de destilación por membrana de 400 m<sup>3</sup>/día y a una unidad PRO de 200 m<sup>3</sup>/día (Cipillina y Micale, 2016).

### 2.3. Fundamento teórico para la obtención de energía por gradiente salino

La cantidad teórica de energía que puede ser extraída es igual a la variación de la energía libre de Gibbs (Micale *et al.*, 2016). Matemáticamente esto puede expresarse de la siguiente manera (1):

$$\Delta G_{\text{Mezclado}} = G_m - (G_c + G_d) \quad (1)$$

Donde  $G_c$ ,  $G_d$  y  $G_m$  es la energía libre de Gibbs de las soluciones concentrada, diluida y mezclada respectivamente. La energía libre de Gibbs se define como (2):

$$G = \sum_{i=1}^s n_i \mu_i \quad (2)$$

Donde  $\mu_i$  es el potencial químico de la especie  $i$  y  $n_i$  es el número de moles de la especie  $i$  de un sistema con un número total de  $s$  especies.

Por cada temperatura  $T$  y presión  $P$  dada, el potencial químico de la especie

$i$  es definido como (3):

$$\mu_i = \mu_i^* - RT \ln \gamma_i x_i \quad (3)$$

Donde  $\mu_i^*$ , es el potencial químico de referencia del componente  $i$ , que puede ser soluto o solvente,  $\gamma_i$  el coeficiente de actividad del componente  $i$ , y  $x_i$  es la fracción molar del componente  $i$ .

La ecuación 1 se puede reescribir sobre la base de las ecuaciones 2 y 3, conduciendo a:

$$\Delta G_{\text{Mezclado}} = RT \sum_{i=1}^s \{[(n_{i,c} + n_{i,d}) \ln(\gamma_{i,m} x_{i,m})] - [n_{i,c} \ln(\gamma_{i,c} x_{i,c}) + n_{i,d} \ln(\gamma_{i,d} x_{i,d})]\} \quad (4)$$

La ecuación 4 puede ser utilizada para el cálculo teórico de la energía que se libera durante el proceso de mezclado de dos soluciones con diferentes niveles de salinidad.

Este cálculo no toma en cuenta las variaciones inter e intra específicas en el gradiente de salinidad ni cuestiones ambientales del uso de flujos en sistemas naturales. Recientemente algunas investigaciones incluyeron algunas características propias de los ecosistemas (por ejemplo, la dinámica estuarina) y así hacer más realista el cálculo de la SGE (Álvarez-Silva y Osorio, 2014).

## 2.4. Clasificación de métodos para generación de energía a partir del gradiente salino

Las tecnologías de SGE pueden clasificarse según el tipo de proceso que utilizan para la extracción de energía en: (1) Procesos de intercambio iónico, (2) Procesos osmóticos, (3) Procesos de mezcla directa, (4) Procesos de adsorción, y desorción, y (5) Procesos basados en la diferencia de presión de vapor (Figura 1).

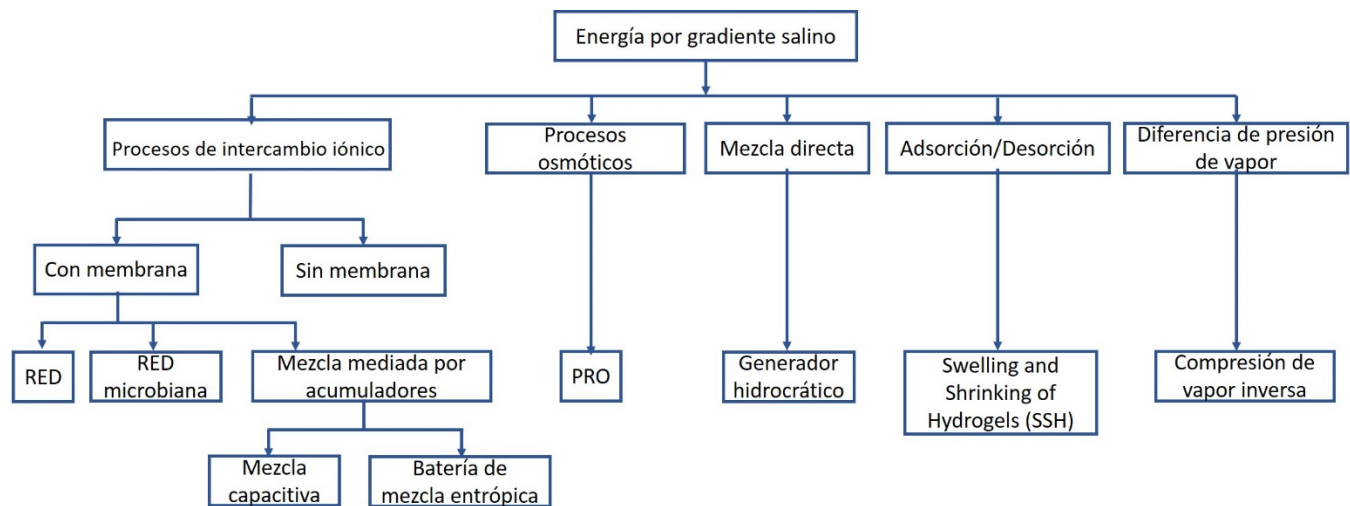


Figura 1. Clasificación de los métodos de SGE de acuerdo al tipo de proceso involucrado. Modificada de Cipollina y Micale, 2016.

Se detallarán los métodos RED y PRO que son los considerados para analizar sus impactos potenciales en lagunas costeras. Para más detalles de los otros métodos ver Cipollina y Micale, 2016. Dentro de los *procesos de intercambio iónico*, el mecanismo encargado del cambio de concentración en dos corrientes con diferentes valores de salinidad es el transporte de iones (cationes y aniones). En esta categoría se

encuentra la técnica de *electrodialisis inversa* (RED). Ésta hace uso de membranas de intercambio iónico (IEM's) que son responsables de controlar el paso de iones entre corrientes con diferente salinidad, lo que vuelve a las membranas el componente clave en el proceso de este sistema. Dichas membranas se colocan en una pila de módulos, alternando una membrana de intercambio catiónico (CEM, por sus siglas en inglés) y una membrana de intercambio aniónico (AEM, por sus siglas en inglés). La distancia que separa a las dos membranas utiliza espaciadores poliméricos que garantizan el grosor de compartimiento adecuado. Estas unidades de membrana se repiten en la pila (nombrada célula par) y contienen cuatro elementos: una CEM, una AEM, un compartimiento de solución concentrada y un compartimiento para la solución diluida (Figura 2). En la pila de membranas, el sistema tiene canales alternados por donde se controla el flujo de entrada y salida de agua con distinta salinidad. La diferencia de concentración entre ambas soluciones actúa como fuerza transportadora de los iones que pasan a través de las membranas, las cuales controlan su paso mediante su permeabilidad, es decir, los cationes (principalmente  $\text{Na}^+$ ) entran a través de las CEM y los aniones (principalmente  $\text{Cl}^-$ ) a través de las AEM, cruzando en direcciones opuestas. La corriente iónica que atraviesa las membranas es convertida en una corriente eléctrica a través de reacciones redox que se llevan a cabo en los dos extremos de la pila donde se colocan los electrodos. Las reacciones redox son posibles porque los compartimientos terminales de la pila (compartimientos de electrodos) contienen una solución de electrolito (solución de enjuague de electrodo, ERS por sus siglas en inglés) con una pareja redox adecuada (por ejemplo, cloruro de  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ) (Post *et al.*, 2007; Jia *et al.*, 2014; Micale *et al.*, 2016). Cuando no hay carga externa conectada a los electrodos (en condiciones de voltaje de circuito abierto) la diferencia de potencial químico entre las dos soluciones es contrarrestada por la tensión que surge en las interfaces de membrana y no se genera corriente iónica dentro de la pila. Actualmente el primer prototipo en funcionamiento en la tecnología red se encuentra en los Países Bajos (Figura 3).

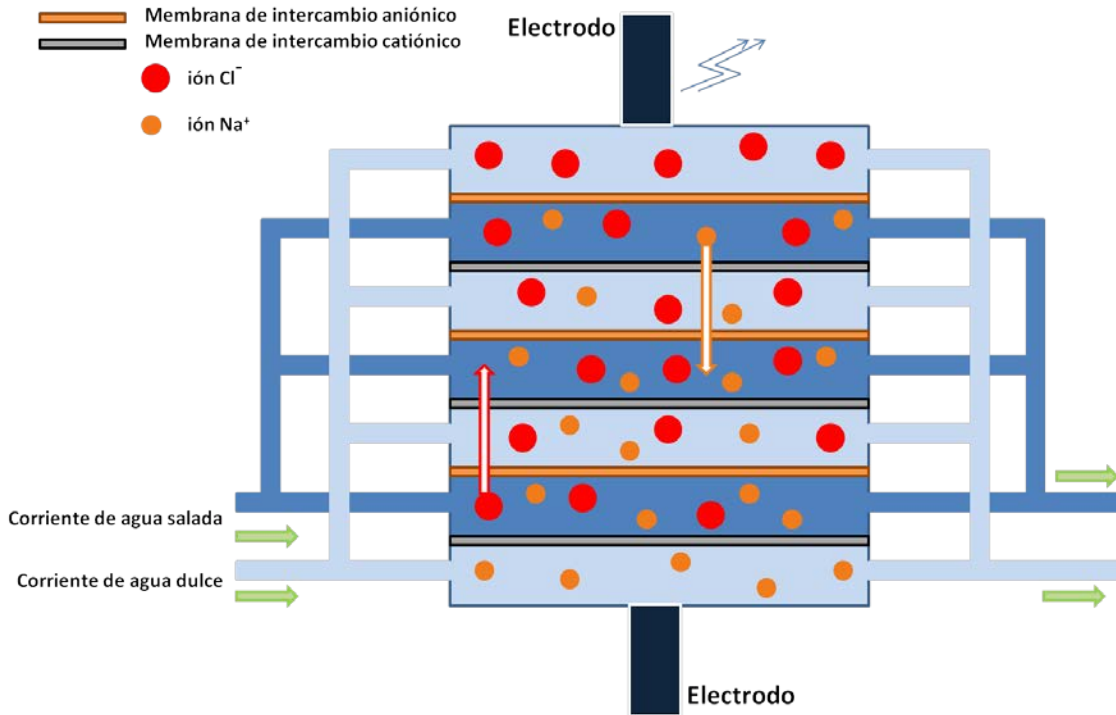


Figura 2. Principio de la tecnología RED para la generación de SGE (Tomada de Marín *et al.*, 2020).



Figura 3. Planta de energía del gradiente salino por la técnica RED ubicada en los Países Bajos.

Otra de las clasificaciones incluye el grupo de *procesos osmóticos*, donde el mecanismo responsable del cambio en la concentración salina en dos soluciones es el transporte del disolvente (por ejemplo, agua dulce). Dentro de esta clasificación se encuentra la técnica de *osmosis retardada por presión* (PRO). El proceso de ósmosis es común en organismos vivos, pero su desarrollo tecnológico en torno a su potencial en la industria de energías renovables tiene solamente de 30 a 35 años (Post *et al.*, 2007). Esta técnica se



basa en el uso de una membrana osmótica, la cual separa dos módulos que contienen dos soluciones con diferente salinidad (Figura 4). Dicha membrana es semipermeable, y sólo permite el paso del disolvente y retiene los solutos (sales disueltas); la diferencia en el potencial químico entre ambas soluciones permite el transporte de agua de la solución diluida a la solución concentrada (Achilli *et al.*, 2009; Jia *et al.*, 2014). Al retenerse las sales disueltas completamente por la membrana, el flujo del disolvente a través de esta genera un cambio de presión hidrostática que es llamado presión osmótica. El aumento de presión en el compartimiento de agua salada propicia un retraso parcial en el transporte (se opone a la fuerza del flujo). Sin embargo, una vez que se da el transporte del agua dulce de menor a mayor presión se da como resultado una presurización del volumen de agua transportado, que puede canalizarse en un flujo saliente que con una turbina hidráulica acoplada a un generador produzca energía eléctrica (Aaberg, 2003).

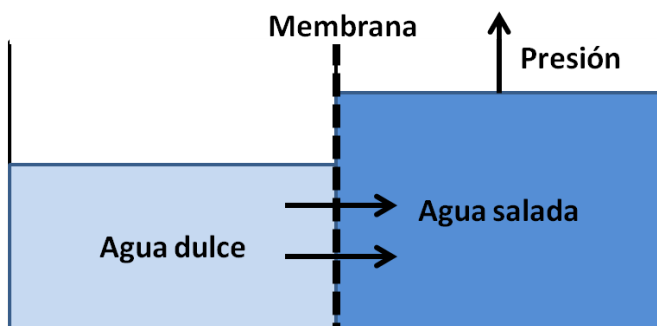


Figura 4. Principio de la ósmosis retardada por presión. Modificada de Aaberg *et al.*, 2004.

Una planta de energía por ósmosis retardada por presión cuenta un bucle de alta presión para el agua de mar y salobre y uno de baja presión para el agua de dulce. Al controlar la presión del lado de la solución concentrada, teóricamente, la mitad de la energía se puede transformar en energía eléctrica, esto es, que la presión operando en un intervalo de 11-14 bares permite la generación de 1 MW por m<sup>3</sup> de agua dulce (Figura 5). La generación de energía eléctrica utilizando este método no es directa, sino que el exceso de presión se vuelve energía mecánica y después energía eléctrica. El primer prototipo instalado a nivel mundial se encuentra en Oslo, Noruega (Aaberg *et al.*, 2004).

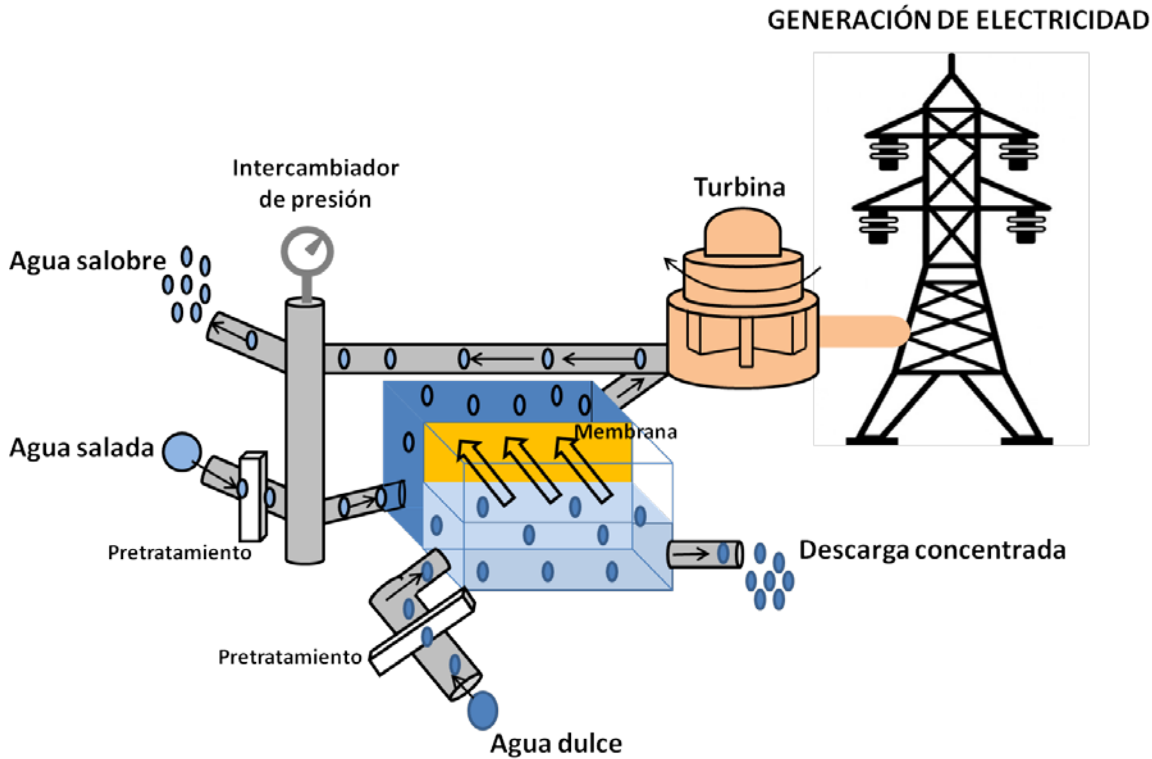


Figura 5. Principio base de la técnica de ósmosis por presión retardada en un prototipo a escala. (Tomada de Marín *et al.*, 2020)

## 2.5. Consideraciones tecnológicas y estimaciones de la producción de energía en las técnicas PRO y RED

Hasta ahora la investigación en el aspecto tecnológico está centrada en las características de las membranas usadas en ambos métodos ya que el intercambio que ocurre en éstas condiciona significativamente la energía que sale del sistema (Post *et al.*, 2007). Estas membranas suelen ser costosas, su tiempo de vida reportado en la literatura es de 7 a 10 años, sin embargo, en la práctica se sabe que es bastante menor. Dichas membranas deben ser limpiadas regularmente con agentes similares a los usados en plantas de agua potable y se espera sean de baja toxicidad para el ambiente (Aaberg, 2003). En el caso de la técnica PRO y RED, la medida de rendimiento es la densidad de potencia ( $W/m^2$ , watts por área de membrana), mientras que la energía recuperada es la cantidad de energía por volumen de solución ( $J/m^3$ ) (Post *et al.*, 2007). Debido a la cantidad de energía recuperada, la principal consideración tecnológica para

estos métodos es el uso de membranas que generen las mayores densidades de energía, que con el tiempo y los avances científicos se han ido (y seguirán) optimizando. Algunos de las consideraciones que deben tenerse respecto al uso de membranas es la “deshidratación osmótica” que es resultado de las altas presiones osmóticas (en PRO). Otros son la cavitación y la obstrucción parcial (Post *et al.*, 2007) en ambas. Y para su uso en ambientes reales uno de los más importantes ya que afecta el rendimiento de las membranas es el biofouling y la bioincrustación (Thor y Holt, 2009).

Actualmente la eficiencia de PRO está limitada por la permeabilidad de las membranas, ya que éstas aún no retienen al 100% los solutos. Y en el caso de la técnica RED, la eficiencia depende del diseño de la pila de membranas (Aaberg *et al.*, 2004).

En cuanto a la energía recuperada por la técnica PRO muestran mejorías según los avances tecnológicos en las membranas y diseño de los prototipos de laboratorio (Figura 6, en Achilli y Childress, 2010)).

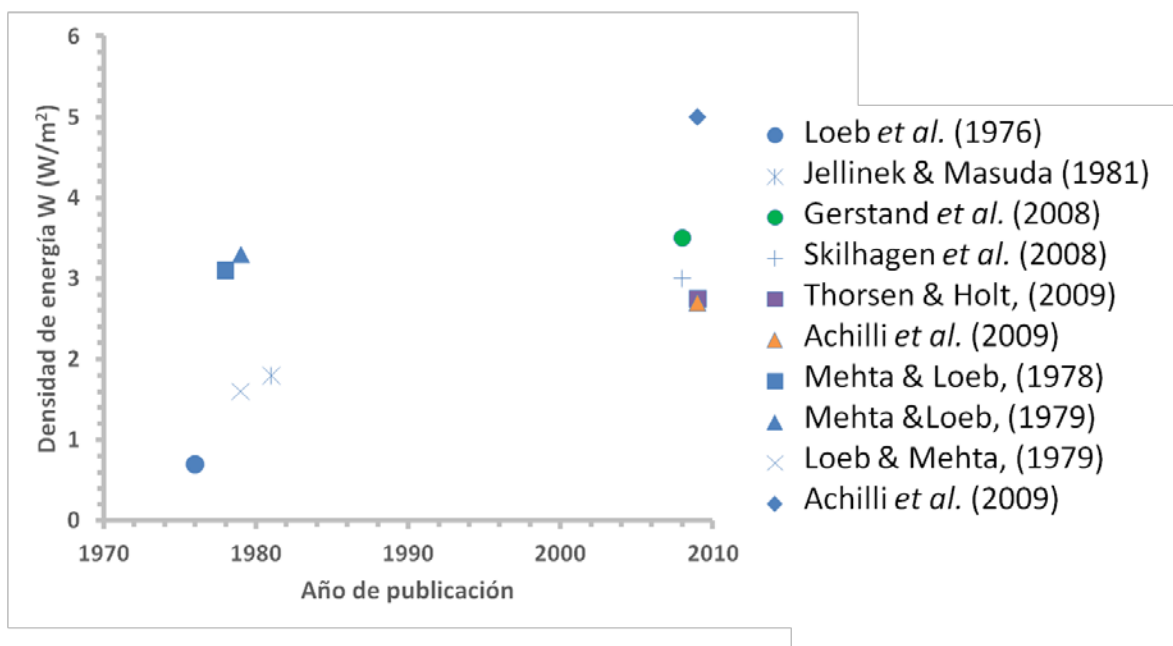


Figura 6. Comparación de resultados experimentales de la densidad de energía resultante de la implementación de la técnica PRO durante 4 décadas para soluciones de distinta concentración salina. Resumido en Achilli y Childress (2010).

La mayor parte de los avances en los últimos años en la tecnología de membrana para la técnica PRO han sido evaluados a nivel laboratorio, dando a conocer la densidad de potencia obtenida al utilizar soluciones a distinta concentración salina en la solución diluida (Tablas 1 y 2). Dentro de los reportes la menor densidad de potencia fue de 0.4 W/m<sup>2</sup> con agua dulce como solución diluida y con una membrana de fibra

hueca tipo Permasep b-10 usada en ósmosis inversa. La mayor densidad de potencia fue de 11.5 W/m<sup>2</sup> reportada en 2014 usando agua desionizada como solución diluida y una membrana TFC polietersulfona, de fibra hueca con estructura porosa esponjosa (reportado en Helfer y Lemckert, 2015).

Al usar salmueras como solución concentrada, se han reportado otras densidades de potencia usando distintos tipos de membranas (Tabla 2). Dentro de los datos reportados la mayor densidad de potencia obtenida fue de 60 W/m<sup>2</sup>, se usó como solución concentrada una salmuera al 18% de NaCl y como solución diluida agua desionizada a una presión de 48 bares como con una con una membrana TFC con malla incrustada, con soporte de separadores de alimentación (reportado en Helfer y Lemckert, 2015).

Tabla 1. Densidad de energía obtenida bajo condiciones de laboratorio con distintas concentraciones sólo en la solución diluida para la técnica PRO.

| Solución diluida         | Flujo de agua (L/m <sup>2</sup> /h) | Presión de funcionamiento (bar) | Densidad de energía (W/m <sup>2</sup> ) | Tipo de membrana   | Fuente               |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---|--|----------------------|
| Agua dulce (<0.05% NaCl) | 8.2                                 | 7                               | 1.6                                     | Membrana comercial de acetato de celulosa de Osmonics                                  | Thorsen & Holt, 2009 |
| Agua dulce (<0.05% NaCl) | 8.1                                 | 11.9                            | 2.7                                     | Membrana TFC de GKSS, Alemania   | Thorsen & Holt, 2009 |
| Agua salobre ≈0.5 NaCl   | 8.2                                 | 9.6                             | 2.2                                     | Membrana FO de triacetato de celulosa de hoja plana comercial de HTI                   | Achilli et al 2009   |
| Agua dulce (<0.05% NaCl) | N/A                                 | N/A                             | 3.5                                     | Membrana modificada de película delgada  | Achilli et al 2008   |
| Agua dulce (<0.05% NaCl) | 5                                   | 8.8                             | 1.2                                     | Membrana comercial FO asimétrica de acetato de celulosa soportada por un tejido de HTI | She et al 2012       |

Tabla 2. Densidad de energía obtenida bajo condiciones de laboratorio con distintas concentraciones de salinidad en ambas soluciones de entrada en la técnica PRO.

| Solución diluida            | Solución concentrada | Flujo de agua (L/m <sup>2</sup> /h) | Presión de funcionamiento (bar) | Densidad de energía (W/m <sup>2</sup> ) | Tipo de membrana  | Fuente                     |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---|---|----------------------------|
| Agua salobre (≈0.2% NaCl)   | Salmuera (6% NaCl)   | 16.2                                | 8.9                             | 4                                       | Membrana de triacetato de celulosa de hoja plana  | Achilli et al (2009)       |
| Agua salobre (≈0.5% NaCl)   | Salmuera (6% NaCl)   | 16.2                                | 8.9                             | 4                                       | Membrana de triacetato de celulosa de hoja plana  | Achilli et al (2009)       |
| Agua desionizada (0.0%NaCl) | Salmuera (6% NaCl)   | 18.8                                | 9.7                             | 5.1                                     | Membrana comercial FO de acetato de celulosa de hoja plana de HTI                         | Achilli et al (2009)       |
| Agua residual (≈0.5% NaCl)  | Salmuera (6% NaCl)   | 11                                  | 11.8                            | 3.6                                     | Membrana comercial FO asimétrica de acetato de celulosa de HTI                            | She <i>et al.</i> , (2012) |
| Agua de río (<0.05% NaCl)   | Salmuera (6% NaCl)   | 11.8                                | 11.6                            | 3.8                                     | Membrana comercial FO asimétrica de acetato de celulosa de HTI                            | She <i>et al.</i> , (2012) |
| Agua residual (≈0.5% NaCl)  | Salmuera (6% NaCl)   | 14                                  | 11.5                            | 4.5                                     | Membrana comercial FO asimétrica de acetato de celulosa de HTI, soportado por tela tejida | She <i>et al.</i> , (2012) |
| Agua residual (≈0.5% NaCl)  | Salmuera (12% NaCl)  | 19                                  | 12.6                            | 6.7                                     | Membrana comercial FO asimétrica de acetato de celulosa de HTI, soportado por tela tejida | She <i>et al.</i> , (2012) |
| Agua desionizada (0.0%NaCl) | Salmuera al 12% NaCl | 34                                  | 41+                             | 38.7                                    | Membrana TFC con malla tejida soportada por separadores de tela tricot                    | Lin <i>et al.</i> , (2014) |
| Agua desionizada (0.0%NaCl) | Salmuera al 18% NaCl | 45                                  | 48                              | 60                                      | Membrana TFC con malla tejida soportada por separadores de tela tricot                    | Lin <i>et al.</i> , (2014) |

Hay menos datos disponibles de la densidad de potencia producida por RED. Las membranas disponibles para electrodiálisis inversa en agua dulce y marina (con diferencia de potencial electroquímico de  $\Delta\phi=0.17$  V) podrían producir una densidad de potencia de  $0.41 \text{ W/m}^2$ . Dicha cantidad fue obtenida con membranas heterogéneamente modificadas de polietileno y espaciadores modificados químicamente. Algunos autores mencionan que las características de los espaciadores, los cuales controlan el patrón de flujo, son más importantes que las características de la membrana (Post *et al.*, 2007). En años recientes la densidad de potencia obtenida por la técnica red se ha incrementado con el uso de distintos materiales y arquitectura. Dentro de los primeros valores más altos de densidad de potencia obtenida fue el de  $1.18 \text{ W/m}^2$  (despreciando el sobrepotencial de electrodo y las pérdidas de bombeo). Cuando las pérdidas de energía son tomadas en cuenta se obtuvo una baja densidad de potencia alrededor de  $0.16\text{--}0.26 \text{ W/m}^2$ , lo cual es mucho menor que la densidad de energía deseada para una aplicación económica (Jia *et al.*, 2014). Algunos de los datos de la densidad de potencia obtenida en otros estudios (Długołęcki *et al.*, 2010; Veerman *et al.*, 2009) ha sido resumida por Jia *et al.* (2014) para la técnica RED (Tabla 3).

Tabla 3. Resumen de las densidades de potencia reportadas según el material de las membranas y el grosor de los espaciadores mediante electrodiálisis inversa.

| Membrana    |             |          |                 | Grosor (mm) | Grosor de espaciadores ( $\mu\text{m}$ ) | Agua salobre | Agua diluida | Densidad de potencia ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) |
|-------------|-------------|----------|-----------------|-------------|--|--------------|--------------|--|
| Anión       | Catión      | Compañía | País            |             |  |              |              |  |
| FAD         | FKD         | Fumatech | Alemania        | 0.082       | 200                                      | 30 g/L       | 1 g/L        | 0.93   |
| FAD         | FKD         | Fumatech | Alemania        | 0.080       | 200                                      | 30 g/L       | 1 g/L        | 1.17   |
| Heterogéneo | Heterogéneo | Qianqiu  | China           | 0.580       | 200                                      | 30 g/L       | 1 g/L        | 0.49   |
| Homogéneo   | Homogéneo   | Qianqiu  | China           | 0.250       | 200                                      | 30 g/L       | 1 g/L        | 1.05   |
| AMV         | CMV         | Asahi    | Japón           | 0.130       | 200                                      | 30 g/L       | 1 g/L        | 1.18   |
| ACS         | CMS         | Tokuyama | Japón           | 0.130       | 200                                      | 30 g/L       | 1 g/L        | 0.60   |
| AMX         | CMX         | Tokuyama | Japón           | 0.150       | 200                                      | 30 g/L       | 1 g/L        | 0.65   |
| AMX         | CMX         | Tokuyama | Japón           | 0.150       | 190                                      | 35.4 g/L     | 0.56 g/L     | 0.46   |
| AMH         | CMH         | Mega     | República Checa | 0.230-0.250 | 240                                      | 30 g/L       | 1 g/L        | 0.80   |

## 2.6. Gestión ambiental en México

En México, la política ambiental surge para contrarrestar el importante deterioro ambiental a causa del fuerte aumento poblacional junto con su demanda de recursos. Este marco ambiental se presenta en tres etapas, la primera con un enfoque sanitario, en el entendido que la salubridad es el mejoramiento de las condiciones sanitarias del ambiente natural de la población. En 1841 se instala la política ambiental con la creación del Consejo Superior de Salubridad del Departamento de México, y con la creación de un código sanitario. En 1917 se crea la Secretaría de Seguridad Pública (SSP), y en 1943 la Secretaría de Seguridad y Asistencia (SSA), las cuales se encargarían de la gestión ambiental, vigilando el cumplimiento de este código sanitario. En 1971 se crea la Ley Federal para Prevenir y Controlar la

Contaminación Ambiental, primer ordenamiento jurídico mexicano de naturaleza ambiental con disposiciones en materia de aire, aguas y suelos, y con énfasis en la contaminación de dichos elementos, y en 1972 se crea la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente (SSMA), que dependía de la Secretaría de Salubridad y Asistencia. Sin embargo, la SSMA tuvo limitaciones que hicieron que las cuestiones ambientales siguieran siendo sólo un discurso simbólico (Calderón, 2010).

Al entrar en vigor la segunda etapa de política ambiental, ésta se enfocó integralmente en la restauración y preservación del equilibrio ecológico, creándose así la Ley Federal de Protección al Ambiente en 1982 y en 1983 la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), las cuales estaban encargadas de preservar los recursos forestales, la flora y la fauna silvestres, además de contrarrestar los efectos nocivos de la industria. Posteriormente se creó la Comisión Nacional de Ecología (CONADE) para fortalecer la gestión ambiental y para establecer análisis prioritarios en materia ecológica. En 1988 se elabora la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEEGERPA), misma que hasta la fecha (con algunas modificaciones) ha sido la base de la política ambiental del país. En 1989 se creó la Comisión Nacional del Agua (CNA) como autoridad federal en materia de administración del agua, protección de cuencas hidrológicas y vigilancia en el cumplimiento de las normas sobre descargas y tratamientos del agua. En 1992 se transformó la SEDUE en la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), y se creó el Instituto Nacional de Ecología (INE), enfocado en la generación de información científica y tecnológica sobre los problemas ambientales. También se creó la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), responsable de la procuración de justicia ambiental (Calderón, 2010).

En la tercera etapa la política ambiental hasta ese momento implementada, adquiere el enfoque de “Desarrollo sustentable” dicha política plantea un mejor uso de los recursos naturales desde un enfoque integral, uniendo puntos de vista sociales, económicos y ambientales, garantizando las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias demandas. Para 1995 se crea la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) y el Programa del Medio Ambiente. En 2000 se cambió la Ley de Administración Pública Federal, dando origen a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), y al Programa Nacional del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Al crearse dichas secretarías para protección del medio ambiente y los recursos, se adoptó un nuevo diseño institucional y una nueva estructura en la que actualmente la política ambiental es una política de Estado. La SEMARNAT tiene tres subsecretarías a su cargo: la primera destinada a la Planeación y Política Ambiental, otra de Gestión



para la Protección Ambiental, y la tercera de Fomento y Normatividad Ambiental. Además de estas cuenta con el apoyo de seis órganos desconcentrados: delegaciones federales, coordinaciones regionales, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), y dos órganos descentralizados: el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). La figura 11 resume la política ambiental en México desde sus inicios hasta el 2010.

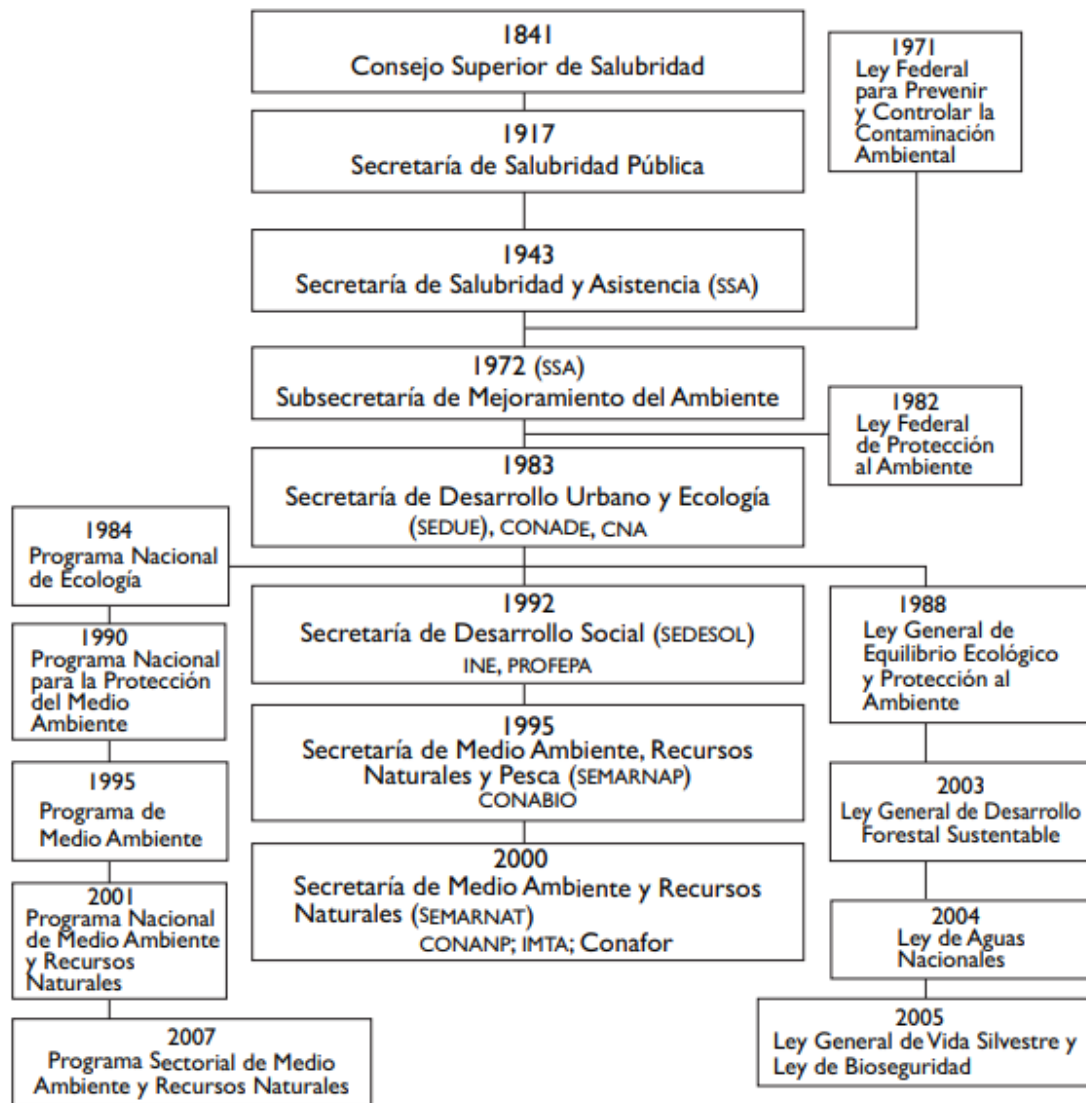


Figura 7. Evolución de la gestión ambiental en México. Tomada de Calderón, 2010.

Las políticas ambientales hoy en día aplicadas al desarrollo sustentable de cada nación, requieren la aplicación de acciones que reviertan, prevengan e identifiquen los efectos negativos provocados en el ambiente debido a acciones antropogénicas. En el plano mundial esta necesidad de reversión y prevención de la degradación ambiental creó el mecanismo de impacto ambiental (EIA, que hacen referencia al término en inglés “Environmental Impact Assessment”) promovido desde hace cuatro décadas y aceptado ampliamente a partir de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1992. De acuerdo con esto, México está trabajando también desde la creación de las Instituciones que apliquen dicha política ambiental mediante evaluaciones de impacto y riesgo ambiental (Coria, 2008).

La conjugación del término impacto ambiental hace referencia a los efectos producidos en el ambiente y los procesos naturales por la actividad humana en un espacio y un tiempo determinados. Por lo que el impacto ambiental implica los efectos adversos sobre los ecosistemas, el clima y la sociedad debido a las actividades realizadas por hombre, como por ejemplo la extracción excesiva de recursos naturales, la disposición inadecuada de residuos, la emisión de contaminantes y el cambio de uso del suelo, entre otros. Se reconocen impactos directos e indirectos (por el efecto secundario de los anteriores), que poseen tres dimensiones comunes de magnitud, importancia y significancia (Martínez *et al.*, 1999; Coria, 2008).

La complejidad de una evaluación ambiental recae en sus distintas consideraciones, las cuales deben incluir en su análisis aspectos biofísicos (la degradación de ecosistemas, la pérdida de especies, el cambio en la resiliencia, etc.), y antropogénicos (en relación con la vulnerabilidad social, la reversibilidad de impactos y las consecuencias económicas, entre otros) (Martínez *et al.*, 1999; Mendoza *et al.*, 2019). Los principales componentes conceptuales que deben formar parte de la EIA son el ecosistémico (atmósfera, hidrosfera, litosfera, biosfera), administrativo (aspectos organizativos, políticos, socioeconómicos) e investigación (básica y aplicada, monitoreo y educación ambiental); todos los componentes se interrelacionan entre sí en tres niveles de acción: global, regional y local, lo que se refleja en el esquema conceptual del desarrollo sustentable.

Por tanto, una evaluación de impacto ambiental es un estudio que sirve para predecir e interpretar los impactos, así como para prevenir las consecuencias negativas que determinadas acciones, planes, programas y proyectos pueden tener en la salud humana, el bienestar de las comunidades y el equilibrio ecológico. Dichos estudios son instrumentos indispensables para la toma de decisiones de diversos proyectos a pequeña, mediana o gran escala, sobre todo en sus etapas preliminares o de planeación, que

no deben considerarse como un obstáculo para el desarrollo, sino como un apoyo para la selección de las mejores alternativas de cada proyecto en particular, ecológicamente más sustentables. La evaluación de impacto debe responder a los siguientes objetivos: 1) detectar, identificar y evaluar los impactos ambientales de un proyecto determinado; 2) proponer las medidas necesarias para remediar o mitigar los posibles efectos negativos del anteproyecto; 3) recomendar la implementación de acciones que permitan optimizar los impactos positivos.

### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1. Estudios de restricciones e impactos ambientales asociados con la implementación de la tecnología de SGE en el mundo**

Muy pocos estudios mencionan o han evaluado los impactos ambientales del aprovechamiento energético del gradiente salino en ambientes con potencial de explotación. Los prototipos que estuvieron en funcionamiento en Países bajos y Noruega tampoco reportan los impactos ambientales asociados a este tipo de aprovechamiento. Algunos trabajos indican ciertas características que poseen los ambientes costeros que pueden ser susceptibles de cambios. Ya sea mediante la evaluación del potencial teórico de algún sitio o región en específico o proponiendo un lugar como potencial para la explotación, dichos estudios mencionan algunas de las características que son parte de la base para la determinación de los impactos ambientales por el aprovechamiento de SGE y se muestran los mencionados en cada estudio (Tabla 4).

Tabla 4. Estudios en torno a la SGE que mencionan consideraciones técnicas o ambientales para el aprovechamiento en sitios potenciales.

| Consideraciones  | Razones o motivos   | Referencia                             |
|--|---|--|
| <p>Cantidad de agua a extraerse</p> <p>Cualidades del agua dulce y salada que va a utilizarse</p> <p>Características de las membranas</p> <p>Condiciones físicas y químicas del sistema a aprovechar</p>   | <p>Estas características son necesarias para tener una planta económicamente viable</p>   | <p>Karunaratne y Walpalague (2013)</p> |
| <p>Distancias entre las tomas de agua dulce y salada</p> <p>Las desembocaduras con potencial son las que están fuertemente estratificadas</p> <p>Las desembocaduras de ríos potenciales están en zonas micromareales (<math>A &lt; 1.1</math> m)</p> <p>Las desembocaduras con descargas altas son sitios potenciales</p> <p>Calidad del agua</p> <p>Cantidad de agua extraída y Balance de sedimentos</p> <p>Definición de flujos ambientales y factor máximo de extracción</p> | <p>Debido a las pérdidas de energía transporte además del costo que implica</p> <p>La producción de energía dependerá de la estructura local de la salinidad</p> <p>La producción de energía dependerá de la estructura local de la salinidad</p> <p>Se mantiene la estructura salina y no hay grandes daños al caudal ecológico</p> <p>Se debe considerar pretratamiento (reduciendo así el biofouling y taponamiento), el pretratamiento requiere de energía</p> <p>Se pueden generar desequilibrios en los patrones de mezcla y circulación</p> <p>Se definen para garantizar las funciones de los ecosistemas, el equilibrio entre la producción de energía y la sostenibilidad ambiental</p> <p>Si se liberan accidentalmente pueden generar contaminación</p> | <p>Álvarez <i>et al.</i>, (2014)</p>   |

|   |   |                               |
|---|---|-------------------------------|
| Uso de productos químicos y de limpieza   | Especial cuidado en dónde serán descargados   |                               |
| Disposición de efluentes finales  |   |                               |
| Las desembocaduras con alto valor ecosistémico no son aptas   | En estos sitios cualquier perturbación ambiental es intolerable   | Ortega <i>et al.</i> , (2014) |
| Sistemas donde el papel de manejo de los recursos hídricos está protegido tampoco son aptas           | En algunos sitios el manejo del recurso hídrico es incompatible con la generación de SGE  |                               |
| No deben considerarse grandes distancias entre las tomas de agua                                      | Implica un gran y costoso sistema de tuberías   |                               |
| Zonas con gradiente horizontal debe considerarse el transporte del agua                               | Implica gastos y costos tanto energéticos como económicos   |                               |
| Flujos de extracción y operación son necesarios en desembocaduras                                     | La toma de agua puede tener repercusiones sobre los sedimentos, la calidad del agua, la flora y fauna                             |                               |
| Se requiere el análisis de la estructura de la salinidad  | Su variación implica variabilidad en la energía generada y además sufre cambios estacionales en cada sitio que deben considerarse |                               |
| Evaluación de parámetros físicos de la zona: caudal, temperatura y salinidad                          | La variabilidad estacional de estos cambia el potencial de producción de energía  | Berrouche & Pillay (2014)     |
| Evaluación de la variabilidad temporal de los gradientes de salinidad                                 | El gradiente influye significativamente en el potencial SGE   | Álvarez y Osorio (2015)       |
| Se requieren simulaciones hidrodinámicas de la salinidad  | Se usan para conocer las variaciones intra-anales e interanuales de la estructura salina  |                               |
| Evaluación de forzantes ambientales que cambian la salinidad (viento, descarga, flujos de calor etc.) | Estos parámetros es necesario conocerlos ya que modifican la estructura salina  |                               |

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p>Proponen un sitio que es humedal RAMSAR y Reserva de la Biosfera según la UNESCO-Lago Urmia (condiciones hiperhalinas), que además tiene especies endémicas (“<i>Artemia urmania</i>”)</p> <p>Se requieren análisis de la variación de caudales, temperatura y salinidad</p> | <p>El potencial de generación de energía en este lago es muy alto. Descargan 30 ríos en este lago. Solo se consideran los costos y no hay un análisis ambiental</p> <p>El potencial teórico varía según la temporada por los forzantes ambientales.</p> | <p>Emdadi <i>et al.</i>, (2016)</p>        |
| <p>Es necesario el cálculo del factor de extracción, la estabilidad del gradiente salino (estructura salina) y verificar que las distancias de las tomas de agua sean cortas</p>  | <p>Todas son cuestiones a considerarse para la explotación de SGE</p>   | <p>Álvarez-Silva <i>et al.</i>, (2016)</p> |

La Tabla 4 muestra algunas generalidades que son mencionadas en cada uno de los trabajos que abordan consideraciones o posibles impactos ambientales debidos a la energía del gradiente salino y serán parte de la evaluación de impactos propuesta en esta investigación. Dado que no hay plantas en funcionamiento en el mundo en sitios naturales y de las que hubo no hay reportes de impacto ambiental, la determinación de los posibles impactos se relacionará con los reportados específicamente para SGE, además de los impactos reportados para otros tipos de energías renovables oceánicas u otros usos del agua (desalinización).

Mendoza *et al.*, (2019) desarrollan a partir de la literatura, un marco diseñado para evaluar los impactos ampliamente variables de los dispositivos de energía oceánica. Utilizan una categorización de los impactos ambientales de los dispositivos de energías oceánicas (biofísicos, químicos y socioeconómicos), según la tecnología utilizada y la ubicación del dispositivo. De tal manera que su análisis sirve para la identificación de posibles impactos aplicados a otras energías renovables oceánicas.

Por otro lado, Martínez *et al.*, (2020) también a partir de la revisión bibliográfica de los impactos ambientales de las energías renovables oceánicas, proponen un enfoque sistémico para su evaluación. Consideran una metodología que toma en cuenta los efectos, los factores estresantes y los receptores que son necesarios para conocer los posibles impactos ambientales que pueden presentarse en ambientes naturales por el aprovechamiento de las energías oceánicas. De tal modo que, a través de su identificación, puedan generarse estrategias de monitoreo y mitigación para prevenir y minimizar los daños ambientales.

En cuanto a los impactos específicos de la SGE reportados en la literatura, HydroQuebec, 2015, menciona que estos pueden ser similares a los impactos de las plantas desalinizadoras de agua de mar y mencionan un listado:

- Hidrología (cambios en los caudales y direcciones actuales, cambios en las zonas de mezcla de agua dulce/agua de mar, etc.).
- Afectaciones en fauna y flora local.
- Posibles efectos del uso de productos de limpieza.
- Producción de residuos húmedos (lodos y membranas usadas).
- Impacto en el entorno de operación que se espera si un dique o cuenca tiene que ser construido para optimizar el potencial de un sitio.
- Posibles conflictos con la navegación, pesca, etc.
- La topografía y geomorfología (erosión de la costa, deslizamientos de tierra etc.).

- Sedimentología, propiedades del sedimento del lecho del río y lecho marino (desplazamiento de sedimentos, aumento de la turbidez, compactación del suelo)
- Calidad del agua (vertidos químicos y de aguas residuales)

Papapetrou y Kumpavat, (2016) presentan también aspectos considerados para la implementación de SGE, en este caso ambientales y económicos. Ellos destacan los posibles impactos respecto a la toma de agua, la disposición de efluentes finales, impactos asociados con la infraestructura y matizan algunos posibles impactos positivos de esta tecnología.

Del mismo modo, Seyfried *et al.*, (2019) menciona que los impactos son similares a las desalinizadoras, pero propone un esquema de identificación de posibles impactos para la tecnología del gradiente salino. Su trabajo categoriza los impactos de SGE en tres fases: construcción, operación y desmantelamiento. Y de acuerdo a un análisis de estresores y efectos, mencionan los posibles impactos ambientales por el aprovechamiento del gradiente salino. Dentro de su análisis, la fase de construcción y desmantelamiento son las que más efectos negativos tienen en el ambiente. Estos impactos son la perturbación del hábitat y los organismos a través del ruido, la modificación de la tierra y la liberación de contaminantes. En la fase de operación los impactos están asociados al alto ingreso de agua de alta y baja salinidad que puede provocar impactos negativos, además de su salida de la planta que puede provocar modificaciones en el sitio de descarga. Esta revisión resalta áreas de preocupación y faltas de conocimiento, que pueden guiar la evaluación del impacto ambiental y las prioridades de monitoreo para la implementación de SGE en futuros trabajos.

Todos estos estudios son la base para realizar una categorización de los componentes afectados de los sistemas potenciales para el aprovechamiento de SGE. Los impactos asociados a la implementación de esta energía son complementados en la presente tesis y se aplica un marco de evaluación de impactos anteriormente propuesto para otras tecnologías (Boehlert y Gill (2010) a un sistema costero potencial para la generación de SGE. Además, se genera una propuesta de utilización de energía renovable y ecoturismo, de tal manera que se minimicen los impactos negativos de la implementación y se generen estrategias de mitigación, conservación y utilización de la energía.



### 3.2. El ecoturismo y las energías renovables: una sinergia exitosa

Para establecer la sinergia propuesta en este trabajo entre dos campos disciplinarios de distintas áreas, pero con intereses en común, es primordial poner en contexto las definiciones de ambos, además de exteriorizar las problemáticas que ataca cada campo. Por un lado, se aborda el concepto de *ecoturismo*, que hace frente al concepto de turismo convencional o conocido también como el modelo de “sol y playa”, el cual es un producto propio de la sociedad urbana e industrial cuyas características principales son entre otras un turismo de gran escala, concentrado desde el punto de vista de la oferta y masificado desde el punto de vista de la demanda. Este tipo de turismo ha generado diversas problemáticas entre las que destacan la contaminación de espacios naturales (por la generación de residuos sólidos, por el uso excesivo de combustibles) la destrucción de ecosistemas naturales por el desarrollo de infraestructura urbana (de alta demanda), deterioro de la calidad del aire y del agua (por uso de productos químicos, o las descargas de aguas residuales a gran escala etc.), entre otros (García, 2000).

El *ecoturismo* en cambio se define como un viaje a destinos naturales que minimiza el impacto del turismo convencional (turismo de masas) y crea conciencia ambiental en los turistas y los residentes; provee beneficios económicos para la conservación y para el empoderamiento de la población local, respetando su cultura y apoyando los derechos humanos y movimientos democráticos (Carrillo *et al.*, 2017). A este concepto se le agregaron tres dimensiones, una social, una ecológica y una económica, dando así la pauta a un gran número de definiciones que son manejadas hoy en día. En términos generales, el ecoturismo tiene estos objetivos: la conservación, la educación ambiental, la sustentabilidad, la distribución equitativa de beneficios y una responsabilidad ética (tanto para turistas como para la población) (Coronado, 2016). Un sitio con potencial para realizar ecoturismo debe tener los activos naturales, ambientales y culturales en su territorio, de tal modo, que estos puedan ser aprovechados para diversificar las actividades locales en favor del progreso de la población local.

Por otro lado, el término *energías renovables* se contraponen con las energías convencionales, que son de origen fósil y se caracterizan por ocasionar daños en el medio ambiente; agotarse en el tiempo; tener precios ambientalmente altos, dadas las características del producto y el mercado (específicamente la escasez relativa de naciones productoras y la demanda mundial creciente) y contribuir a la contaminación por emisión de gases de efecto invernadero, que finalmente son aspectos que ocasionan un detrimento en las condiciones de vida del ser humano. Sin llegar a decir que esos efectos no existen en las renovables,

sí es cierto, en cambio, que son substancialmente menores y reversibles (Castilla, 2014). Las *energías renovables* en cambio, se producen de forma continua y son inagotables a escala humana (aunque habría que tener cuidado con los ciclos en la energía proveniente de la biomasa). Además de que los efectos ambientales comparados con el uso de combustibles fósiles son bastante menores. En esta tesis se pone foco a una energía renovable de fuente oceánica (particularmente la energía de gradiente salino) expuesta en el apartado 2.1 y 2.2.

De acuerdo a lo anterior, una manera para hacer frente a algunas de estas problemáticas en sitios con atractivos naturales y con escaso acceso a fuentes de energía es diversificar las actividades convencionales. Así, al implementarse enfoques que conjunten actividades como el ecoturismo y la generación de energía renovable se generarían beneficios tanto de protección de la naturaleza como a la población local. Lo cual finalmente crea una sinergia entre el ecoturismo y las fuentes de energía renovable, de tal manera que se crea una estrategia que contribuye al desarrollo sustentable y a la protección de recursos en zonas con alta riqueza biológica.

Bajo este contexto, las energías renovables, por sus características, cumplirían con los criterios que permiten contribuir a la sustentabilidad del desarrollo, debido a que son inagotables o permiten su renovación en periodos cortos de tiempo; son menores los daños a los ecosistemas y ambientes naturales, y en la gran mayoría de los casos se trata de recursos propios por lo que se reduce la dependencia energética respecto de terceros países y además se contribuye a la generación de riqueza y empleo a los hogares. Por otro lado, la contribución del ecoturismo al desarrollo local de una comunidad hace que esta actividad sea una de las apuestas más importante de no pocos países en el mundo. La actividad turística no es sólo una fuente de ingresos que genera crecimiento económico, sino, es un motor de progreso para la población, ya sea en entornos rurales, urbanos, silvestres o de sol y playa (Castilla, 2014).

De acuerdo a esta sinergia entre renovables y ecoturismo, se debe planificar la oferta de los activos naturales del territorio (el uso de espacio y recursos naturales); la infraestructura y logística (edificaciones, insumos para el turismo, gestión de número de visitantes, o alimentación) y el cuidado de los ecosistemas (reducción de contaminación, emisión de gases, tecnologías limpias, utilización de fuentes renovables de energía). El ecoturismo debe generar oportunidades para la comunidad anfitriona (la población local y regional), de manera que se maximicen los impactos positivos y se eviten, o reduzcan al mínimo, los impactos negativos y, si esto no se logra, puedan ser compensados de forma adecuada. Y del mismo modo

la implementación de una energía renovable no debe comprometer los activos naturales de la región y debe minimizar impactos ambientales negativos además de generar beneficios (Castilla, 2014).

Es importante mencionar que esta sinergia propuesta entre energías renovables y ecoturismo debe ajustarse a cada sitio en particular, dado que lugares con alta riqueza biológica no pueden optar por grandes plantas de energía renovable, ya que los recursos naturales atractivos para el ecoturismo pueden estar en riesgo. Para esto debe tenerse en cuenta la escala de la generación de energía eléctrica.

### **3.3. Generación de energía a pequeña escala**

Hoy en día las energías renovables han apostado por la producción de energía a gran escala, esto principalmente se debe a las economías escala, y a los aún altos costos en la producción y promoción de este tipo de energías. Sin embargo, esto no siempre es posible o incluso deseable. Al enfocarse la capacidad de producción de energía en un menor número de plantas, pero de mayor tamaño, los costos de distribución aumentan para llegar a clientes periféricos, además de que deben considerarse las pérdidas de dicha distribución en líneas largas. En algunas ubicaciones remotas, proporcionar una conexión al sistema de red de distribución puede no ser práctico ni económicamente viable. Las instalaciones que aprovechan los recursos renovables deben ubicarse donde el recurso esté disponible, y por su naturaleza, el tamaño de estas instalaciones está limitado por la magnitud del flujo de energía disponible (Planta generadora de electricidad a pequeña escala, 2021). Además de que deben considerarse diversos aspectos del ecosistema (bióticos y abióticos) para evitar impactos negativos en zonas con potencial para el aprovechamiento de recursos renovables.

Aunque hoy en día existen pocos casos de generación a pequeña escala en el mundo, y aún este término se está consolidando, la escasa literatura menciona los términos *small scale generation* u *Off Grid Solutions* (Heinz, 2014), *microgeneración* (Lastra *et al.*, 2012) o en algunos casos concretos donde las zonas remotas son islas se menciona *small-island power systems* (IRENA, 2018). Y aunque los intervalos para hablar de generación a pequeña escala no están completamente definidos, es un hecho que la producción no excede 1 MW en ningún caso.

En el caso del aprovechamiento de energías renovables a pequeña escala en sistemas naturales, se debe tener en cuenta que los elementos para capturar los flujos de energía son intermitentes y notoriamente impredecibles, además de estar sujetos a grandes variaciones en su intensidad cuando la energía está disponible (Heinz, 2014; IRENA, 2018). Lo cual finalmente es una problemática en la producción y suministro final de la energía.

Del mismo modo, ya que el número de consumidores es pequeño, es probable que la carga también esté sujeta a grandes cambios en la demanda. Además, aunque la energía puede estar disponible, la pequeña escala de las operaciones limita la cantidad promedio de energía que se puede capturar y la naturaleza diversa de los métodos necesarios para convertirla en energía eléctrica útil resultan en eficiencias de conversión bajas (Planta generadora de electricidad a pequeña escala, 2021).

Este tipo de sistemas de generación a pequeña escala, basan su complejidad en el suministro de energía y en si están conectados a la red o son sistemas independientes.

#### Sistemas conectados a la red

Los sistemas conectados a la red generalmente están diseñados para aprovechar alguna fuente de energía disponible localmente con energía de reserva proveniente de la red durante períodos de alta demanda. Debido a la conexión a la red, la red puede suministrar energía si la fuente local falla o es insuficiente para satisfacer la demanda, por lo que los sistemas conectados a la red no necesitan baterías de almacenamiento o sistemas de respaldo de emergencia. Los sistemas muy grandes suelen estar conectados a la red y suministran energía solo cuando está disponible; de lo contrario, la demanda se satisface con otras fuentes conectadas a la red.

#### Sistemas autónomos (fuera de la red)

Los sistemas de generación autónomos son necesarios para suministrar energía eléctrica a ubicaciones remotas donde la conexión a la red no es posible o es inconveniente o para proporcionar un respaldo de energía en caso de suministros no confiables de la compañía eléctrica.

Existe una amplia gama de métodos para generar electricidad de forma completamente independiente de una infraestructura de red. En la literatura se mencionan algunos métodos económicamente favorables e interesantes para áreas rurales y remotas (Heinz, 2014).

1. Generadores diésel: son un método excepcionalmente versátil y robusto para proporcionar cantidades moderadas de generación eléctrica. Desde generadores de respaldo críticos en hospitales y plantas de energía nuclear hasta locomotoras y barcos diésel-eléctricos, la alta relación potencia / peso y la confiabilidad de los generadores diésel los ha hecho muy populares. El combustible es relativamente común y puede estabilizarse, y tiene una alta densidad energética volumétrica y ponderal. [5] Sin embargo, existen algunos inconvenientes graves en los generadores diésel para la electrificación rural fuera de la red. El mantenimiento no es trivial, especialmente cuando es posible que no haya piezas de repuesto disponibles. Por último, los generadores suelen ser ruidosos, altamente contaminantes y de baja eficiencia general.
2. Micro/pico-hidro: Los desarrollos recientes han hecho que la antigua tecnología de la energía hidráulica sea más útil para la energía eléctrica a pequeña escala fuera de la red. Estos sistemas varían en tamaño desde  $\sim 100\text{W}$  a  $\sim 10\text{kW}$ . Los sistemas más pequeños se basan en ruedas de paletas simples acopladas a generadores estándar, como alternadores de automóviles modificados o bombas impulsadas en reversa. Es posible que solo requieran inmersión en una corriente que se mueva rápidamente, o posiblemente una tubería simple para generar presión de agua adicional con un descenso controlado. La cantidad de energía proporcionada por estos generadores es suficiente para recargar pequeños dispositivos electrónicos que funcionan con baterías, como teléfonos móviles y linternas LED. Las plantas microhidráulicas más grandes requieren una pequeña presa (a menudo construida con materiales disponibles localmente) y pueden proporcionar energía para electrodomésticos como refrigeradores y computadoras de escritorio. Tanto la generación hidroeléctrica pequeña, como las de tamaño más grande, padecen un problema crítico: dependen de un flujo constante de agua. Sin el amortiguador proporcionado por una gran presa, estos generadores pueden fallar durante épocas de estiaje o estación seca. Por lo demás, son bastante respetuosos con el medio ambiente, fáciles de mantener y no requieren combustible.
3. Solar: una opción obvia para suministrar electricidad a áreas remotas y aisladas es la energía solar fotovoltaica. Con la reciente reducción en el costo de los paneles solares, la electricidad solar se ha vuelto bastante asequible y accesible. [8] La potencia máxima irradiada por energía solar es superior a  $1\text{ kW/m}^2$ , y aunque los paneles solares baratos tienen una eficiencia modesta ( $\sim 12\%$ ), todavía es posible aprovechar una cantidad considerable de energía con esta tecnología de estado sólido. La electricidad solar tiene las claras ventajas de no necesitar combustible y de un mantenimiento sencillo. Un sistema solar de corriente continua básico puede durar más de 20 años.

Por supuesto, la energía solar solo está disponible durante el día, e incluso el mal tiempo puede hacer que un sistema sea casi inútil. Este problema se puede evitar con el almacenamiento de energía, pero es difícil y costoso.

4. Eólica: aunque el despliegue a gran escala de turbinas eólicas ha avanzado considerablemente en las últimas décadas, la energía eólica no ha tenido un impacto significativo en la electrificación rural y remota, especialmente en áreas afectadas por la pobreza. La tecnología básica ha existido durante un tiempo considerable, ya que las turbinas eólicas a pequeña escala son de uso común para proporcionar energía a vehículos marinos de recreo y algunas casas de alta gama fuera de la red. La relativa complejidad, el alto costo y la generación inconsistente hasta ahora han restringido la aplicación de la energía eólica en la electrificación rural ya que simplemente es demasiado alto para estas regiones económicamente desfavorecidas.

Otro aspecto a considerar para proporcionar energía bajo demanda de fuentes intermitentes y fuera de la red es que es necesario el almacenamiento de energía, principalmente por tres razones:

- Almacenamiento de energía para su uso cuando no se dispone de energía de la fuente principal (solar, eólica, etc.).
- Creación de un suministro de corriente alterna (CA) regulado limpio para el consumidor desde una fuente no regulada a través de un enlace de corriente continua (CC) regulado.
- Como amortiguador para hacer coincidir los suministros intermitentes con las demandas máximas.

Por otro lado, los sistemas autónomos deben tener en cuenta también que su dimensionamiento es más crítico; demasiado grande y el sistema es innecesariamente costoso y quizás antieconómico; demasiado pequeño y el usuario sufrirá cortes de energía. Por lo tanto, los sistemas fuera de la red deben ser capaces de soportar cargas máximas y, en el caso de la energía solar y eólica, períodos prolongados en los que no se dispone de entrada de energía externa. Esto requiere baterías con suficiente capacidad de almacenamiento para cubrir los períodos de escasez y capaces de entregar suficiente energía, junto con el generador, para satisfacer las demandas de energía pico. Sin embargo, cualquier exceso de capacidad es un desperdicio (Planta generadora de electricidad a pequeña escala, 2021). La capacidad de manejo de energía de la batería debe ser suficiente para satisfacer la demanda máxima más un factor de seguridad de aproximadamente el 30%. Ya que esta energía debe ser suficiente para mantener el suministro eléctrico cuando la energía local (sol, viento o agua) no esté disponible. El período sin recarga de energía local

podría ser de hasta dos o tres días y, a menos que haya alguna forma de desconexión de carga, la batería debería poder suministrar la carga completa requerida para ese período. Una vez más, sería prudente un factor de seguridad de al menos un 30% de capacidad adicional; sin embargo, no es inusual una capacidad de almacenamiento de tres a seis días (Planta generadora de electricidad a pequeña escala, 2021). Por lo que en estos aspectos todavía debe trabajarse en los sistemas autónomos.

Bajo este contexto, la incursión de México en el aprovechamiento de la energía del gradiente salino podría traer grandes beneficios. Por un lado, se aprovecharían recursos renovables disponibles para generar energía a pequeña escala, y por otro lado se brindaría acceso a la electricidad donde su suministro es limitado. Por lo que esta sinergia entre renovables y ecoturismo puede ser una opción exitosa.

### **3.4. Casos de microgeneración y ecoturismo**

A nivel mundial, las experiencias relevantes de energías renovables en el turismo comunitario no son recientes, y aunque los beneficios, generalmente son mayores que los efectos negativos, no han sido una gran apuesta. Por ejemplo, en Reino Unido (Cemmaes, centro de Gales), se encuentra un parque eólico abierto a visitantes nacionales y extranjeros. Los beneficios han sido positivos, sin embargo, ha habido descontento por los ruidos de las turbinas que afectan a las personas y se interponen en la ruta de algunas aves. En España, una iniciativa de la empresa privada para la Localidad de Laviana en Asturias ha permitido que las casas rurales estén equipadas con paneles solares y estufas de biomasa para la calefacción y calentamiento de agua sin hacer uso de fuentes fósiles (Rodríguez, 2011 en (Castilla 2014)). El beneficio ha sido positivo, tanto para los visitantes y turistas como para las comunidades aledañas y el medio ambiente.

En Ecuador, a través de la Empresa Privada (Canodros S.A.) y la Federación Nacional Achuar se llevó a cabo un proyecto para instalar 64 paneles solares de 75W en sitios remotos de la Amazonía Ecuatoriana, específicamente en la reserva ecológica Kapawi Ecolodge para cubrir las necesidades eléctricas del lugar en un 60%, beneficiando de esta forma a los grupos indígenas de la comunidad achuar quienes fueron capacitados para garantizar la operatividad de la reserva, del hotel y de las instalaciones. Toda la infraestructura está dispuesta de modo que garantice el mínimo impacto al medio ambiente, el ahorro en el uso de los recursos naturales, y la convivencia armoniosa con la población local. Los visitantes

participan de las actividades de la comunidad achuar, aprendiendo la cultura y la elaboración de las artesanías (Del Barco, 2010 en (Castilla 2014)).

Las islas Galápagos declaradas patrimonio de la humanidad por la UNESCO 1979 y Reserva de la Biosfera (1985) constituyen un ecosistema muy importante a nivel mundial que se encuentra protegido como parque nacional de Ecuador desde el 1959. Uno de los factores de riesgo para la sustentabilidad ambiental de esta isla estaba en el uso de diésel para generación de energía eléctrica, el cual, al ser transportado por vía marítima, los eventuales derrames del combustible contaminaban los recursos naturales. Estos aspectos y el inadecuado manejo en la gestión de la isla dieron como resultado que estuviera bajo riesgo ambiental. Varias han sido las iniciativas para mejora y mitigación de riesgos, en las que han participado el gobierno nacional y local y la comunidad. Una de ellas, la inversión en energía eólica a partir de molinos de viento y energía solar a partir de paneles solares que favorece y mejora las condiciones para el turismo local y la preservación del medio ambiente en la zona. Además de la comunidad de las Islas Galápagos, entre los beneficiados también se cuentan los visitantes que practican el ecoturismo en la isla. Otra apuesta es el programa ENER GAL de cooperación alemana que hace parte de la iniciativa del Gobierno ecuatoriano y la comunidad local de “Cero combustibles fósiles en las Islas Galápagos”, una política que pretende reemplazar hasta el 2020, el uso de derivados del petróleo por energías renovables (Heinemann, 2014 en (Castilla 2014)).

En México, se han realizado algunas iniciativas de microgeneración energética como estrategia del desarrollo rural para contribuir a mejorar el estado de los recursos hídricos. Se cuenta también con la instalación de sistemas solares y eólicos bajo la participación activa del gobierno nacional y local. Por ejemplo, se instaló un sistema eólico (YumBalam) en la costa norte de Yucatán que provee energía a las cabañas de estilo maya dispuestas para fines turísticos y favorece a los visitantes que practican ecoturismo (Romero, 2006 en (Castilla 2014)).

### **3.5. Hipótesis**

La aplicación de un marco para la evaluación de los posibles impactos por la implementación de SGE en un sistema costero en particular en el país, complementado con estrategias de mitigación, ocasionará que



los daños ambientales sean menores comparado con los beneficios sociales y económicos que la planta SGE podría generar.

### **3.6. Objetivo general**

Evaluar los posibles impactos ambientales de la implementación de una planta de SGE en una laguna costera del país.

#### **i    Objetivo específicos**

- Pre-evaluar los sistemas potenciales para aprovechamiento de energía por gradiente salino en el país para seleccionar el que se estudiará a detalle.
- Identificar los cambios que las tecnologías actuales de aprovechamiento generan en los ecosistemas.
- Identificar de todos los posibles impactos que la implementación de SGE tiene en ambientes costeros.
- Identificación de los principales procesos y componentes de una planta SGE que generan impactos.
- Clasificar las características de un ambiente costero que pueden sufrir alteraciones debido a la implementación (elementos bióticos y abióticos).
- Identificar el tipo de tecnología que puede ser más conveniente para evitar daños en el ambiente ante la posible implementación de una planta SGE en ambientes costeros.

Una vez seleccionados el sitio:

- Aplicar la evaluación de impactos ambientales potenciales al sistema costero elegido como caso de estudio.
- Caracterizar el sistema costero de acuerdo a todas las variables que se usaron en la metodología.

- Proponer medidas de mitigación, prevención y conservación ante los posibles impactos negativos que la tecnología de gradiente salino tiene en sistemas costeros.
- Proponer estrategias conjuntas que se beneficien de la producción de energía y la protección al ambiente.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1. Marco general: Evaluación de impactos ambiental (EIA)**

Los trabajos presentados como antecedentes fueron analizados a fin de revisar cuáles son los impactos que han sido mencionados o evaluados en la literatura y que sirven como guía para desarrollar la presente EIA. La primera parte de la metodología que se aplicó se basó en el proceso de una evaluación de Impacto Ambiental (Hyman & Stiffel, 1988). Como primer paso, una EIA requiere del análisis de aquellas acciones que ponen en riesgo los componentes de un ecosistema, lo cual está representado por la implementación de una planta de SGE en la Carbonera. La instalación y operación de una planta SGE generará respuestas sobre ciertas características de los ecosistemas costeros potenciales, y estos fueron categorizados de acuerdo a la revisión de literatura en características físicas, biológicas y químicas etc. Finalmente, los impactos ambientales están asociados a las respuestas que tienen todas estas características de los ecosistemas ante su modificación o perturbación por diversas acciones. Y dichas respuestas o cambios fueron evaluadas a fin de establecer medidas que minimicen los impactos negativos (Figura 8). Además de que se generen estrategias de aprovechamiento conjunto.

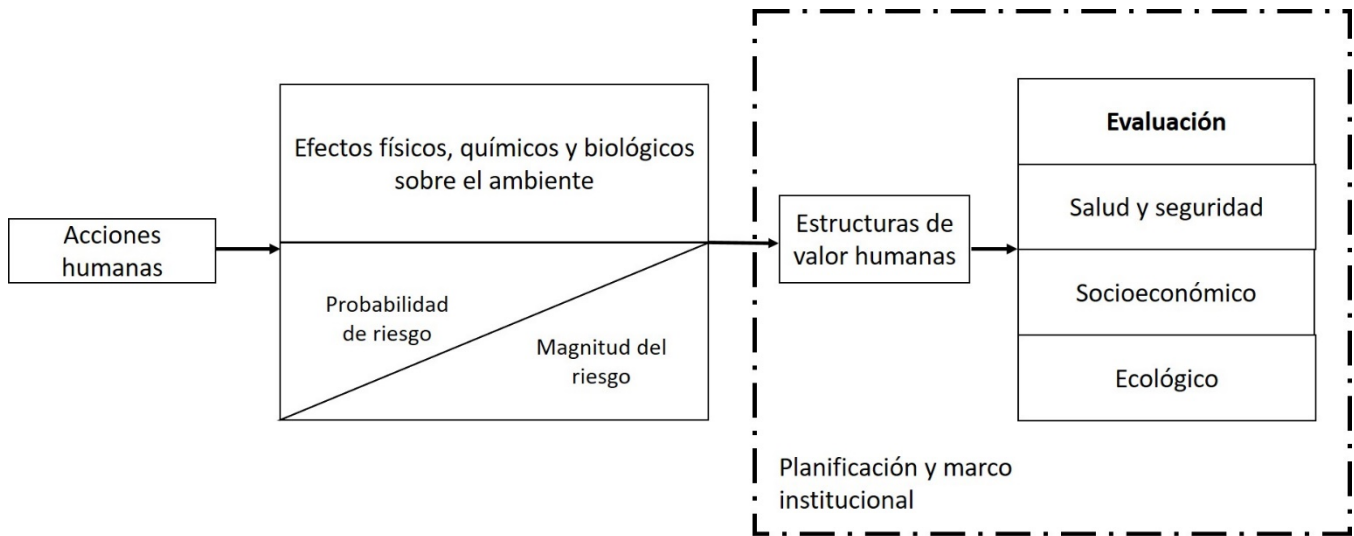


Figura 8. El proceso de la evaluación ambiental (Hyman & Stiffel, 1988).

## ii Revisión de literatura

La identificación de impactos se basó en la literatura científica, de acuerdo a los trabajos específicos de impactos de la tecnología de gradiente salino de Papapetrou y Kumpavat, (2016) y Seyfried *et al.*, (2019), se complementaron los impactos con los trabajos más recientes que abordan los impactos de otras energías renovables oceánicas de Mendoza *et al.*, 2019 y Martínez *et al.*, 2020 y se adicionaron los analizados en esta tesis. Uno de los grandes frenos a la evaluación de los impactos en el ambiente de SGE es que hay un número muy limitado de plantas instaladas en zonas costeras y sus datos acerca de los impactos son manejados cautelosamente. Por lo que los posibles impactos son identificados a partir del análisis de los componentes principales de dos de las tecnologías más desarrolladas a nivel mundial para plantas de SGE, PRO y RED y del análisis del funcionamiento e interacciones que tiene las variables de los sistemas costeros (físicas, bióticas, químicas, etc) con la tecnología SGE. Si bien este apartado muestra la secuencia metodológica llevada a cabo, es también un resultado de la investigación.

### iii Selección de marco metodológico

La metodología de evaluación de impactos ambientales de SGE en zonas costeras debe permitir identificar, predecir y evaluar los impactos ambientales del proyecto. Para el análisis de los impactos de la implementación de SGE en la laguna la Carbonera se aplicó el marco de clasificación de Boehlert y Gill (2010) propuesto para la evaluación de impactos de otras energías renovables oceánicas. Se decidió realizar el análisis de impactos en tres fases: construcción, operación y desmantelamiento, a fin de evaluar un proyecto de SGE en la laguna La Carbonera, de principio a fin. La evaluación de impactos se abordó considerando los factores de estrés, los receptores y las respuestas e impactos ambientales.

Dentro de este marco, los factores de estrés son aquellas características del entorno que pueden cambiar debido a la implementación de SGE considerando la construcción, operación y desmantelamiento, es decir, todos aquellos procesos y componentes asociados a los dispositivos de energía oceánica, para este estudio, de las tecnologías PRO y RED. Los receptores son elementos del ecosistema con potencial para alguna forma de respuesta al factor estresante, éstos incluyen los diferentes niveles de organización biológica (individuos, poblaciones, comunidades y ecosistemas) e incluyen procesos bióticos, como interacciones de especies y redes tróficas. Los receptores también comprenden los elementos abióticos del medio ambiente, como la costa, la columna de agua y el fondo del océano etc. Los efectos o respuestas son cómo cambian dichos receptores, sin indicar magnitud o significado. Estas respuestas varían según las diferentes escalas de tiempo de los factores estresantes (eventos a corto o largo plazo, eventos únicos o múltiples) y pueden ser acumulativas. Finalmente, los impactos tratan la severidad, intensidad, o duración de los efectos y abarca la dirección del efecto, el cual puede generar resultados positivos o negativos (Boehlert y Gill 2010; Martínez *et al.*, 2020).

#### **4.2. Caracterización de los componentes y procesos de las tecnologías SGE que pueden generar impactos**

Los impactos de esta tecnología son similares en la fase de construcción a los de plantas de desalinización de agua de mar o plantas de tratamiento de agua residual u otras energías renovables. Dado que actualmente no existe suficiente experiencia *in situ* sobre los impactos, los factores de estrés considerados

se basaron en el análisis de los componentes de las tecnologías PRO y RED (Figura 9). Esta figura muestra de manera general los componentes principales de ambas tecnologías, en el apartado A se representan las tuberías y el sistema de filtrado. En el B dependiendo de la tecnología de aprovechamiento y la producción esperada, la obra requerirá de varios módulos repetidos de PRO o RED (en ambos casos membranas, en RED además soluciones de electrolito y electrodos), también instalaciones hidráulicas (turbinas, en PRO), instalaciones sanitarias y almacenes de insumos y desechos en ambas. En el apartado C se muestran las instalaciones para la distribución/almacenamiento de la energía (cableado y torres, etc.) (Figura 9). Tanto en PRO como en RED un subproducto final es agua salobre o marina, dependiendo el esquema de aprovechamiento (agua marina vs agua dulce, agua marina vs hiperhalina o agua dulce vs agua hiperhalina).

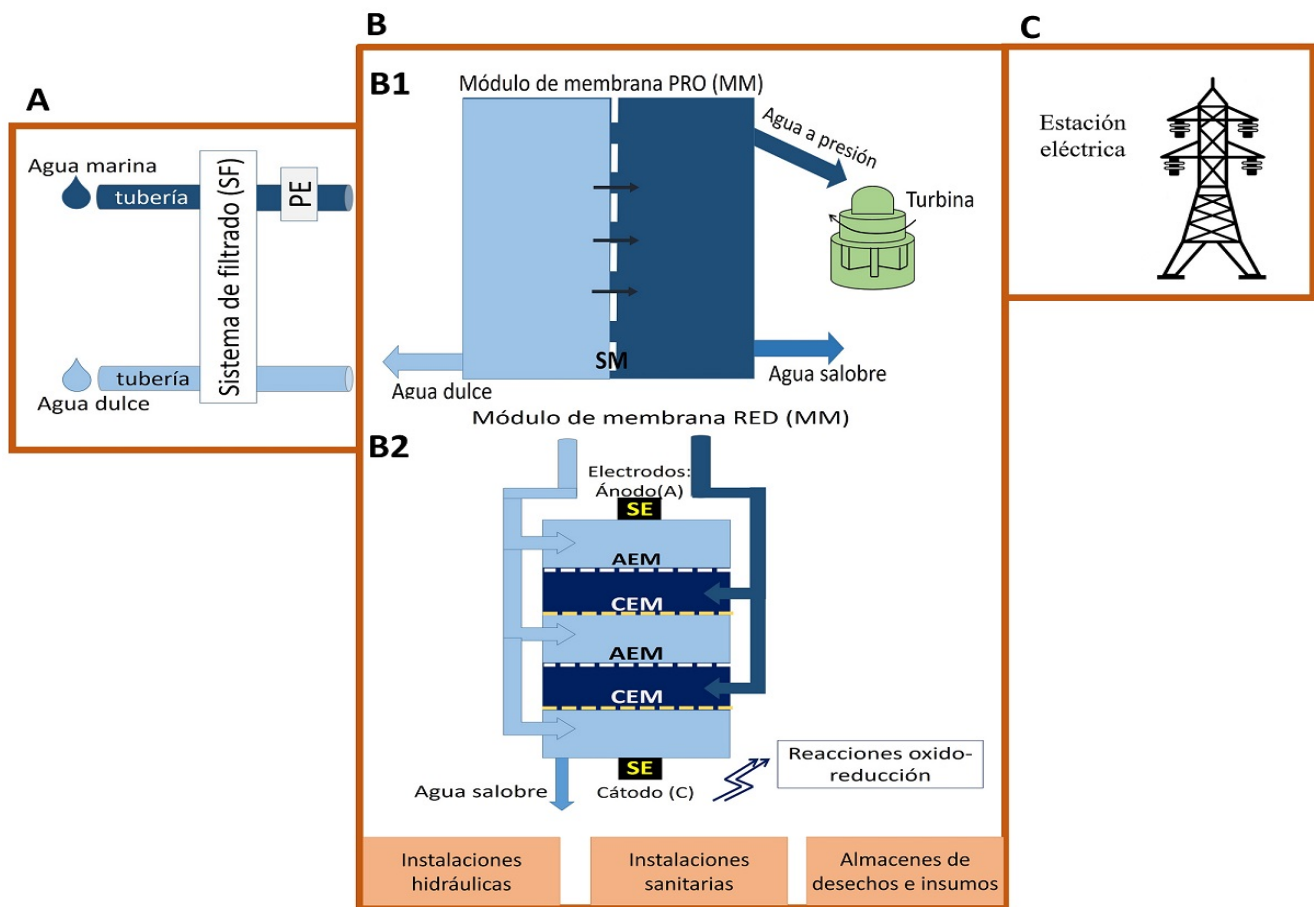


Figura 9. Componentes y procesos involucrados en las tecnologías RED y PRO que pueden producir impactos ambientales en sistemas costeros. Se presentan tres compartimentos: A, B y C. Notaciones: PE (Intercambiador de presión), SE (Sistema de electrodos), AEM (Membrana de intercambio aniónico), CEM (Membrana de Intercambio Catiónico).

Para la determinación de los receptores, de acuerdo a los apartados A, B y C (Figura 9) se esperan respuestas generales según algunas acciones similares a otros de proyectos ingenieriles en sistemas costeros:

- Modificación del uso del suelo (por excavaciones, por nuevas ocupaciones, etc.).
- Emisión de contaminantes (atmósfera, agua, suelo, residuos sólidos, etc.).
- Almacenamiento de residuos (in situ, transporte, vertederos, etc.).
- Sobreexplotación de recursos (materias primas, consumos energéticos, consumos de agua, flora, fauna, etc.).
- Mutaciones del medio biótico (emigración, disminución, aniquilación, etc.).
- Deterioro del paisaje (topografía, vegetación, cursos de agua, entorno, etc.).
- Modificación del entorno social, económico y cultural (desplazamiento, rechazo de habitantes a las energías renovables, modificaciones en los recursos pesqueros, etc).

En la fase de construcción, las respuestas esperadas dependerán de algunas acciones en específico. Por ejemplo, los impactos están asociados a movimiento de tierras, dragado de suelo, introducción de tuberías de ingesta de agua, construcción de la estructura civil para los módulos de membrana. La fase de operación para ambas tecnologías implica el bombeo de agua salada y dulce (o salmuera vs marina, agua residual vs marina etc.) y el pretratamiento de ambas para eliminar materia orgánica y microorganismos que pueden provocar biofouling en las membranas y disminuir tanto su tiempo de vida como la energía producida. Dependiendo de cuál sea el origen de las soluciones de entrada el proceso químico utilizado puede ser más o menos agresivo químicamente, algunos de los químicos utilizados en pretratamiento de agua incluyen:

- Alguicidas: eliminan algas-generalmente a base de sulfato de cobre o sales de hierro, entre otros).
- Antiespumantes: eliminan burbujas creadas en grandes volúmenes de agua que provoca problemas de operación, están compuestos generalmente de silicona
- Biocidas: eliminan microorganismos, pueden ser oxidantes como el cloro, dióxido de cloro, isocianatos de cloro, hipoclorito u ozono, o pueden ser agentes que no oxidan como acrolina, aminas, fenoles tratados con cloro, compuestos órgano-sulfúricos o sales cuaternarias de amonio.
- Coagulantes y floculantes: usados para eliminar el hierro, los sólidos en suspensión, el color orgánico y la dureza del agua influente.

- Inhibidores de costras: son polímeros de superficie cargados negativamente que ayudan a controlar los precipitados que se forman en las superficies de contacto con el agua como resultado de la precipitación normalmente de sólidos solubles que llegan a ser insolubles cuando se incrementa la temperatura. Algunos ejemplos de costra son el carbonato cálcico, sulfato cálcico y silicato cálcico.

Después del pretratamiento, en la fase de operación, el agua ingresa a los módulos de membrana. En el caso de la tecnología PRO las membranas usadas son para ósmosis inversa y en el caso de RED son membranas catiónicas y aniónicas que están hechas de distintos materiales, el problema de ambas es su tiempo de vida útil, ya que en caso de no haber un debido pretratamiento dichas membranas requieren de productos químicos para mantenerlas funcionales tales como el cloro y finalmente cuando dejan de serlo son un desecho que debe disponerse con precaución.

Para la generación de energía en la tecnología PRO se utiliza una turbina y su impacto está asociado al ruido y los efectos que este tiene sobre la fauna. En RED, la generación de energía se lleva a cabo a través de reacciones de óxido/reducción en los electrodos que contienen soluciones de electrolito, dichas soluciones están en un circuito cerrado, sin embargo, deben reemplazarse cada cierto tiempo y una liberación accidental puede tener impactos ambientales negativos. La gravedad de esto dependerá de los electrolitos redox que se utilicen en el sistema de membranas, de acuerdo a Scialdone *et al.*, (2012, 2013) se comparan algunos tipos de soluciones de electrolito con puntaje de 0 a 5 según su impacto potencial, 0 es el mayor impacto y 5 es el menor (Tabla 5).

Tabla 5. Comparación de diferentes parejas redox en RED con su nivel de impacto ambiental.

|   | Toxicidad | Liberación accidental<br>de químicos | Formación de<br>hidrógeno |
|---|-----------|--------------------------------------|---------------------------|
| Tricloruro de hierro (FeCl <sub>3</sub> )/ Dicloruro de hierro (FeCl <sub>2</sub> ) con electrodos de grafito   | 4.5       | 4                                    | 5                         |
| Óxido férrico (Fe (III)) EDTA (ethylene diamine tetra-acetic acid)/Óxido ferroso (Fe (II)) EDTA con electrodos de grafito o DSA (Dimensionally Stable Anodes) | 4         | 4                                    | 5                         |
| Ferricianuro de potasio/ Ferrocianuro de potasio con electrodos de grafito o DSA  | 3.5       | 0-2                                  | 5                         |
| Agua/Sulfato de sodio (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )- DSA (basado en óxidos) y cátodo de Ni   | 4.5       | 5                                    | 3                         |
| Agua/Cloruro de sodio (NaCl) –DSA (basado en cloruros) y cátodo de Ni   | 4         | 2.5                                  | 3                         |

Para ambas técnicas uno de los productos finales de este tipo de plantas de energía es la combinación de los efluentes de entrada, ya sea agua marina vs dulce o salmuera vs agua marina el producto final puede ser agua salobre, marina o con un poco más de salinidad. Este cambio en de salinidad en el efluente final debe manejarse con precaución, ya que su descarga en el cuerpo de agua receptor puede ocasionar impactos negativos (Figura 9).

En la etapa de desmantelamiento es necesario considerar que todo lo representado en la Figura 9 debe ser demolido, causando estrés por ruido, movimiento de sedimentos, compactación del suelo, entre otros.

Finalmente, después de presentarse los impactos generales de la implementación de SGE en sistemas con potencial para la generación de energía por gradiente salino, se usa la información particular de un sitio potencial (la laguna la Carbonera) para la evaluación de los posibles impactos ambientales por la



implementación de SGE, con el fin de tomarlo como guía para otros estudios de caso potenciales en el mundo.

## **5. Área de estudio**

### **5.1. Determinación de área de estudio**

En el país existen muchos sistemas que tienen un potencial importante para la generación de energía a través del gradiente salino, dentro de estos destacan sistemas costeros como desembocaduras de ríos, lagunas costeras, estuarios, rías, esteros, etc. Lo que hace que estos sistemas sean potenciales para la explotación de este tipo de energía se debe a que en estos desarrollan diferencias de concentración salina respecto al mar, principalmente atribuidas a la evaporación y a los aportes de agua dulce. Aunque en México existen muchos sistemas que pueden generar gradientes de salinidad importantes, la mayoría de estos sistemas han sido escasamente caracterizados en cuanto a su estructura termohalina. Para que un sitio pueda ser potencial para la producción de energía por gradiente salino este debe contar con la diferencia de salinidad entre dos soluciones de al menos 20 unidades de diferencia (información recabada en curso con expertos de Colombia), que en términos simples aplica sistemas de agua dulce vs mar, sistemas de agua salobre vs mar, sistemas hipersalinos vs mar, a sistemas híbridos de utilización de salmueras vs agua de mar, o de agua residual vs salmuera, o agua residual vs agua de mar. En el caso específico de los ríos estos deben tener cortas distancias entre dicha diferencia de salinidad, ya que el suministro de agua dulce y salada requiere de una considerable inversión económica y de energía, por lo que únicamente las desembocaduras con fuerte estratificación son idóneas y dicha estratificación se presenta en zonas donde los rangos de marea son menores a 1.2 m y la descarga es alta; en México se presentan dichas condiciones; y dichos sistemas entran en la categoría de agua dulce vs agua marina.

En el caso de las lagunas costeras al tener conexión con un río, ya sea superficial o subterráneo, entran en la categoría agua marina vs agua dulce. En particular, existe un especial interés en las de la región Sureste del país en donde naturalmente se forman fuertes gradientes de salinidad asociado a la intensa radiación solar y a lo somero de lagunas costeras de la región. Estas condiciones ofrecen una amplia gama de aprovechamiento debido a que no sólo puede utilizarse agua marina vs agua dulce, sino que también hay disponible agua hiperhalina, dando la pauta a otros esquemas de aprovechamiento. Lo ideal para estudiar

la posible implementación de la tecnología SGE de una planta piloto y aplicar la evaluación de impacto ambiental es que el sitio cuente con datos disponibles de las distintas variables susceptibles de cambios por dicha implementación de SGE. Todas estas variables incluyen: datos de salinidad de al menos un año (aunque en México la mayoría de los estudios costeros sólo caracteriza su salinidad con mediciones puntuales o datos promedio), modelaciones numéricas de los patrones de salinidad, evaluaciones del potencial teórico del sistema para la generación de energía por gradiente salino. Descripción de las características bióticas y abióticas más relevantes del sistema. La laguna costera la Carbonera cuenta con la descripción de muchas de estas características además de que es un sitio potencial para el aprovechamiento de este tipo de energía renovable por lo que es el área de estudio elegida. Para ello se muestra un análisis integral de la Laguna la Carbonera en las siguientes secciones.

## **5.2. Ubicación geográfica y características generales**

La laguna la Carbonera, es una laguna costera kárstica que se encuentra localizada al noroeste de la Península de Yucatán, México, (21°13'41.80"-21°14'4.79" N, 89°53'21.66" -89°54'0.45" W), a 21 km del puerto de altura de Progreso, Yucatán (Figura 10). La laguna de la Carbonera es una de varias lagunas costeras que se establecen detrás de una isla de barrera discontinua a lo largo de la costa norte de la Península de Yucatán. Su formación es de origen reciente, su entrada de agua de mar que se abrió en 1988 al impactar el huracán Gilberto sobre la costa, rompiendo la isla de barrera que separaba el mar de la ciénaga. Tiene una longitud aproximada de 5 km en la dirección paralela a la costa y de aproximadamente 4 km en la dirección perpendicular a la costa y tiene una superficie de 16.5 km<sup>2</sup> aproximadamente. Limita al Norte con una franja arenosa, al Sur con la duna costera que presenta en su borde manglares y al Este se une con la ciénaga. La laguna se caracteriza por ser muy somera, con profundidades que oscilan entre los 0.30-2 m, por lo que es altamente influenciada por el clima atmosférico local. Los aportes de agua marina que recibe la laguna están asociados a su conexión a las aguas del Golfo de México (propiciada por la marea) y su aporte de agua dulce está restringida a descargas subterráneas a través de manantiales y a la precipitación pluvial local. Su principal entrada de agua dulce es una descarga de agua subterránea confinada dentro de un Petén (nombre maya coloquial que se refiere a islas de vegetación que están asociadas con manantiales de agua dulce que permiten el desarrollo de selvas tropicales perennes, frecuentemente expuestas a inundaciones (Carmona-Escalante *et al.*, 2013)) ubicada en la parte sureste

del sistema (Figura 10, zona de agua dulce). La profundidad promedio de la plataforma continental en esta sección del golfo es menor a 10 m, por lo que el oleaje es de baja energía, excepto durante la época de huracanes en verano y de los vientos “nortes” en invierno. En la región las mareas son mixtas con predominancia diurna, siendo semidiurnas durante mareas muertas y diurnas el resto del tiempo. La amplitud de la marea varía entre 0.40 m en mareas muertas y 0.08 m en mareas muertas. La temperatura media del aire a lo largo del año es entre 24°C y 26°C, con una oscilación térmica menor a 5°C (Mariño y Enríquez, 2011), sin embargo, la variación térmica diurna puede ser mayor que la estacional (hasta 10°C). Los valores de temperatura mínima ocurren entre diciembre y enero, mientras que los valores de temperatura máxima ocurren entre julio y agosto. Considerando la temperatura media anual, la media anual de evapotranspiración en Yucatán ha sido estimada en 900 mm. Varios fenómenos atmosféricos que tienen lugar en el golfo de México determinan el clima en la región, en el que se distinguen tres épocas climáticas características. La época de secas (entre marzo y junio) es ocasionada por la condición anticiclónica del Atlántico norte, la cual genera un marcado gradiente barométrico que impide la formación de nubes sobre la península. Los vientos alisios, que se establecen entre julio y octubre, acarrearán sobre el área nubes que descargan agua de la lluvia estival. Las ondas del este y las depresiones tropicales atlánticas, que se hacen presentes desde verano y cuya frecuencia se intensifica hacia septiembre, forman tormentas tropicales o huracanes, algunos de ellos con vientos de gran intensidad y alta pluviosidad. Durante el invierno (de noviembre a febrero) la región es afectada por vientos del norte que se originan a partir de los frentes fríos que al cruzar el golfo de México se saturan de agua. La temperatura desciende y se presentan fuertes vientos acompañados de una considerable cantidad de lluvia invernal que llega a aportar el 15% del total anual. El efecto de “norte” dura en promedio tres días (Vidal, 2005; Carbajal, 2009; Sánchez-Santillán *et al.*, 2012; Chiappa-Carrara *et al.*, 2012). El promedio anual de precipitación en Yucatán ha sido estimado en 1,025 mm, los máximos de precipitación ocurren al Sur (hasta 1,300 mm), cuya distribución disminuye gradualmente hacia la costa hasta alcanzar los 500 mm. Normalmente el periodo de lluvia más intensa comienza entre los meses de mayo y octubre, y de noviembre a abril se establece un periodo seco.

Esta laguna forma parte del sistema de humedales costeros presente en la costa noroccidental de Yucatán, más específicamente forma parte de la Reserva de Ciénagas y Manglares de Yucatán, cuyo decreto de creación se publicó en el Diario Oficial del Estado de Yucatán (2010) con el objetivo de proteger a los ecosistemas costeros, dominados por extensiones de manglares en buen estado de conservación.

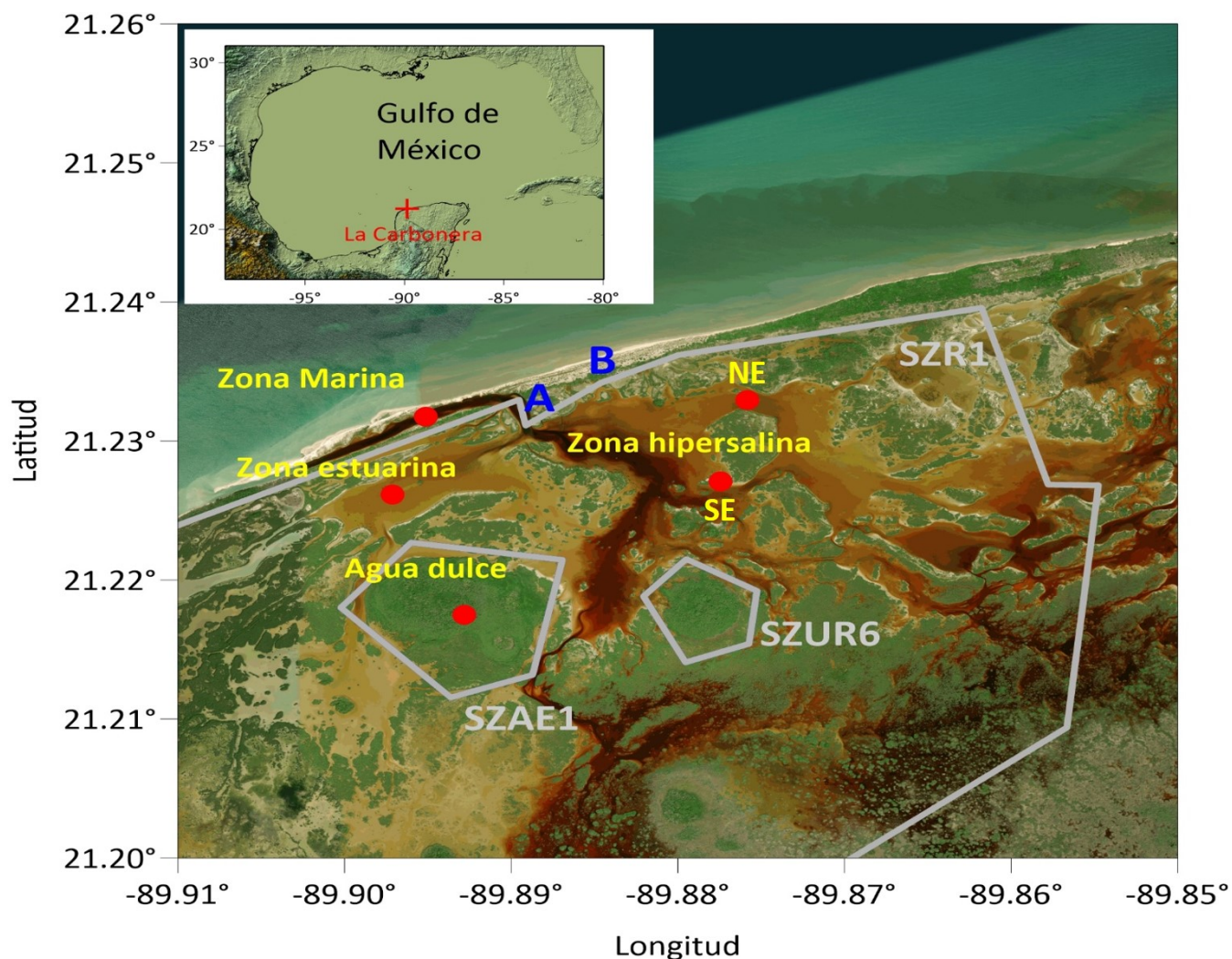


Figura 10. Ubicación de la laguna La Carbonera, Yucatán, México, mostrando áreas con propiedades salinas significativas, la ubicación de los sensores CTD (puntos rojos) y los sitios propuestos para la planta de energía RED (A y B). Los polígonos SZR1, SZAE1 y SZUR6 son áreas con categorías de protección dentro de la Reserva Estatal Ciénegas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán (RECMY).

### 5.3. Marco legal

Este sistema lagunar se encuentra dentro de un Área Natural Protegida (ANP) con carácter de Reserva Estatal en la región conocida como Reserva Estatal de Ciénegas y Manglares de la costa norte de Yucatán (RECMY), la cual posee una superficie total de 54,776.72 hectáreas y abarca varios municipios en el Estado de Yucatán. El objetivo de este decreto era proteger los ecosistemas costeros de la zona, que son

principalmente manglares bien conservados. La Carbonera se ubica en el Área Occidental de la reserva, dentro de la cual existen diversos polígonos asignados por categorías según sus usos (zonas núcleo, zonas de amortiguamiento etc.). La laguna se encuentra dentro del polígono SZR1, bajo la categoría de Zona de Amortiguamiento/Subzona de Uso Público, en esta categoría pueden generarse acciones actuales o en el futuro que conduzcan al desarrollo sustentable, creando al mismo tiempo, condiciones necesarias para lograr la conservación de los ecosistemas de la reserva en el largo plazo. Se pueden generar actividades de recreación, esparcimiento, recorridos en grupos o individuales, en los sitios destinados y aprobados para tal efecto, se permite pernoctar y acampar, así como el desarrollo de infraestructura de bajo impacto acorde al Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero de Yucatán, sujetos a las autorizaciones y permisos correspondientes en materia de uso del suelo y ambiental; incluyendo infraestructura de hospedaje, andadores, senderos, acondicionamiento de pasos de agua, señalización y vigilancia, que vayan encaminadas al uso sustentable y la inspección y vigilancia en tales sitios. La edificación de obras nuevas, así como acciones que tengan algún efecto sobre los flujos hidrológicos, deberá cumplir con los requisitos pertinentes en materia de impacto ambiental (Figura 10). Dentro del polígono general donde se ubica la Carbonera (SRZ1) hay uno más pequeño, pero en la categoría de Zonas Núcleo/Subzona de Uso Restringido (SZUR6) que corresponden a una zona de Petén en el interior de la Carbonera, se trata de una superficie mejor conservada, o poco alterada, que aloja ecosistemas, fenómenos naturales y procesos geohidrológicos de especial existencia, además de especies de flora y fauna con protección especial. En este polígono sólo se podrán realizar excepcionalmente actividades de aprovechamiento que no modifiquen los ecosistemas y que se encuentren sujetas a estrictas medidas de control y supervisión y cuenten con los permisos correspondientes de las autoridades de la Reserva dependiendo del tipo de recurso que se trate (Diario Oficial del Estado de Yucatán, 2010) (Figura 10). Adicional a este se presenta otro polígono con otra categoría Zona de Amortiguamiento/Subzona de Aprovechamiento especial, y es aquí donde se ubica la mayor descarga de agua subterránea a la laguna (Figura 10, punto agua dulce), se trata de una superficie reducida o compuesta por mosaicos de vegetación con cierto grado de conservación, con presencia de recursos naturales esenciales para el desarrollo social de los habitantes de la zona, que deben ser aprovechados sin deteriorar el ecosistema, dentro de umbrales adecuados y permisibles de uso, sujetos a capacidades de carga limitadas y supervisadas, sin modificar el paisaje de forma sustancial, ni causar impacto ambiental irreversible en los elementos naturales que lo conforman. Las actividades que se podrán llevar a cabo en esta subzona son las actividades de ecoturismo que se encuentren encaminadas al aprovechamiento sustentable compatible con el medio ambiente, para lo cual

deberán contar con los permisos y planes de manejo correspondientes, autorizados por las autoridades de la Reserva, permitiéndose también el fomento de unidades de manejo ambiental para el aprovechamiento de flora y fauna silvestre de carácter intensivo y extensivo, para lo cual deberán contar con registros correspondientes y planes de manejo autorizados, así mismo serán permitidas pero sujetas a vigilancia y supervisión, la realización de actividades de pesca artesanal y de subsistencia, con las artes de pesca que sean autorizadas para cada caso, en los sitios específicos de estas subzonas (Diario Oficial del Estado de Yucatán, 2010) (Figura 10).

#### **5.4. Límites geográficos y usos actuales**

En sus márgenes geográficos la laguna la Carbonera tiene dos poblados costeros a sus costados, al occidente se encuentra el poblado de Sisal y al oriente se ubica Chuburná. Las actividades antrópicas actuales en la laguna son la pesca local, el turismo a pequeña escala promocionado en las localidades aledañas y la investigación científica por parte de diversas instituciones tanto del estado de Yucatán como de México.

#### **5.5. Características bióticas y abióticas**

Al ser considerado un sitio potencial para el aprovechamiento de SGE, este ecosistema presenta algunas de las características que se mencionan en la literatura científica como necesarias para su monitoreo antes y después de la implementación, tales como una estructura salina muy marcada (gradiente horizontal en este caso), marea de poca amplitud y evaluaciones hidrodinámicas con forzamientos ambientales (Álvarez *et al.*, 2014; Álvarez-Silva y Osorio, 2015) y la información adicional del sistema se presenta a continuación.

##### **i Estructura termohalina**

La estructura termohalina del agua en la laguna ha sido caracterizadas en 5 zonas puntuales (CTD's instalados en 5 zonas, Figuras 11 y 12) por Jerónimo (2012), Marin & Enríquez (2016), Marin (2016) y Réyez-Mendoza *et al.*, (2020). Esta presenta importantes variaciones a diferentes escalas temporales a lo largo del año, lo cual propicia variaciones en la energía potencial obtenida del SGE.

Según las características de salinidad y temperatura, La Carbonera tiene cuatro zonas definidas (Figura 10) de la siguiente manera:

- Un efluente de agua dulce permanente en el suroeste de la laguna (<5 psu (unidades prácticas de salinidad) con una temperatura casi constante (27 ° C)) (Ojo de agua, línea negra Figura 11 y 12 respectivamente);
- Una zona estuarina en el centro oeste del sistema (donde la concentración de salinidad varía con las mareas entre 5 y 35 psu) (Petén, línea amarilla, Figura 11);
- Una zona marina en la desembocadura de laguna al mar (alrededor de 35 psu) (Boca, línea azul Figura 11);
- Una zona hipersalina en el este del sistema (60-100 psu) (Noreste y Sureste, líneas roja y verde Figura 11).

Las temperaturas en las zonas 2, 3 y 4 muestran variaciones estacionales (15–37 ° C) y diarias de hasta 10 ° C y 20 psu o más en salinidad (líneas azul, roja, verde y amarilla Figura 12). Esta laguna tiene un fuerte gradiente de salinidad horizontal, con características hipersalinas en el este, marina en el centro, estuarina en el oeste y una zona de agua dulce en el suroeste.

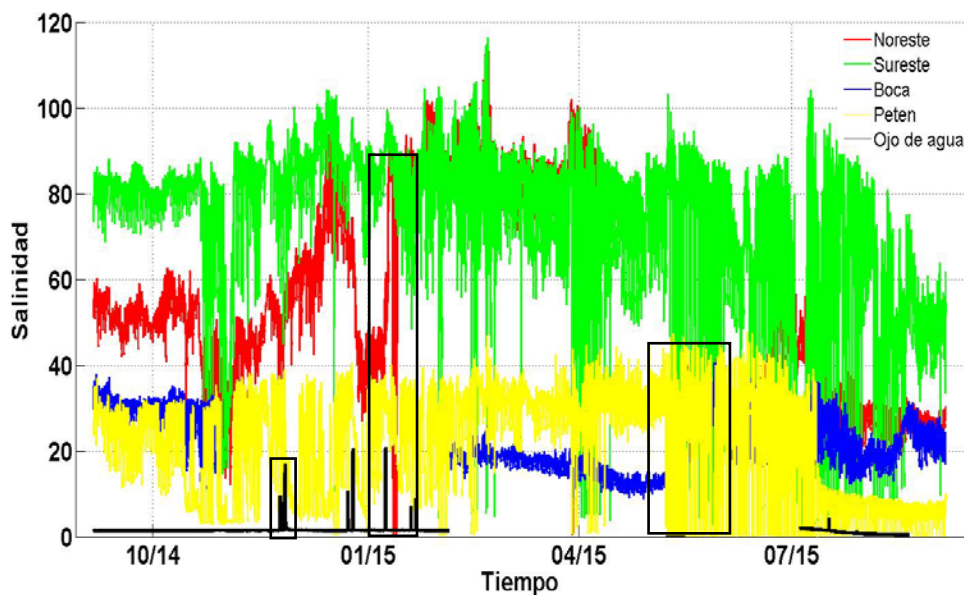


Figura 11. Salinidad registrada por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015. Los puntos de muestreo de CTD están señalados en la Figura 10 (puntos rojos), punto noroeste (NE), sureste (SE), punto boca (zona marina), punto petén (zona estuarina) y punto ojo de agua (zona de agua dulce). Tomado de Marin, 2016.

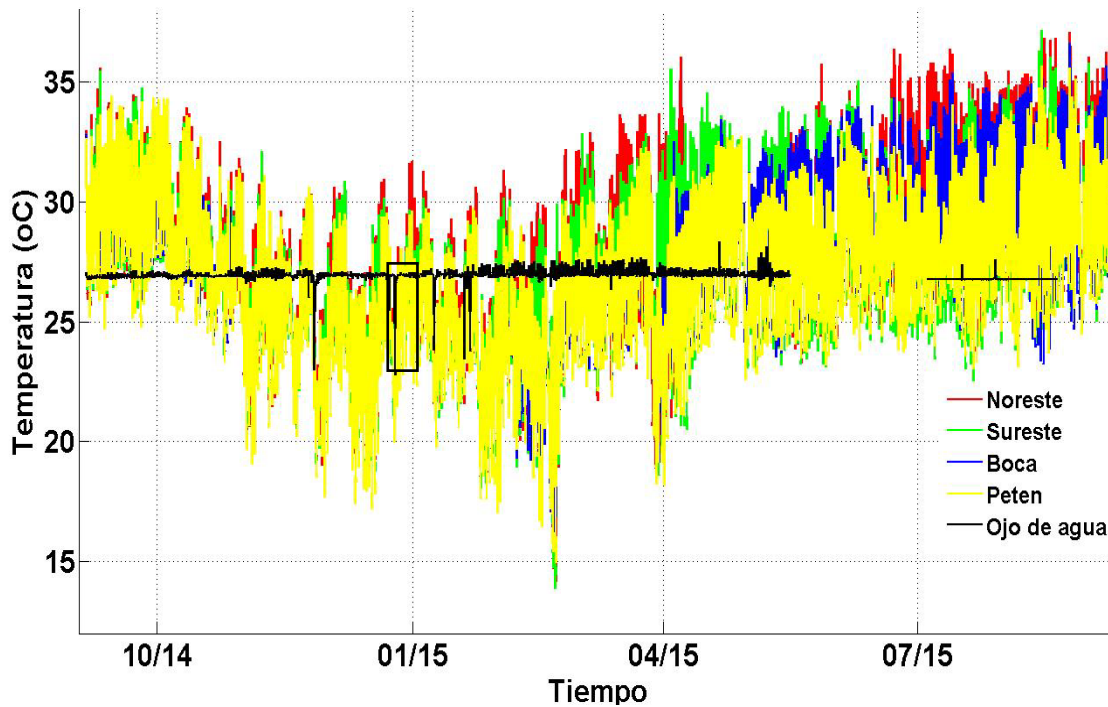


Figura 12. Temperatura registrada por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015. Los puntos de muestreo de CTD están señalados en la Figura 10 (puntos rojos), punto noroeste (NE), sureste (SE), punto boca (zona marina), punto petén (zona estuarina) y punto ojo de agua (zona de agua dulce) .Tomado de Marin, 2016.

## ii Batimetría

La batimetría de la zona está representada en la Figura 13, puede observarse claramente el canal de alimentación en la boca de la laguna con profundidades no mayores a 1.5 m y en la parte interna de laguna se observan profundidades no mayores a 0.5 m a excepción de la zona y canal del “ojo de agua” donde hay profundidades desde 2 m disminuyendo hacia el interior de la laguna.



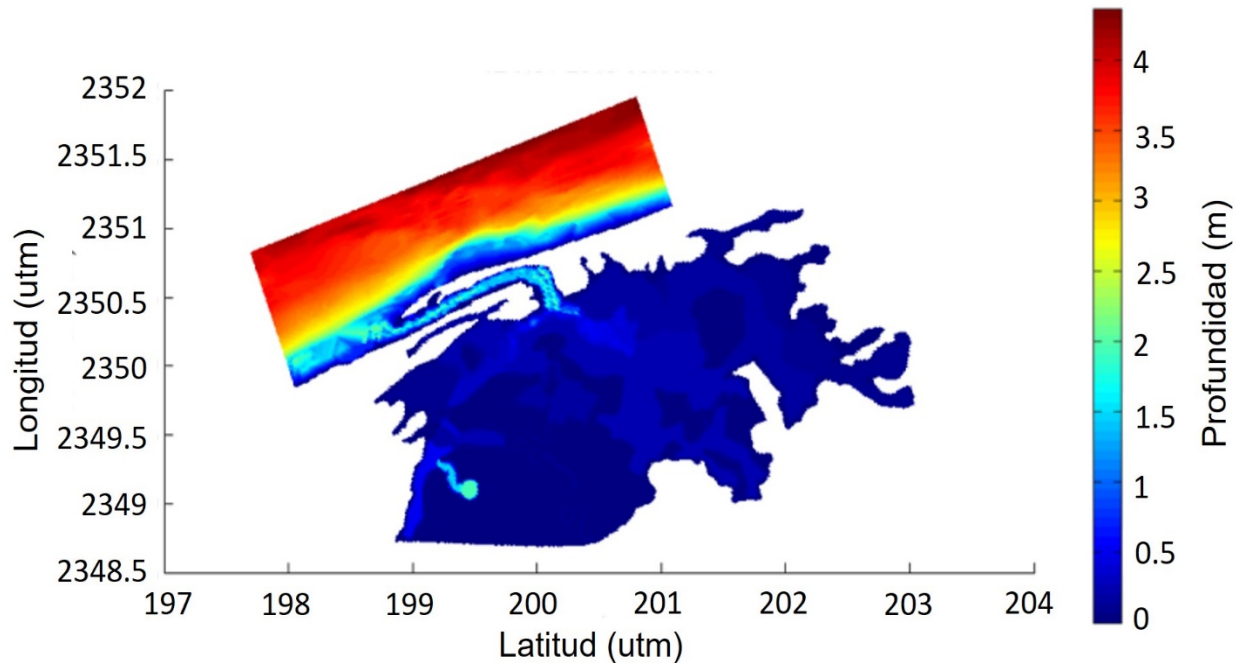


Figura 13. Batimetría de la laguna la Carbonera (Marin, 2016).

### iii Hidrodinámica

En cuanto al movimiento del agua en el interior de la laguna, Marín (2016) caracterizó la hidrodinámica de la laguna la Carbonera a partir del cálculo de las corrientes residuales, las cuales determinan los patrones generales de movimiento neto del agua. Como ejemplo, se muestran las corrientes residuales en la Carbonera para un ciclo de marea viva con forzamiento de viento del Norte (Figura 14). En este ejemplo se puede observar que con el forzamiento de viento del Norte, que es el de mayor magnitud en la región, los patrones de movimiento del agua (en magnitud) son más claros. Se observan zonas de recirculación en el interior de la laguna en la región occidental y al fondo (sur) del sistema, y aquí se presentan los mayores valores de magnitud (0.12 a 0.2 m/s). En estas zonas se promueve la mezcla y el transporte horizontal de las masas de agua, principalmente en la parte oeste, donde confluyen el agua dulce proveniente de la descarga de agua subterránea ubicada en un Petén al sureste del sistema y el agua marina que entra por la boca de la laguna. Es importante hacer notar que en la zona nororiente que forma parte de la zona hiperhalina de la laguna el movimiento es de menor magnitud.

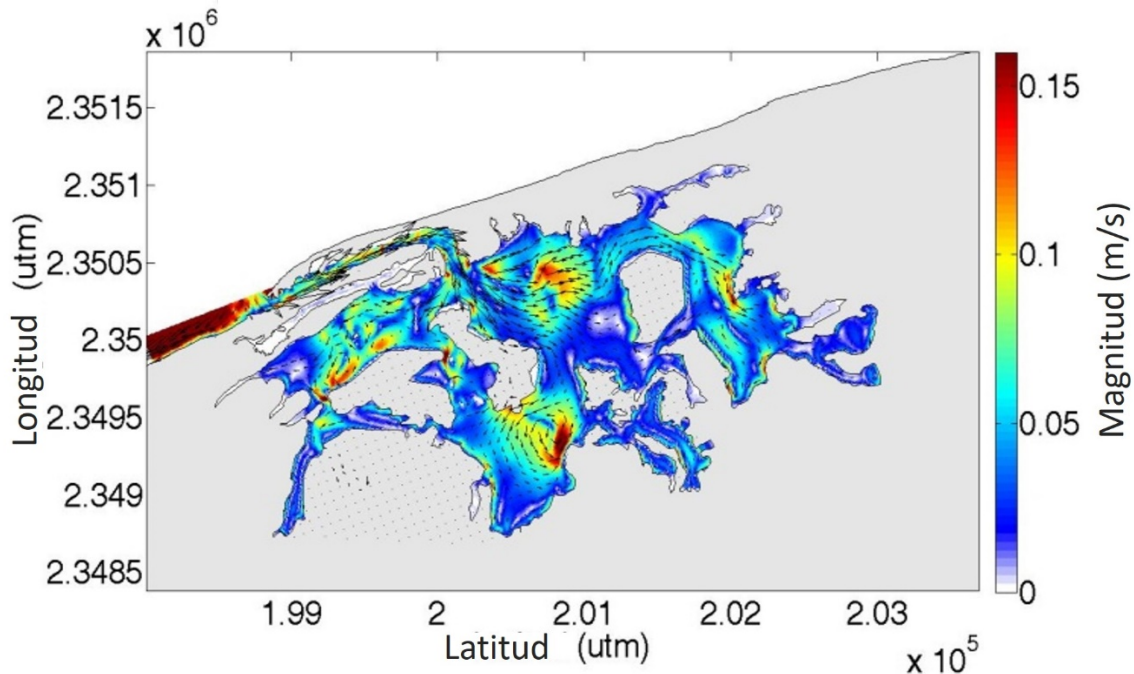


Figura 14. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva con forzamiento de viento del NO. Tomada de Marin, 2016.

#### iv Patrones de salinidad

La caracterización de los patrones de salinidad en un ciclo de marea viva en simulaciones numéricas muestran que el gradiente de salinidad en la laguna es muy dinámico, además de que se observa el gradiente horizontal de salinidad tan peculiar de esta laguna (Marin, 2016) (Figura 15). Existen dos forzantes ambientales principales que modifican la distribución horizontal de la salinidad: la marea y los vientos. Dichos forzamientos generan algunas diferencias en los patrones de salinidad durante la máxima y mínima excursión de la marea (pleamar y bajamar). Durante un evento de marea viva sin incluir el forzamiento por viento, la onda de marea ingresa por la boca de la laguna hasta la zona estuarina y se reportan salinidades desde 25 hasta 35 ups, en la zona de descarga de agua subterránea (zona suroccidente), se reportan valores de <5 a 20 ups y la zona hiperhalina mantiene su condición de alta salinidad al oriente de la laguna (>50 ups), sólo se observa que durante la entrada de la marea, el agua que ingresa al centro-este de la laguna modifica la salinidad de la zona hiperhalina (la baja, 35 ups) debido a la mezcla con agua marina proveniente de la boca de la laguna (Figura 16).

Por otro lado, al incluir a un evento de marea viva el forzamiento de un viento del sector Norte, durante la máxima excursión de la marea, la zona estuarina es dominada por agua salobre (20-30). El viento ingresa agua salobre a la zona centro-sur, y además también ingresa agua marina (35 ups) a toda la zona este-centro del sistema generando una disminución de la cobertura de la zona hiperhalina (Ver más detalles con otros escenarios de modelación en Marin, 2016) (Figura 17).

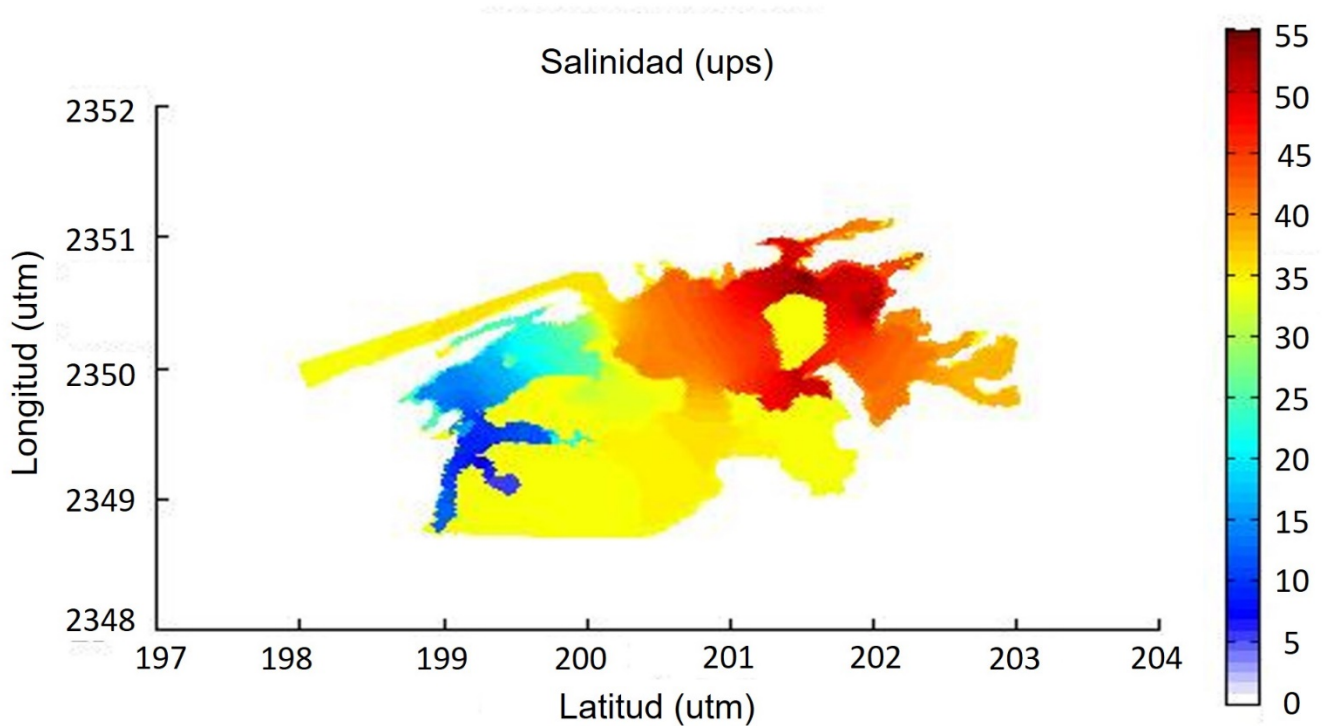


Figura 15. Patrones de salinidad en la laguna la Carbonera usados como condición inicial para modelar los cambios durante la excursión de la marea (Marin, 2016).

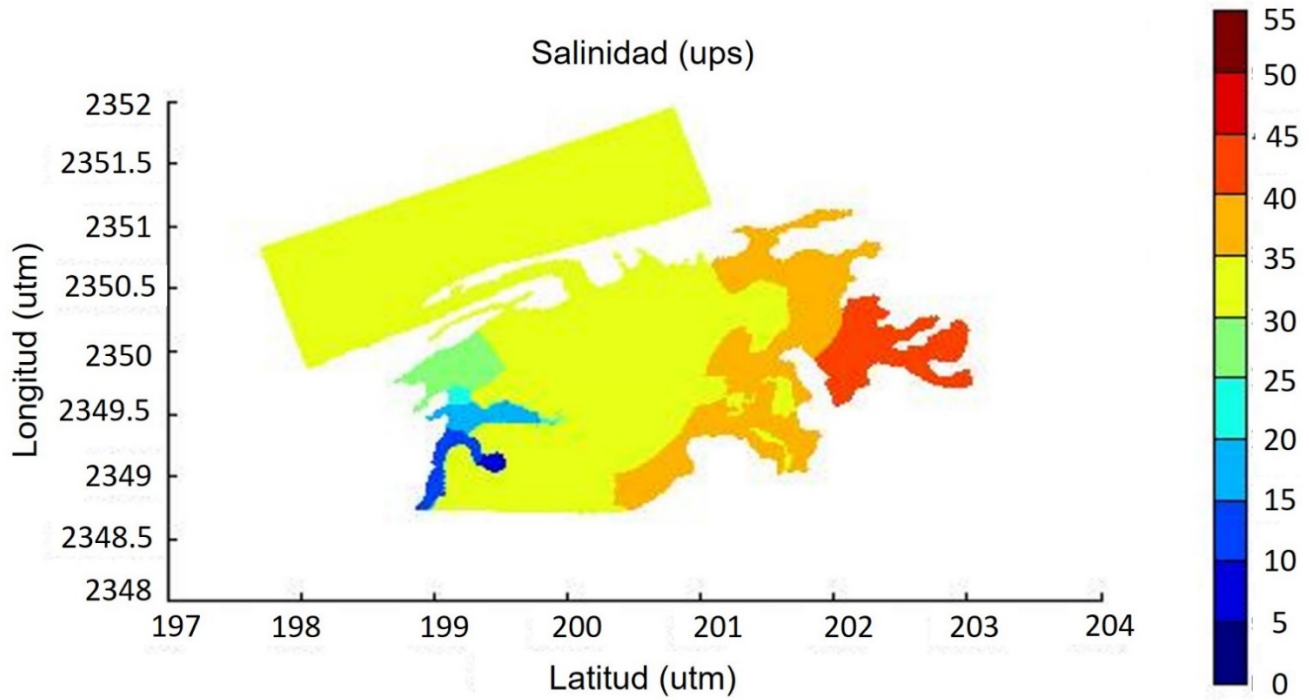


Figura 16. Patrones de salinidad generados durante la máxima excursión de la marea sin forzamiento de viento (Marin, 2016).

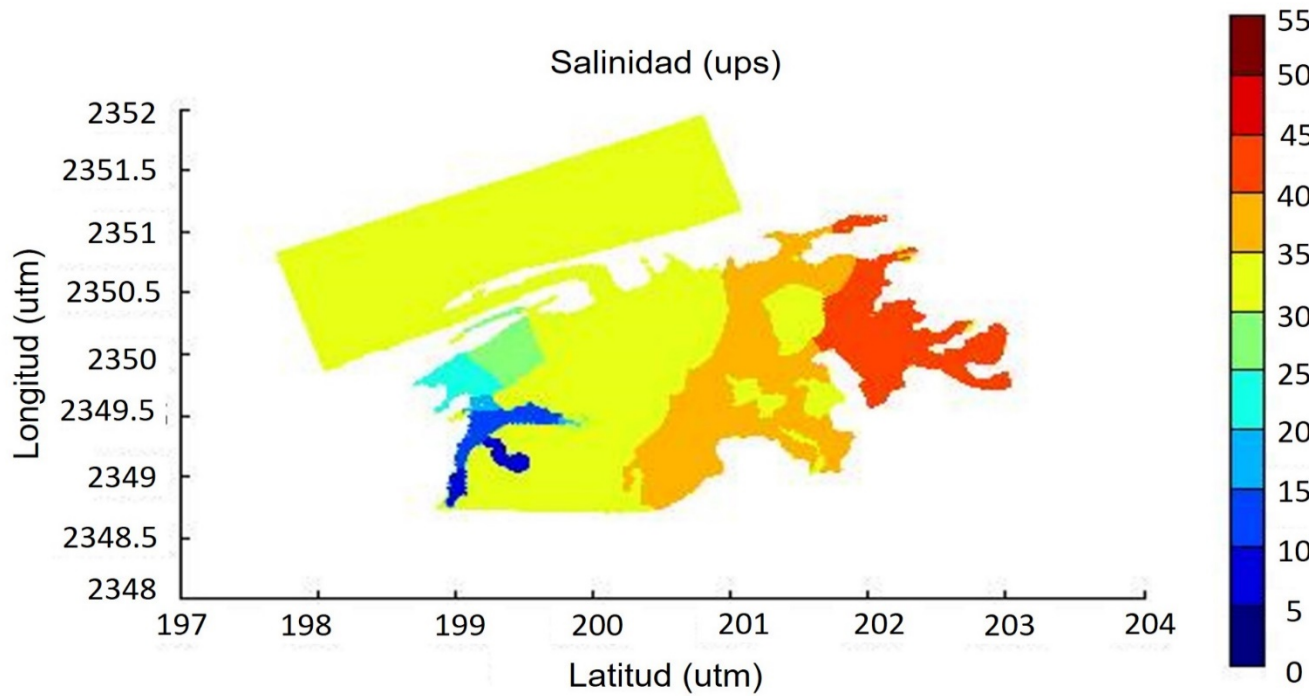


Figura 17. Patrones de salinidad generados durante la máxima excursión de la marea con forzamiento de viento de Norte (Marin, 2016).

## v **Potencial teórico para generación de SGE en la Carbonera**

Reyes-Mendoza *et al.*, (2020) reportaron el potencial teórico de SGE disponible en la laguna La Carbonera, basado en la estructura termohalina y factores ambientales (evaporación, temperatura del aire, etc.). Los autores mencionan tres posibles configuraciones de aprovechamientos del gradiente salino en la laguna: agua dulce/agua de mar (FW/SW, por sus siglas en inglés), agua dulce/agua hipersalina (FW/HW por sus siglas en inglés) y agua de mar/agua hipersalina (SW/HW por sus siglas en inglés). La energía disponible de estas configuraciones es la siguiente:

- FW/SW:  $0,244 \pm 0,0889$  kW, con un máximo de 0,527 kW en mayo, en la época seca;
- FW/HW:  $1,111 \pm 0,277$  kW, que es el promedio máximo de las configuraciones de las tres plantas;
- SW/HW:  $0,413 \pm 0,194$  kW, con un máximo de 0,916 en diciembre, en la temporada de Nortes.

Por otro lado, las grandes variaciones en la estructura termohalina determinan la variabilidad del potencial energético a lo largo del año. Para un factor de capacidad del 90%, la capacidad instalada para la configuración FW / SW debe ser 0,133 kWh, para la configuración SW / HW 0,25 kWh y para la configuración FW / HW, 0,527 kWh (Reyes-Mendoza *et al.*, 2020). Estas cifras se obtuvieron considerando la mezcla de 1 m<sup>3</sup>/s de agua salada y dulce.

## vi **Características hidrogeológicas**

El área de estudio forma parte de la “Cuenca Sedimentaria de Chicxulub” en la Península de Yucatán. Esta es una estructura kárstica formada por el impacto de un meteorito en un área somera con depósitos de evaporitas y andesitas durante la transición del Cretácico al Terciario. Con este impacto se dio origen a un cráter de aproximadamente 180 km de diámetro, bordeado por una banda semicircular de anillos múltiples con presencia de dolinas (cenotes) alineadas, producto de la disolución del material calizo depositado (Batllori-Sampedro *et al.*, 2005).

Su hidrogeología está regida por la presencia, casi continua, de un manto rocoso superficial de extrema dureza. La porción más superficial del manto, denominada coraza calcárea, muestra un mayor grado de consolidación y dureza que la porción interna de la misma, que se caracteriza por la presencia de calizas blandas, conocidas localmente como “sahcab”. La porción superficial se transforma en coraza calcárea, a

la vez que se trata de un material soluble al agua enriquecida con ácido carbónico, favoreciendo la formación de cavidades subterráneas. Un rasgo morfológico importante de la coraza es su tendencia al resquebrajamiento y a la fragmentación, tanto por efecto de cambios de temperatura como por la acción mecánica de raíces de árboles. Las calizas del período Terciario permiten que la lluvia se infiltre rápidamente, disolviendo la roca y formando un relieve kárstico (Batllori-Sampedro *et al.*, 2005). Extensos sistemas de cavernas se han desarrollado en la zona de dispersión cercana a la costa o mezcla de agua dulce subterránea más superficial con la salada inferior, debido a la intensa actividad geoquímica que presenta. Estas cavernas se originaron a partir de que la zona de dispersión oscilaba en respuesta a las variaciones de nivel medio del mar durante el Pleistoceno. De esta manera, los cenotes costeros son la expresión más joven del karst peninsular. El anillo de cenotes conforma una red cavernosa muy compleja, que actúa como un vertedero y línea de conducción de grandes masas de agua. Un elemento regulador de la hidrología costera es la capa de caliche que confina al acuífero en esa porción y que permite el paso del agua al exterior, a través de fisuras y manantiales muy localizados. Por encima de este caliche costero, se desarrolla un pequeño acuífero libre en la barra arenosa litoral (Batllori-Sampedro *et al.*, 2005). La Península de Yucatán está ligeramente inclinada hacia el norte y no existen ríos superficiales, por lo que el agua de lluvia es rápidamente filtrada a través de esta amplia red de fracturas y cavernas, que en algunas lagunas costeras como la Carbonera forma manantiales por donde el agua subterránea emerge a la superficie. Tan pronto el agua es descargada en las ciénagas o lagunas costeras, se inicia el proceso de mezcla, dando origen a patrones de salinidad variables en las lagunas, sumado a la diferencia de temperatura entre el agua dulce descargada y el agua salobre presente en las lagunas. Ambos fenómenos se traducen en una circulación termohalina compleja (Sánchez, 2012).

Los suelos de esta región están representados por los regosoles (según clasificación FAO/UNESCO), asociados a la barra arenosa y las playas; el solonchak y el histosol se asocian con la zona inundable de manglares y presentan fuerte hidromorfismo en los estratos más superficiales; y, por último, los suelos tipo litosol y rendzinas se encuentran asociados a la zona de selva baja caducifolia (Batllori-Sampedro *et al.*, 2005). En cuanto a la laguna la Carbonera hay tres tipos de sedimentos: arena, lecho rocoso y fango (Bonilla-Gómez *et al.*, 2012).

La zona costera, geológicamente es la más joven, tiene playas arenosas y lagunas costeras en la parte norte-noreste de la Península. Casáres (2009) indica que la fisiografía en la franja costera del estado de Yucatán se caracteriza por la existencia de dunas de arena, ciénagas, lagunas costeras, terreno sujeto a inundación y terreno cárstico. La anchura de la duna de arena varía desde 300 m hasta 3 km a lo largo del

litoral. Subyacente a la duna se encuentra el caliche cuyo espesor varía entre los 50 y 140 cm. Las ciénagas se localizan detrás de la duna de arena, tierra adentro, y son cuerpos de agua salina de profundidad somera sin comunicación directa con el mar y cuyo lecho está constituido por turba y material inerte, con espesores menores a 3 m.

## vii **Características biológicas**

Este humedal es un sistema costero complejo debido a que, en un espacio reducido, se presentan tres hábitat contrastantes: una laguna costera, una ciénega y una marisma. Se caracteriza por tener valores elevados de producción biológica que sostiene a una gran cantidad de consumidores enlazados por cadenas alimentarias complejas. Además de ser una zona de protección, crecimiento y desarrollo de peces, crustáceos y moluscos, reptiles, anfibios y pequeños mamíferos. Esta laguna es utilizada como zona de alimentación y reproducción de aves migratorias y residentes. Dentro del área de estudio se reportan diversos organismos de importancia económica (pesquerías regionales y locales), ecosistémica, con usos antropogénicos (medicinal, construcción, turismo) o que están dentro de alguna categoría de riesgo de acuerdo a la 059-Semarnat-2010 (SEMARNAT, 2002) o en la *International Union for Conservation of Nature's* (IUCN) (Tabla 6).

Tabla 6. Especies reportadas en la Carbonera con importancia ecológica, comercial, usos antrópicos, y bajo alguna categoría de protección.

| Categoría de protección  |  | Importancia y/o usos   |
|--|--|--|
| VEGETACIÓN (Guadarrama <i>et al.</i> , 2018; Torres <i>et al.</i> , 2010)  |  |  |
| Manglares  |  |  |
| <i>Conocarpus erectus</i><br><i>Avicennia germinans</i><br><i>Rhizophora mangle</i><br><i>Laguncularia racemosa</i>  | Amenazada  | Control de erosión y conservación / construcción de suelos. Clave en el ciclo de vida de varios organismos (peces y crustáceos). Depósitos de carbón, filtro natural para la calidad del agua. |
| Duna costera   |  |  |
| <i>Cordia sebestena</i><br><i>Jacquinia macrocarpa</i>   | Sin categoría  | Ornamental, medicinal, fijación de sustrato  |
| <i>Bravaisia berlandieriana</i>  | Sin categoría  | Construcción, medicinal, fijación de sustrato  |
| <i>Metopium brownei</i>  | Sin categoría  | Tóxica, fijación de sustrato   |
| <i>Capparis incana</i><br><i>Gomphrena serrata</i><br><i>Rivina humilis</i><br><i>Capparis flexuosa</i>  | Sin categoría  | Medicinal, fijación de sustrato  |
| <i>Acanthocereus tetragonus</i><br><i>Sideroxylon americanum</i>   | Sin categoría  | Comestible, fijación de sustrato   |
| <i>Pithecellobium keyense</i>  | Sin categoría  | Fijación de sustrato   |
| Petén  |  |  |
| <i>Ficus cotinifolia</i>   | Sin categoría  | Recuperación de tierras degradadas   |
| <i>Manilkara zapota</i><br><i>Sabal yapa</i>   | Sin categoría  | Medicinal, construcción y artesanías   |
| Selva baja inundable   |  |  |
| <i>Sporobolus pyramidatus</i><br><i>Solanum nigrum</i><br><i>Haematoxylum campechianum</i><br><i>Ipomoea carnea</i>  | Sin categoría<br>Sin categoría<br>Sin categoría<br>Sin categoría | Cobertura primaria resistente a suelos salinos<br>Comestible<br>Textil<br>Medicinal, ornamental  |
| Pastos marinos   |  |  |
| <i>Thalassia testudinum</i>  | Preocupación menor   | Clave en el ciclo de vida de varios organismos (peces y crustáceos). Reservorios de carbon   |
| PECES (Gallardo-Torres <i>et al.</i> , 2012)   |  |  |
| <i>Fundulus persimilis</i><br><i>Fundulus grandissimus</i>   | Sujeta a protección especial                                     | Endémica   |
| <i>Gambusia yucatanana</i>   | Sin categoría  | Endémica   |
| <i>Sphoeroides testudineus</i><br><i>Strongylura notata</i><br><i>Harengula clupeola</i>   | Sin categoría  | Se comercializa como cebo, residente en la laguna, especie abundante (vital en la cadena alimentaria)  |
| <i>Trachinotus falcatus</i><br><i>Lutjanus griseus</i><br><i>Lutjanus synagris</i><br><i>Floridichthys polyommus</i><br><i>Archosargus probatocephalus</i><br><i>Eucinostomus gula</i><br><i>Eucinostomu argenteus</i> | Sin categoría  | Comercializado para consumo local y regional   |



|   |                              |   |
|---|------------------------------|---|
| <i>Mugil curema</i><br><i>Mugil trichodon</i><br><i>Hyporhamphus unifasciatus</i><br><i>Chriodorus atherinoides</i>                             |                              |   |
| <i>Poecilia velifera</i>  | Sujeta a protección especial | -   |
| <i>Aetobatus narinari</i>   | Casi amenazado               | Importancia comercial en la región                            |
| CRUSTÁCEOS (Poot-López <i>et al.</i> , 2019)  |                              |   |
| <i>Callinectes sapidus</i>  | Sin categoría                | Comercializado para consumo local y regional                  |
| AVES (Chiappa-Carrara <i>et al.</i> , 2017)   |                              |   |
| <i>Phoenicopterus ruber</i><br><i>Phalacrocorax brasilianus</i><br><i>Cochlearius cochlearius</i><br><i>Platalea ajaja</i><br><i>Ardea alba</i> | Preocupación menor           | Para turismo (observación de aves)                            |
| <i>Campylorhynchus yucatanicus</i>  | Casi amenazado               | Endémica  |
| <i>Egretta rufescens</i>  | Sujeta a protección especial | Para turismo (observación de aves)                            |
| REPTILES (Santoyo, 2017)  |                              |   |
| <i>Crocodylus moreletii</i>   | Sujeta a protección especial | Para turismo (avistamiento)                                   |
| <i>Eretmochelys imbricate</i>   | En peligro crítico           | Turismo (liberaciones controladas en campamentos de tortugas) |
| <i>Chelonia mydas</i>   | En peligro de extinción      | Turismo (liberaciones controladas en campamentos de tortugas) |
| <i>Caretta caretta</i>  | En peligro de extinción      | Turismo (liberaciones controladas en campamentos de tortugas) |
| ARTRÓPODOS (Sandoval-Gio <i>et al.</i> , 2016)  |                              |   |
| <i>Limulus polyphemus</i>   | Casi amenazado               | Medicinal   |

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Posibles impactos ambientales de la implementación de SGE: visión general

En este estudio se presenta un análisis general de los impactos ambientales potenciales de las tecnologías PRO y RED en tres fases de un proyecto (construcción, operación y desmantelamiento). Estos impactos se pueden generar en los diversos sistemas con potencial de aprovechamiento para la generación de energía por gradiente salino (desembocaduras de ríos, estuarios, lagunas costeras). Los factores de estrés se definieron según los componentes y procesos involucrados en la implementación de las tecnologías PRO y RED (Figura 18). Los receptores resaltan aquellas características de los ambientes costeros que pueden ser susceptibles a cambios debidos a la implementación de SGE (Figura 18). Las respuestas fueron analizadas para cada receptor, revelando los impactos potenciales de estas tecnologías (Figura 18). Algunos de ellos ya han sido mencionados en la literatura para SGE (Papapetrou y Kumpavat, 2016 y Seyfried *et al.*, 2019), y otros en otros enfoques de energía renovable (Mendoza *et al.*, 2019; Martínez *et al.*, 2020). Se complementan en ambos casos con un análisis propio para mejorar la evaluación de impactos.

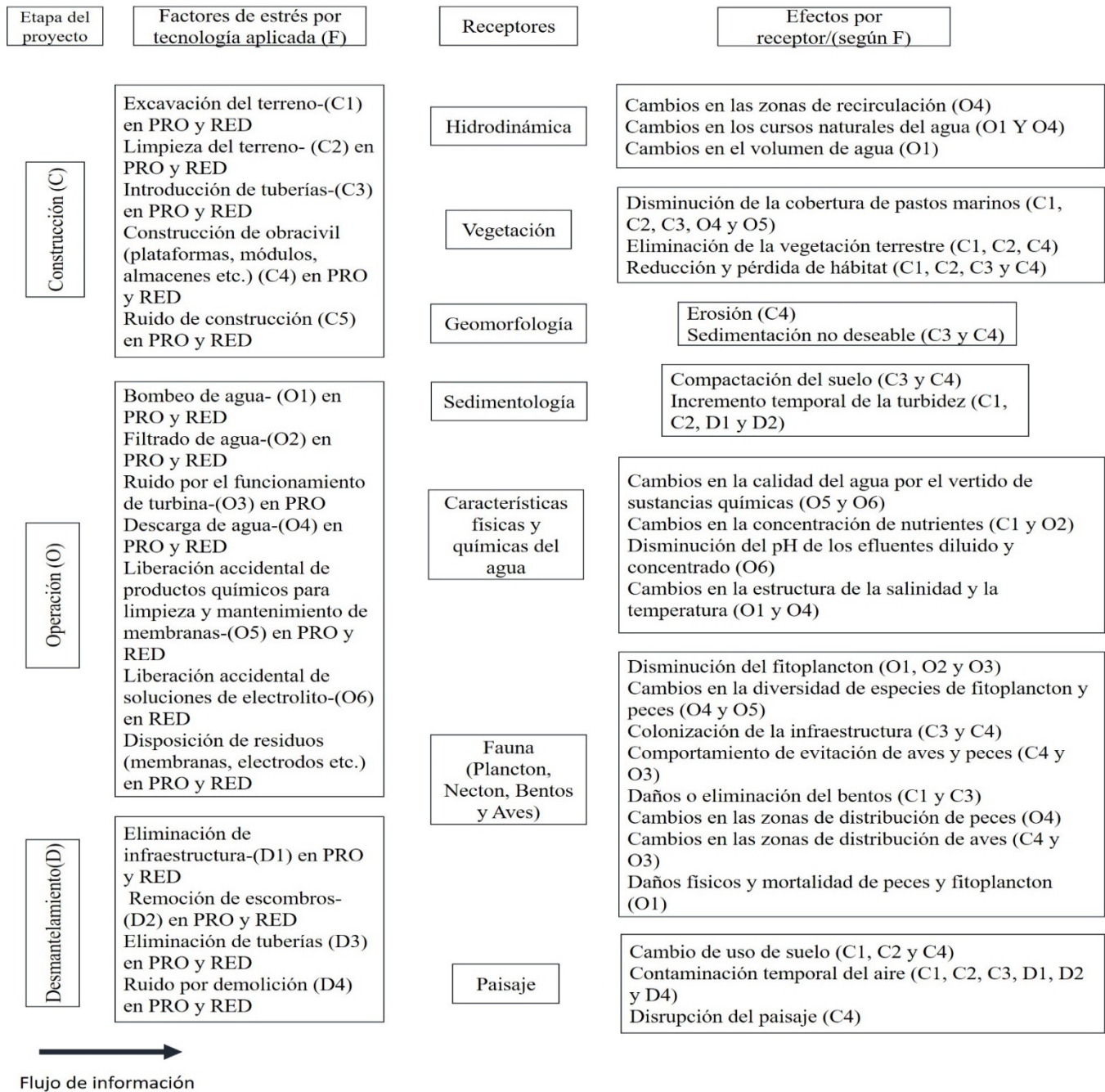


Figura 18. Estresores, receptores y posibles efectos por la implementación de SGE en la laguna La Carbonera en un esquema de tres etapas (construcción, operación y desmantelamiento) para los principales componentes de las tecnologías PRO y RED. Las letras indican el número de factores estresantes según la fase del proyecto y la relación que tienen con los efectos o respuestas en los receptores.

En la figura 18 se muestran las interacciones entre los factores de estrés, los receptores y los efectos o respuestas. Un ejemplo de esto lo representan los factores de estrés involucrados en la fase de construcción, donde la excavación de terreno, la introducción de tuberías y la construcción de la infraestructura de una planta SGE puede tener efectos sobre algunos Recetores del ecosistema. En la vegetación, estos factores de estrés podrían generarían efectos como la pérdida de cobertura vegetal terrestre o la disminución pérdida de hábitat. En la geomorfología y sedimentología se podrían generar respuestas como la erosión o sedimentación no deseable o la compactación de uso de suelo. O en el paisaje se generaría un cambio de uso de suelo y una disrupción del mismo.

Otro ejemplo de estas interacciones para otros factores de estrés pero en la fase de operación son el filtrado de agua y la descarga de agua (efluente final). El filtrado de agua puede tener efectos sobre receptores como la fauna (específicamente el fitoplancton) ya que si se tomaran grandes volúmenes de agua podría generarse como respuesta la disminución de la biomasa fitoplanctónica. En el caso de la descarga de un efluente final (de diferente salinidad a la que entra) este podría tener efectos sobre las características físicas y químicas del agua generando cambios en la estructura termohalina o sobre la fauna generando cambios en la composición de especies.

Aunque este panorama de posibles impactos en sistemas potenciales, parece generar un gran número de impactos (positivos o negativos), es importante mencionar que estos pueden ser menores o mayores, dependiendo de varios factores, como el tamaño de la planta, las características de cada sistema (biótico y abiótico) y el esquema utilizado para la captación de energía (soluciones naturales o efluentes antrópicos).

El análisis de impactos generado (Figura 18), se aplicó en el caso de la laguna La Carbonera. El esquema de explotación propuesto está en línea con la normativa vigente y adaptado a las características específicas del sitio. Esto con la finalidad de mostrar que una correcta implementación puede eliminar de la lista muchos de los impactos reportados en la Figura 18.

En este esquema en La Carbonera, se propuso la implementación hipotética de una planta RED del tamaño y producción del prototipo RED ubicado en Afsluitdijk, en los Países Bajos, es decir una planta con potencia neta de 50 kW. Esta planta incluía en su construcción, tres tanques de almacenamiento de agua, dos sistemas de pretratamiento (para las soluciones concentrada y diluida) y ocho pilas de membranas

(arreglo RED). De acuerdo a la producción neta, el tamaño de la infraestructura propuesta es de bajo impacto.

Según el tamaño y la producción de energía de esta planta hipotética, es importante considerar primero que muchos de los impactos ambientales en cada fase dependerán de las características del sitio donde se construya la infraestructura de la planta. Por lo que se tomaron en cuenta algunos aspectos para seleccionar la ubicación ideal, teniendo en cuenta las posibles respuestas que podían generarse (Figura 18). Estas consideraciones incluyen:

- La proximidad o cercanía del recurso (distancias entre las fuentes de agua dulce, marina, hipersalina);
- Sitios de construcción en terrenos con escasa vegetación;
- Áreas más pequeñas para la excavación y la introducción de tuberías;
- Considerar que los efectos permanentes (como los cambios en la hidrodinámica) tienen mayores efectos sobre los receptores que los efectos temporales (como el ruido de la construcción o el aumento de turbidez) en sistemas resilientes, como las lagunas costeras (Chiappa-Carrara, *et al.*, 2017);
- Considerar el área de descarga final de efluentes;
- Considerar áreas accesibles al turismo;
- Considerar la conservación de especies.

A partir de estas consideraciones, se contrastaron dos posibles ubicaciones para la instalación de la planta RED. La primera, detrás de un pequeño muelle en la laguna, donde hay un espacio grande disponible para su construcción (letra A en la Figura 10). Sin embargo, en esta ubicación, se inducirían impactos ambientales significativamente mayores que con otra opción (letra B de la Figura 10). Este contraste se debe primero a que en la ubicación A, la excavación para la introducción de las tuberías sería mayor, ya que el agua hipersalina se encuentra más lejos, y deben considerarse todos los impactos asociados con los diversos factores estresantes en la fase de construcción (C1, C2 y C3, Figura 18). En segundo lugar, en la ubicación A, la tubería pasaría a través de varios manchones de manglar y, por lo tanto, la vegetación y su fauna asociada se verían gravemente afectadas. En tercer lugar, en la ubicación A, aunque la disponibilidad de agua de mar es cercana (si se toma directamente de la boca de la laguna), la interrupción del flujo de la marea que ingresa a la laguna, debido a la ingesta constante de esta solución, generaría

diversos impactos negativos. Uno de los principales impactos posibles es que grandes áreas de la zona hipersalina que dependen de este intercambio mar-laguna podrían secarse. Por lo tanto, los sedimentos expuestos se salinizarían y grandes áreas de manglares se secarían. Además, la interrupción de este flujo cambiaría las condiciones hidrodinámicas que favorecen la distribución y abundancia de las diversas especies de peces reportadas en el la Tabla 6. Asimismo, esto afectaría los procesos de sedimentación en la boca de la laguna. Por otro lado, la descarga de efluentes de la ubicación A, podría generar cambios en la estructura termohalina en la laguna, o daños a la vegetación acuática y su fauna asociada (Figura 18).

Aunque la infraestructura propuesta es pequeña, la ubicación correcta de una planta y especialmente de las zonas de recolección (de las soluciones concertada y diluida) y de la zona de descarga puede resultar en grandes diferencias en términos de impactos. Como quedo claro en este ejemplo, donde al ubicar la planta en el sitio A se pueden generar varios impactos negativos que se puede evitar con la ubicación y el diseño de la planta misma planta pero en la ubicación B (Figura 10).

El proceso de diseño de este proyecto en sus tres fases, incluida la selección de la ubicación y los análisis de las posibles respuestas por los factores de estrés, se presentan a continuación.

## **6.2. Fase de construcción**

La ubicación propuesta para la planta RED es sobre el litoral costero, entre la laguna La Carbonera y la duna costera, fuera del polígono principal SRZ1, y bajo la jurisdicción de la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT) (letra A Figura 10, acercamiento en Figura 19). En este lugar, es necesario construir varios elementos (carreteras y otra infraestructura relacionada con los servicios básicos). En la literatura, como ejemplo, el diseño de una planta PRO con una capacidad de producción de 50 kW de potencia neta cubre aproximadamente 7000 m<sup>2</sup> (el tamaño aproximado de un campo de fútbol) (Andrade, 2015), mientras que el área de la planta RED de Afsluitdijk de 50 kW cubre aproximadamente 2750 m<sup>2</sup> (medidos a partir de los mapas de Google).

El área total propuesta en La Carbonera es de 5250 m<sup>2</sup>, los elementos a construirse de la planta RED se distribuyeron en un espacio de 3000 m<sup>2</sup> (Figuras 19 y 20), que incluye tres tanques para las soluciones usadas, el agua concentrada (hipersalina), diluida (marina o dulce), y el resultante efluente (salobre

marino). Esta obra también incluye en sus instalaciones un espacio para los módulos de membrana y para un laboratorio de pruebas. Finalmente, se destinan espacios para almacenamiento de insumos, almacenamiento de residuos, instalaciones sanitarias y una estación eléctrica (Figura 20).



Figura 19. Ubicación potencial de la planta de energía piloto RED en las inmediaciones de la laguna la Carbonera; las líneas punteadas indican las tuberías (Ver en Marin-Coria *et al.*, 2021).

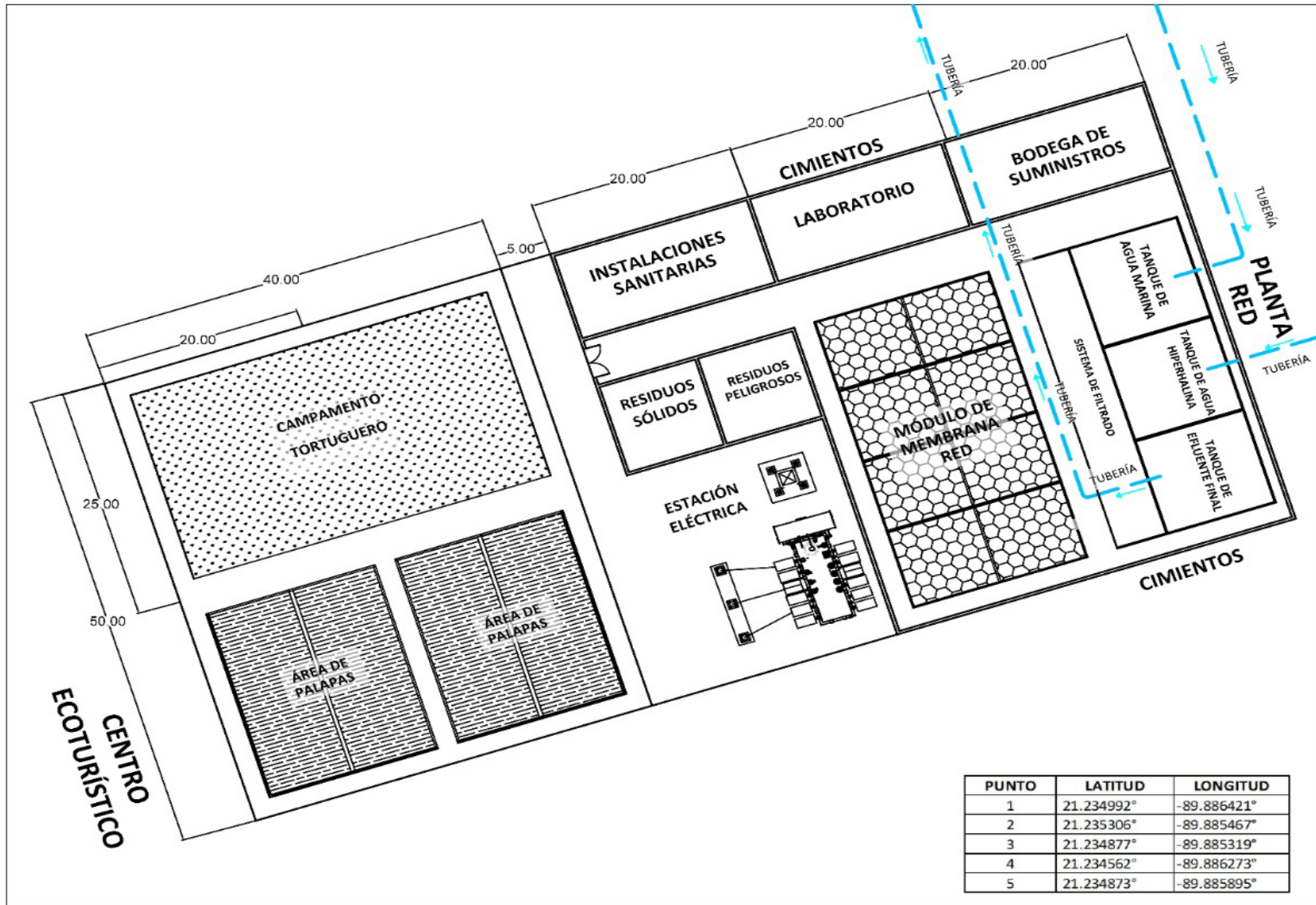


Figura 20. Distribución del espacio propuesto para la planta RED y el centro de ecoturismo en la laguna La Carbonera, 5250 m<sup>2</sup> (Ver en Marin-Coria *et al.*, 2021).



La laguna la Carbonera, a pesar de ser un espacio natural protegido, cada vez es más popular entre los turistas. Esto, principalmente debido a que se fomenta que el turismo es más rentable que la pesca y la agricultura. De acuerdo a la normativa que permite la presencia de infraestructura menor en la zona, se propone además que junto a la planta de SGE, se construya un pequeño centro ecoturístico (en un área total de 2000 m<sup>2</sup>), con espacio para cabañas, con áreas de descanso, miradores y una sección para suministros como kayaks y botes. (Figuras 19 y 20). Este centro podría incluir además un campamento de tortugas, ya que el área recibe tres especies protegidas (*E. imbricata*, *C. mydas* y *C. caretta*, Tabla 6), que llegan a desovar. La incubación de los huevos puestos en la playa mejoraría el éxito de la eclosión dentro del campamento, cuidando además a los huevos de la caza furtiva. Además de que las cabañas y corrales de nidificación podrían realizarse con materiales disponibles en la región como palmas locales (*S. yapa*, Tabla 6), muy utilizadas para este tipo de construcción (Caballero *et al.*, 2004).

El centro de ecoturismo se beneficiaría de la electricidad generada en la planta RED. La energía podría usarse para cargar teléfonos móviles, cámaras o linternas, además de la electricidad necesaria para el campamento de tortugas (principalmente los viveros). También podría utilizarse para suministrar energía a la gente que llega a acampar y que usa como fuente de energía baterías de diésel. Y en el futuro, también podría suministrar energía para botes eléctricos y frenar el uso de motores de combustibles no renovables. La cantidad de energía que la planta produciría podrá cubrir adicionalmente todas las necesidades de la planta, siendo así autosuficiente. Un centro de ecoturismo también proporcionaría empleos bien remunerados y se lograría limitar las presiones asociadas con el modo actual de turismo de masas. Ya que actualmente los visitantes que llegan de las zonas cercanas de los pueblos aledaños, han traído diversos problemas medioambientales en esas zonas (Figura 21). La riqueza biológica de la región es accesible en solo unos pocos lugares y muchas características del modelo turístico están equivocadas. Por ejemplo, en zonas como Sisal y Chuburná (Figura 21), el crecimiento excesivo ha provocado el relleno de zonas pantanosas o de ciénega para construir viviendas o desarrollos hoteleros, se han generado daños en las dunas costeras debido a la construcción de carreteras y casas de descanso, además de que hay una mala gestión de los desechos sólidos y las aguas residuales (Santoyo, 2017) (Figura 21). El uso de este sitio para el ecoturismo, el desarrollo científico y la conservación de especies podría ayudar a frenar un crecimiento tan caótico y dañino como el que se presenta en los poblados aledaños a La Carbonera. Además, los manglares, pantanos y vegetación de dunas se conservarían porque el centro ecoturístico no se construiría sobre estos ecosistemas. También promovería la conciencia ambiental entre la población local a través de educación ambiental promovida en el centro ecoturístico.

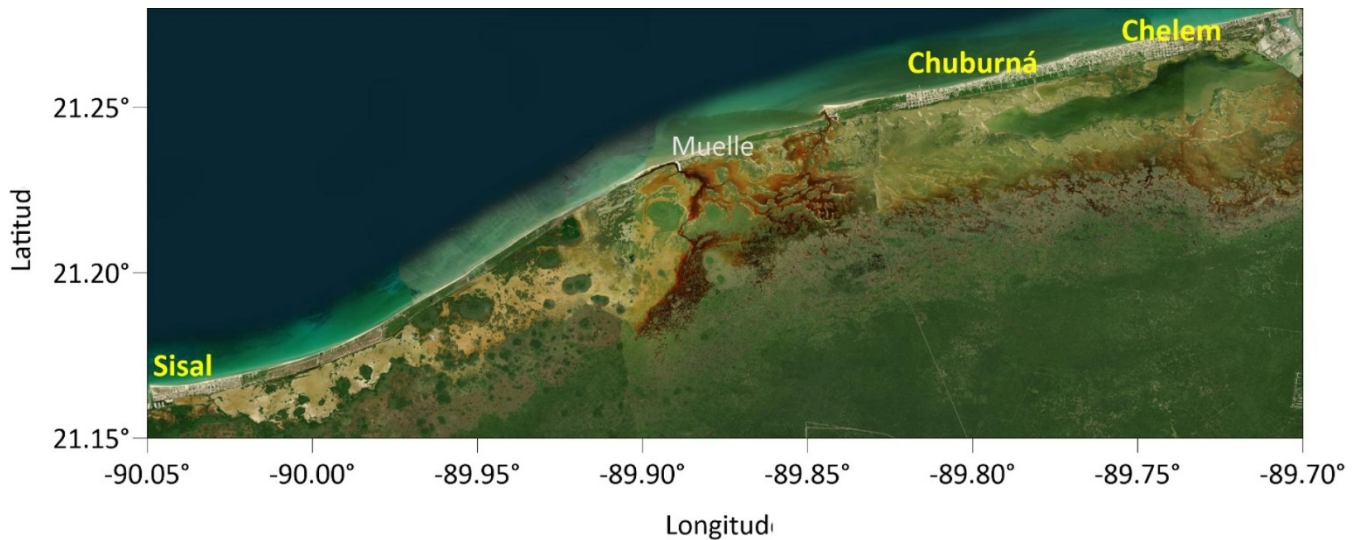


Figura 21. Vista aérea de los pueblos alrededor de la laguna La Carbonera (se muestra el muelle como referencia).

En cuanto a los factores de estrés examinados (Figura 18) en la fase de construcción, se incluyen la excavación, la preparación del sitio, la colocación de tuberías y la construcción de plataformas y módulos. Los impactos ambientales en esta fase son similares a los de cualquier otro proyecto de ingeniería: remoción de vegetación, pérdida de hábitat, erosión, sedimentación no deseada, compactación del suelo, aumento temporal de la turbidez, comportamiento de evitación de aves y peces (debido al ruido de la construcción), daño o remoción de bentos, cambio de uso de suelo, contaminación temporal del aire y alteración o interrupción del paisaje. No obstante, todo ello dependerá de las técnicas de construcción y de las medidas de mitigación que se tomen. La planta estaría ubicada a la orilla del mar, detrás de la duna costera (Figura 10, letra B). Y dado que la zona en ciertas temporadas se vería afectada por las mareas, se propone que la planta RED se construya sobre una infraestructura apoyada en pilares (palafitos) que permitirá que el agua fluya debajo. Este tipo de estructuras de bajo impacto no requieren una excavación extensa (Bahamon y Álvarez, 2009) y así se minimizarían algunos impactos sobre la geomorfología y la vegetación. También permitirían el paso libre de la vida silvestre, particularmente útil en eventos de marejada ciclónica. En términos de alteración del paisaje y cambio de uso de la tierra, como es un proyecto pequeño, se espera que los impactos sean mínimos. Dado que el sitio propuesto para la planta no modificará la hidrodinámica de la laguna al no estar al interior del sistema, no se esperan cambios en el transporte natural de sedimentos. Además, cualquier aumento de turbidez, daño o eliminación de bentos, erosión o compactación del suelo y contaminación del aire será solo temporal. En el caso de la pérdida de

vegetación y hábitat, se eligió esta ubicación (Figura 19) en virtud que no existen grandes parches de vegetación, a excepción de algunas especies de dunas costeras en las cercanías (Tabla 6).

Durante la construcción, para colocar las tuberías, se requieren trabajos de excavación, lo que puede provocar un aumento temporal de la turbidez (debido al movimiento de sedimentos), la pérdida de la cubierta vegetal (terrestre y acuática) y la pérdida de hábitat asociada, la eliminación de organismos bentónicos y la liberación de nutrientes y contaminantes del fondo de la laguna (Figura 18). Debe considerarse además que el sistema de bombeo debe ser de bajo costo y fácil de mantener (para evitar floraciones de algas, oxigenación y partículas en suspensión). En esta laguna se presentan tres posibles esquemas de aprovechamiento para la toma de agua en la laguna: Agua Marina y Agua Dulce (MW / FW); Agua marina y Agua hipersalina (MW / HW); o Agua dulce y Agua hipersalina (FW / HW), su presencia en la laguna puede verse en cada zona es específico (Figura 10). Las tomas de agua deben estar cerca de la planta, tanto para minimizar el impacto de las pérdidas por bombeo en la producción neta de energía como para evitar los impactos ambientales asociados con algunos factores estresantes (excavación) (Cipollina *et al.*, 2016). Una opción para evitar los impactos de la excavación es colocar tuberías en la superficie y así evitar los impactos asociados a este factor de estrés. En los esquemas MW/FW y FW/HW, el primer problema es que el área de donde emerge el agua dulce está dentro del polígono SZAE1, y aunque las actividades de ecoturismo y la explotación de flora y fauna pueden ocurrir en esta área con un permiso, la introducción de tuberías puede no ser compatible con las leyes de conservación de este polígono (DOEY, 2010). En las costas de Yucatán, el agua subterránea se utiliza para suministrar agua dulce a los asentamientos cercanos. Así, los esquemas MW/FW y FW/HW podrían ser una posibilidad mediante la utilización de pozos de bombeo para extraer agua dulce o salobre (Graniel *et al.*, 2004) a fin de evitar efectos negativos en otros procesos y actividades.

En el esquema MW/HW, (Figura 19), el agua hipersalina podría tomarse de la zona hipersalina a la planta, y la tubería pasaría a través de partes del polígono SRZ1; sin embargo, se utilizaría infraestructura sostenible de bajo impacto (Figura 19). El agua de mar se llevaría a la planta directamente desde el mar, bajo la jurisdicción de la ZOFEMAT (Figura 19). Aunque otra posibilidad en esta región donde existe una alta radiación y evaporación, y donde naturalmente se generan condiciones hiperhalinas, sería cosechar el agua hiperhalina mediante la utilización de estanques de evaporación de agua de mar. Por tanto, el volumen de agua hiperhalina no cambiaría al interior de la laguna y no sería un impedimento ambiental.

Para la producción de energía esperada, se requiere una entrada de 200 m<sup>3</sup>/h de ambas soluciones (Cipollina *et al.*, 2016). Estas entradas de agua pasarán por una red hidráulica, que incluye el conjunto de tuberías, bombas y otros accesorios (codos, válvulas, etc.) que permitirán la entrada y salida de las soluciones. Para un flujo de este volumen, se requieren tuberías de 10 pulgadas de diámetro; por lo tanto, los impactos asociados con la excavación serán menores. Si se canaliza parte del agua hipersalina desde la laguna hacia la planta, y se pasa por algunas zonas de manglares (que son mínimas), se deberá tener especial atención a las especies de manglares protegidas (*C. erectus*, *A. germinans*, *R. mangle* y *L. racemosa*) (SEMARNAT, 2002). Para la tubería de descarga, se aplican los mismos factores. Ya que estas especies son importantes porque brindan refugio y áreas de protección para aves y diversas especies de peces, y brindan servicios ecosistémicos como filtrar las descargas de agua del continente al mar (Osland *et al.*, 2018) y protección contra el viento y las olas que previene la erosión costera en una zona que también se ve afectada por huracanes (Capurro, 2002).

En la fase de construcción, dado el diseño propuesto, no se instalarían tuberías a gran escala dentro de la laguna; por lo tanto, la pérdida de pastos marinos, la liberación de contaminantes y nutrientes del fondo de la laguna, y la remoción de organismos del bentos sería prácticamente nula, y el aumento de la turbidez por movimiento de sedimentos sería solo temporal (semanas). En cuanto al ecosistema de pastos marinos, en áreas con alta salinidad su presencia es nula o escasa, por lo que si se tomara agua de la zona hipersalina, al no estar presentes los pastos, no habrá daños a los mismos (Salas *et al.*, 2010; Palko, 2017). En la zona hipersalina, las profundidades son de 50 cm o menos (profundidades Figura 13, diseño de tubería Figura 19), por lo que la red hidráulica aquí debería poder bombear agua hipersalina desde diferentes puntos para evitar que se seque la zona.

Por otro lado, en cuanto al comportamiento de evitación de las aves debido al ruido de la construcción (Tabla 6), especies emblemáticas como el flamenco rosado (*P. ruber*, Tabla 6) y otras reportadas en el mismo listado, probablemente modificarían su distribución en la zona temporalmente (semanas) hasta el cese del ruido. Además, con la tecnología RED, no se utilizarán turbinas en la fase de operación; por lo tanto, la contaminación acústica solo se produciría durante la construcción y desmantelamiento.

### 6.3. Fase de operación

En esta fase, los impactos asociados con el bombeo de agua y el pretratamiento del agua (Figura 18) son los primeros que se deben considerar. Las soluciones concentrada y diluida que entran a la planta requieren obligatoriamente de un pretratamiento, ya que esto es un paso crucial para el funcionamiento del sistema RED (Vermaas *et al.*, 2013). Dicho sistema debe garantizar un rendimiento económico y una filtración de sedimentos eficaz (Cipollina *et al.*, 2016). En la planta RED de Afsluitdijk, el sistema de filtración es del tipo tambor y gravedad (Cipollina *et al.*, 2016). Los impactos asociados con el bombeo y el pretratamiento de agua están relacionados con la cantidad de agua dulce y agua hipersalina que se tomarán del sistema RED y pasarán a través de él. Estos impactos incluyen cambios en los cursos de agua naturales, así como cambios en los nutrientes y la salinidad del agua. Posiblemente, y dependiendo de la intensidad, estas alteraciones pueden afectar a especies nativas. Por ejemplo, se sabe que los cambios en la salinidad alteran el comportamiento reproductivo y alimentario de los flamings y los cangrejos herradura (*L. polyphemus*, Tabla 6) (Wojtarowski *et al.*, 2021).

Otro impacto es la posible disminución de la biomasa de fitoplancton retenida en el sistema de filtración. Esto último es motivo de preocupación en la planta piloto de Afsluitdijk porque deben filtrarse grandes cantidades de plancton, peces y larvas, lo que puede tener implicaciones ecológicas y también económicas (Didde, 2014). Dado que la biomasa de los microorganismos es la base de las cadenas alimentarias, si se ve afectada por esto, se pueden provocar desequilibrios en toda la cadena alimentaria y en las pesquerías locales (Boehlert y Gill, 2010; Papapetrou y Kumpavat, 2016).

En este sentido, se necesitan estudios hidrológicos detallados para determinar la cantidad de agua que se puede extraer de la laguna sin generar los impactos antes mencionados. En el caso de la planta piloto de Afsluitdijk, las tomas en el mar y en el área de la laguna de 200 m<sup>3</sup>/h, asumiendo un potencial técnico de 1 MJ/m<sup>3</sup> de agua de mar y agua dulce, pueden producir hasta 50 kW de potencia neta (Cipollina *et al.*, 2016). En La Carbonera, tomar la solución concentrada de la laguna (agua hipersalina) contrarresta en cierta medida los efectos sobre la biomasa de los microorganismos, ya que la biomasa se reduce debido a la hipersalinidad de la zona (Wojtarowski *et al.*, 2021). La solución diluida podría tomarse de pozos en la costa, en cuyo caso no habría fitoplancton por falta de luz. Por otro lado, podría ser extraído directamente del mar, y este tendría menos microorganismos que el de las zonas estuarinas y marinas de la laguna

(Gómez, 2013). O bien, si se cosecha el agua hipersalina en estanque de evaporación a partir del agua marina, la cantidad de microorganismos también sería menor.

Otro factor de estrés en la fase de operación es la eliminación o descarga del subproducto final del proceso RED: que es la mezcla de las dos soluciones de entrada. Por ejemplo, si el esquema previsto es MW/HW, la mezcla de agua tendría una salinidad similar o superior a la del agua de mar. Pero para esto, el cambio concreto en la salinidad del efluente debe corroborarse en laboratorio. El efluente debe descargarse en un área adecuada, en el momento oportuno, ya que su dispersión debido a las condiciones hidrodinámicas del sistema no deben alterar los patrones de salinidad natural en ese ecosistema (Jerónimo *et al.*, 2012; Marin, 2016).

Dependiendo del volumen de agua que se descargue, pueden ser necesarios difusores (alternas o inclinadas) en la red hidráulica, para así distribuir los caudales descargados en diferentes direcciones dentro de la laguna o hacia el mar (CONAGUA, 2007) minimizando los impactos en una zona puntual. La descarga de agua no debería inducir impactos negativos en sitios donde se conocen el desempeño hidrodinámico y las concentraciones de salinidad antes del diseño para la descarga de efluentes. Esto es así en sitios donde ha habido un deterioro de la salinidad como resultado de actividades antropogénicas previas.

La salinidad es un parámetro ambiental que afecta la variedad y abundancia de peces reportados para esta laguna (Tabla 6) (Gallardo-Torres *et al.*, 2012). Además, puede afectar indirectamente la distribución de las especies a través del papel que juega en la densidad del agua y la hidrodinámica resultante (Enriquez *et al.*, 2013).

La variación espacial/temporal de las masas de agua y su salinidad es importante para la distribución de organismos, especialmente de peces, que solo viven bajo ciertos rangos de salinidad, de acuerdo con su tolerancia a este parámetro (Blaber, 1997; Vega-Cendejas y Hernández de Santillana, 2004; Telesh y Khlebovich, 2010). Esto es importante para la distribución de varias especies marinas de interés comercial (Tabla 6) distribuidas en la laguna. La descarga de un efluente en la laguna, de salinidad marina o ligeramente superior, en la zona hipersalina, reduciría la salinidad en esta zona y limitará así la cantidad de agua hipersalina disponible para la generación de energía. En consecuencia, el impacto en diferentes especies puede ser significativo.

Es importante mencionar que hay muchas características que hacen de este un ambiente que alberga una gran diversidad de peces, pero las altas salinidades se han asociado con una menor riqueza y diversidad de peces (Arceo-Carranza y Chávez-López, 2019). Así, para especies distribuidas en ambientes marinos/estuarinos, como *S. testudineus*, *S. notata*, *H. clupeiola*, *T. falcatus*, *L. griseus*, *L. synagris*, *F. polyommus*, *A. probatocephalus*, *E. gula*, *E. argenteus*, *M. curema*, *M. trichodon*, *H. unifasciatus*, *C. atherinoides* y *A. narinari*, (Tabla 6) (Gallardo-Torres *et al.*, 2012), una posible disminución de la salinidad en la zona hipersalina alteraría la extensión de sus áreas de distribución (aumentaría). Para las especies distribuidas en ambientes dulceacuícolas o salobres (zona oeste de la laguna) dado que la descarga del efluente se evitaría aquí, además de que la zona tiene una variabilidad diaria debida a la marea y a la descarga del ojo de agua, se esperaría no se generaran modificaciones en la diversidad de especies en esta zona. Y para especies que habitan la zona hiperhalina, que en general son especies fuertemente eurihalinas, se necesitaría revisar cuáles son y cómo podría cambiar su distribución ya que se trata de especies que se han adaptado a condiciones extremas de salinidad (Arceo-Carranza y Chávez-López, 2019).

Sin embargo, para evitar cambios en la salinidad y las consiguientes limitaciones del recurso (agua hiperhalina) o cambios en la distribución y abundancia de especies, es mejor descargar este efluente al mar ya que, al ser de salinidad marina o mayor, de pequeño volumen y a través del uso de difusores, no tendrá los mismos efectos que si fuera salmuera (Dawoud, 2012). Por otro lado, los factores de estrés como la liberación accidental de productos químicos de limpieza y mantenimiento y soluciones de electrolitos deben regularse en cualquier instalación que manipule productos químicos peligrosos.

Tanto en el pretratamiento de soluciones como en la limpieza de membranas e instalaciones se utilizan productos como el cloro, que puede resultar tóxico para el medio ambiente (Boehlert y Gill, 2010; Papapetrou y Kumpavat, 2016). Habitualmente, se utiliza cloro para evitar la degradación de las membranas provocada por el crecimiento biológico en ellas (biofouling). Pero existe evidencia de que incluso pequeñas cantidades de cloro (por ejemplo, 0,1 ppm) pueden tener impactos ecológicos que inducen una reducción significativa en la productividad del fitoplancton arrastrado y en la diversidad de especies (Papapetrou y Kumpavat, 2016). Del mismo modo, las soluciones de electrolitos deben manipularse con precaución (Aaberg, 2003). Estas soluciones, se almacenan en el compartimento de electrodos que también contiene los electrodos y está sellado con membranas que generalmente tienen propiedades especiales para asegurar el confinamiento del electrolito, recirculándolo en un circuito

cerrado (Scialdone *et al.*, 2012). Existen informes sobre la toxicidad de este tipo de elemento (Papapetrou y Kumpavat, 2016), pero no hay mucha información sobre los gases o compuestos tóxicos que se generan en el proceso redox dentro de dicho compartimento (dependiendo del par redox y del electrolito utilizado). Además, en estos compartimentos, a veces se produce cierta inestabilidad en el control del pH, ya que las membranas de intercambio aniónico tienen un número de transporte de protones no despreciable. Esto puede permitir un aumento en el pH de la solución del electrodo, acompañado de una disminución en el pH del efluente, y esto puede no ser ambientalmente aceptable si supera un umbral crítico (Scialdone *et al.*, 2012).

Si bien el pH del efluente solo cambiaría en caso de una liberación accidental, es importante señalar que este parámetro es un indicador de la calidad del agua. Afecta la toxicidad de determinados compuestos, como el amoníaco, al controlar su ionización, así como la biodisponibilidad de determinados contaminantes, como los metales pesados. Por ejemplo, el agua con un rango de pH de 6,5 a 8,5 es adecuada para muchos sistemas biológicos. Los valores superiores a 9,0 e inferiores a 5,8 limitan el desarrollo y la fisiología de los organismos acuáticos (Pérez-Castillo, 2008).

Finalmente, un impacto positivo que podría tener una planta de SGE en La Carbonera en la fase operativa, es que las tuberías proporcionarían nuevos espacios de colonización, principalmente dada por especies sésiles (Mendoza *et al.*, 2019). Estas estructuras ofrecen heterogeneidad al hábitat y superficies adecuadas para que las algas y los organismos sésiles puedan colonizar, especialmente fondos fangosos. Los peces y otros invertebrados estarían atraídos por la superficie dura, la sombra, los cambios en la turbulencia, los espacios pequeños y, finalmente, por la disponibilidad de fuentes de alimento (Boehlert y Gill, 2010; Garner *et al.*, 2019). Sin embargo, se debe tener en cuenta que este tipo de nuevos espacios de colonización también puede fomentar el establecimiento de especies no autóctonas, especies invasoras y floraciones de algas nocivas; por lo tanto, el alcance y la composición de la colonización son difíciles de predecir (Chen *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2019). Por ejemplo, en el caso de La Carbonera, las tuberías en las zonas hipersalinas serían fácilmente colonizadas en el corto plazo por percebes, que viven en las estructuras carbonatadas que se adhieren a las superficies, Y aunque serían fuente de alimento para peces u otros organismos y fomentarían la formación de hábitat artificiales, los percebes también pueden causar deterioro en los componentes de la planta RED. Por este motivo, su colonización debe tratarse con cautela ya que también dañan las membranas de los módulos RED, favoreciendo la proliferación de microorganismos que impiden el paso libre de agua o iones y por tanto reducen la funcionalidad del



sistema (Vaselbehagh *et al.*, 2017). Si bien la producción de 50 kW de energía eléctrica a partir de fuentes renovables no es de ninguna manera un desafío tecnológico, este trabajo tiene como objetivo proporcionar energía eléctrica utilizando las mejores tecnologías disponibles, produciendo la menor huella posible, en armonía con el uso del suelo de esta zona (Hernández-Fontes *et al.*, 2020).

Dada la madurez tecnológica actual de las técnicas SGE, estos objetivos aún no arrojan bajos costos. En primer lugar, porque el costo de la energía depende del establecimiento del mercado y la industria; si el desarrollo tecnológico tiene éxito, la fabricación de las piezas será más barata. Mientras tanto, se espera el apoyo de la financiación pública (Ciarreta *et al.*, 2014). Por otro lado, cuando se priorizan los aspectos ambientales y sociales, un análisis de costo-beneficio basado únicamente en variables económicas no es suficiente (Silva *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021). Si la comunidad se enfrenta a la energía cara en contraposición a la falta de energía, su decisión será controvertida.

Para este caso específico, el objetivo no es urbanizar la zona ni proporcionar servicios que favorezcan la urbanización. El objetivo es ofrecer servicios que ayuden a las actividades de protección y conservación ambiental que se llevan a cabo en la Laguna La Carbonera y sus alrededores, donde solo se permite el ecoturismo de baja densidad. En este sentido, una planta piloto que utilice tecnología emergente es adecuada y asequible. Es posible que otras tecnologías no sean factibles en este sitio. Por ejemplo, aunque existe una industria de energía solar establecida en el estado, la instalación de paneles solares puede aumentar la temperatura del aire a su alrededor, lo cual no es deseable en áreas ambientalmente sensibles. Además, se necesitaría una estrategia de almacenamiento de energía, aumentando así el costo final. Existen desventajas similares para la energía eólica, con dificultades de construcción adicionales (Martínez *et al.*, 2021). Por lo tanto, una planta de SGE, con las instalaciones adicionales propuestas, parece ser una buena estrategia para promover la educación, la conservación del medio ambiente y el desarrollo tecnológico.

#### **6.4. Fase de desmantelamiento**

En esta fase, se esperan pocos impactos. Una planta RED construida sobre palafitos no debería requerir una actividad a gran escala con maquinaria pesada. En el caso de las tuberías que han sido colonizadas por algas y organismos sésiles, que permiten la formación de hábitats artificiales, su remoción eliminará

este hábitat artificial y también los organismos que allí se instalaron. No se espera que el suelo se vea gravemente afectado por el tipo de cimientos utilizados. Por otro lado, el ruido asociado a la demolición puede afectar temporalmente el comportamiento de aves y peces. Finalmente, la infraestructura del propuesto centro de ecoturismo no debe ser demolida ya que estas instalaciones ofrecen espacios atractivos para el turismo y ayudan a la conservación de especies en el área.

## **7. Conclusiones**

Se realizó una evaluación ambiental preliminar de los impactos potenciales de una central eléctrica RED de 50 kW de potencia neta, utilizando la SGE en la laguna costera La Carbonera. Muchos impactos dependen del tamaño y ubicación de la planta SGE y de la toma de agua o de la tecnología a implementar. En este caso, una planta de energía SGE de pequeña escala, utilizando la tecnología RED, combinada con un centro de ecoturismo, proporcionaría energía renovable y protección de los recursos para la laguna y el área cercana a esta, además de proporcionar trabajos remunerados para la población local que eventualmente pueden fomentar una mejora en el cuidado de los ecosistemas costeros.

Aunque se pueden utilizar varios esquemas de agua en este ecosistema (FW/MW, FW/HW y MW/HW), todo dependerá de la disponibilidad de agua. En ambos casos, existen alternativas; por ejemplo, utilizar la solución diluida (FW) a través de pozos en la costa, y la solución concentrada (HW) directamente de la laguna (según estudios hidrológicos) o mediante estanques de evaporación de agua marina.

En cuanto a los impactos potenciales, los más preocupantes son el cambio en el volumen de agua en la laguna y la disposición del efluente final. Si bien se podrían esperar muchas respuestas potenciales negativas, si la EIA cubre información sobre las características bióticas y abióticas del ecosistema en un momento dado, además de las características del sitio, muchos de estos impactos podrían minimizarse o evitarse.

Si bien en Seyfried *et al.*, 2019 se sugirió que la mayoría de los impactos debido a la implementación de SGE ocurren en la fase de construcción, esta tesis menciona que, aunque los impactos entonces pueden ser muy evidentes, incluso con medidas de mitigación, la resiliencia de los sistemas costeros como la Carbonera podrían ayudar a recuperarse de efectos temporales, tal como pasa tras el paso de un huracán (Guzmán y Rodríguez, 2015). Más dañinos para los ecosistemas serían los cambios permanentes y

constantes en las características que induciría una planta SGE, como en la hidrodinámica (cambios en los caudales o volúmenes de agua) y los gradientes de salinidad. Por tanto, hay que tener en cuenta que al tratarse de ecosistemas muy variables que tienen una estrecha conectividad hidrológica con los sistemas circundantes, cualquier modificación puede tener implicaciones para los sistemas vecinos.

A partir de los resultados del análisis de Receptores y Respuestas, se debe subrayar la importancia de monitorear estas características antes, durante y después de la fase de construcción (Silva *et al.*, 2021). Muchos de los Receptores analizados también están presentes en otros sistemas con potencial de SGE. Si bien ya existen metodologías para su caracterización de la mayoría de ellos, todavía es difícil encontrar criterios cuantitativos que demuestren cuán positivos o negativos son estos Receptores cuando se aplique la tecnología SGE.

Aun así, este trabajo ofrece un primer intento de evaluar los cambios potenciales inducidos por las plantas SGE. Este análisis para La Carbonera es importante en la actualidad a pesar de que la tecnología discutida aún no se ha probado a gran escala y no hay plantas que la utilicen en México. Las pequeñas plantas piloto, como la que se sugiere aquí, podrían ofrecer ideas para desarrollos más grandes y exitosos en el futuro.

Finalmente, aunque este sistema es saludable en la actualidad, una EIA serviría para detectar procesos y condiciones sensibles, de manera que se permitan proponer medidas que minimicen los impactos negativos. De esta forma, los beneficios de SGE: cero emisiones de gases de efecto invernadero y el uso de fuentes renovables, podrían aprovecharse con éxito en La Carbonera.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Aaberg R. 2003 Osmotic power: a new and powerful renewable energy source? *Refocus*: 48–50.
2. Aaberg R., Bordado J., Thorsen T., Lampinen M. & Pienemann K. 2004. The Salinity Power Project (2004). <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/82766661EN6.pdf> , accessed: [04/04/12].
3. Achilli, A., Cathb, T. y Childress A. (2009). Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation. *Journal of Membrane Science*. 343:42-52.
4. Achilli, A. y Childress, A. (2010). Pressure retarded osmosis: From the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation — *Review*. *Desalination*. 261:205–211.
5. Alemán-Nava G., Casiano-Flores V., Cárdenas-Chávez D., Díaz-Chavez R., Scarlat N., Mahlkecht J., Dallemand J. & Parra R. 2014. Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 32:140-153.
6. Alvarez-Silva, O., Winter, C., & Osorio, A. F. 2014. Salinity gradient energy at river mouths. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(10), 410-415.
7. Álvarez Silva, O. A. 2014. *Salinity gradient energy harnessing at river mouths. From theoretical to extractable resources* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín)
8. Álvarez-Silva, O., y A. F. Osorio. 2015. Salinity gradient energy potential in Colombia considering site specific constraints. *Renewable Energy*, 74, 737-748.
9. Álvarez-Silva O., Osorio A. Winter C. 2016. Practical global salinity gradient energy potencial. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 60:1387-1395.
10. Andrade E. 2015. Desarrollo de una metodología para diseñar una planta de energía osmótica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 150 p.
11. Arceo-Carranza, D.; Chávez-López, R. 2019. Cambio Climático, Estuarios e Hipersalinidad. In *Tópicos de Agenda para la Sostenibilidad de Costas y Mares Mexicanos*; Rivera-Arriaga, E., Sánchez-Gil, P., Gutiérrez, J., Eds.; Universidad Autónoma de Campeche: Campeche, Mexico; pp. 275–290.

12. Bahamón, A.; Álvarez, A.M. 2009. *Palafito: De Arquitectura Vernácula a Contemporánea*; Parramón: Spain; p. 144.
13. Barbier E., Constanza R. y Twilley R. 1994. *Lineamientos para la evaluación de humedales tropicales. Proyecto Conservación para el Desarrollo Sostenible en América Central*. Turrialba, Costa Rica. 63p.
14. Batllori-Sampedro E., González-Piedra J., Díaz-Sosa J. y Febles-Patrón J. 2005. Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 59:74-92.
15. Blaber S. 1997. *Fish and fisheries of tropical estuaries*. Chapman & Hall. London. Primera edición. 367p.
16. Berrouche P. & Pillay P. 2012. Determination of salinity gradient power potential in Québec, Canada. *J. Renewable Sustainable Energy*. 4, 053113.
17. Bonilla-Gómez J.L., Badillo-Alemán M., Gallardo-Torres A. y Chiappa-Carrara X. 2012. Temporal variation, growth and natural mortality of two species of mojarras (Perciformes: Gerreidae) from a tropical coastal lagoon: La Carbonera, Yucatan, Mexico. *Rev. Mar. Cost.* ISSN 1659-455X. 5: 57-67.
18. Boehlert, G.; Gill, A. 2010. Environmental and Ecological Effects of Ocean Renewable Energy Development: A Current Synthesis. *Oceanography*, 23, 68–81.
19. Brogioli, D., (2009). Extracting renewable energy from a salinity difference using a capacitor. *Physical Review Letters*. 103(5):058501(4).
20. Caballero, J.; Pulido, M.; Martínez-Ballesté, A. 2004. *The Use of the Guano Palm (Sabal Yapa) in the Tourism Industry in Quintana Roo, Mexico*; Forest Products, Livelihoods and Conservation. Case Studies on Non-Timber Forest Products Management Systems; Alexiades, M., Shanley, P., Eds.; CIFOR-CGIAR: América Latina. Volume 3.
21. Calderón J. 2010. La política ambiental en México: Gestión e instrumentos económicos. *El Cotidiano*. 162:91-97.
22. Cancino-Solórzano A., Villicaña-Ortiz E., Guitiérrez-Tranhorras A. & Xiberta-Bernat J. 2010. Electricity sector in Mexico: Current status. Contribution of renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14:454-461.

23. Carbajal N. 2009. *Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. CQ063. México D. F.
24. Carrillo, M., Enríquez, P. y Meléndez, A. 2017. Gestión comunitaria y potencial del aviturismo en Centro de Ecoturismo Sustentable El Madresal, Chiapas, México. *Revista El Periplo Sustentable*. 33:564-604.
25. Castilla A. 2014. Energías renovables y turismo comunitario: una apuesta conjunta para el desarrollo humano sostenible de las comunidades rurales. *Energética*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. 93-105. ISSN: 2357612X.
26. Carmona-Escalante A., Guadarrama P., Ramos-Zapata J., Castillo-Argüero S. & Montaña NM. 2013. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with coastal vegetation in Chuburna, Yucatan, Mexico. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 16, 431–443.
27. Capurro, L. 2002. A large coastal ecosystem: The Yucatán Península. *Adv. Perspect.* 22, 69–75.
28. Casáres, R. 2009. Hidrogeología de la zona de descarga del acuífero del estado de Yucatán y sus implicaciones ambientales. Tesis de Maestría en Ingeniería Opción Hidrología. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
29. Chiappa-Carrara X., Gallardo A., Galindo C., Loera J., Rioja R. y Badillo M. Refugios estuarinos: cambios en la estructura de la comunidad de peces en la laguna de la Carbonera durante un evento de marea roja. 2012. En Recursos acuáticos costeros del sureste vol. II. Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán. ISBN 978-607-9060-08-4. 353-374 p.
30. Chiappa-Carrara X., Enríquez C., Mariño I., Badillo M., Gallardo A., Yáñez C. Marin-Coria E., Arena L., Guadarrama P. López, K.; et al. 2017. Monitoreo ambiental de largo Plazo, herramienta para evaluar la Resiliencia de sistemas costeros. In Caracterización Multidisciplinaria de la Zona Costera de Sisal; Garza-Pérez, J.R., Ize Lema, I., Eds.; El Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera: Yucatán, México, 2017
31. Chen, Q.; Yuan, H.; Chen, P. 2019. Short-term effects of artificial reef construction on the taxonomic diversity and eco-exergy of the macrobenthic faunal community in the Pearl River Estuary, China. *Ecol. Indic.* 98, 772–782, doi:10.1016/j.ecolind.2018.12.001
32. Ciarreta, A.; Espinosa, M.P.; Pizarro-Irizar, C. 2014. Is green energy expensive? Empirical evidence from the Spanish electricity market. *Energy Policy*, 69, 205–215, doi:10.1016/j.enpol.2014.02.025.

33. Cipollina, A., Micale, G., Tamburini, A., Tedesco, M., Gurreri, L., Veerman, J. & Grasman, S. 2016. Reverse electrodialysis: Applications. In *Sustainability Energy from Salinity Gradients*; Cipollina, A., Micale, G., Eds.; Woodhead Publishing: 2016; United Kingdom. pp. 135–180; doi:10.1016/B978-0-08-100312-1.00005-5.
34. CONAGUA. 2007. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Guía para el Diseño de Emisores Submarinos*. México.
35. Contreras F. y Castañeda F. 2004. Lagunas Costeras y Estuarios del Golfo de México: hacia el establecimiento de índices ecológicos. En: Caso, M., Pisantry I, Ezcurra E. 2000. *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*, Volumen 1. SEMARNAT, INE, IE, HRIGMS. México. 627p.
36. Copping, A., Sather, N., Hanna, L., Whiting, J., Zydlewsk, G., Staines, G., Gill, A., Hutchison, I., O'Hagan, A.M., Simas, T., Bald, J., Sparling C., Wood, J., and Masden, E. 2016. Annex IV 2016 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World.
37. Coria D. 2008. El estudio de impacto ambiental: características y metodologías. *Invenio*. 11(20):125-135.
38. Coronado Y. 2016. El ecoturismo como opción para el desarrollo local sustentable en el Pueblo Mágico de Tlalpujahua, Michoacán. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. 225 p.
39. Dawoud, M.A., Al Mulla, M.M., 2012. Impactos ambientales de la desalinización de agua de mar: estudio de caso del Golfo Árabe. *J. Environ. Sostener*. 1 (3):22–37.
40. Del Barco, L. 2010. Turismo comunitario en países en vías de desarrollo: buenas prácticas para la planificación de un emprendimiento. Tesis de Maestría. Universidad de Alicante, Instituto de Investigaciones Turísticas. 119 p. <http://hdl.handle.net/10045/16411>
41. Diario Oficial del Estado de Yucatán. DOEY.; 2010. Decreto Número 285, 19 de Marzo de 2010; Gobierno del Estado: Mérida, Mexico, 2010.
42. Diario Oficial de la Federación (DOF). 2019. Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019) . Consultado 22-10-2021.
43. Didde, R. 2014. Pilot Plant Brings “Blue Energy” Closer. Available online: <https://resource.wur.nl/en/show/Pilot-plant-brings-blue-energy-closer.htm> (accessed on 23-02-2021).

44. Długołęcki, P., Dąbrowska, J., Nymeijer, K. y Wessling, M. (2010). Ion conductive spacers for increased power generation in reverse electrodialysis. *Journal on Membrane Science*. 347:101-7.
45. Edenhofer O., Seyboth K., Creutzling F. & Schlömer S. 2013. On the Sustainability of Renewable Energy Sources. *Annual Review of Environment and Resources*. 38:169–200.
46. Emdadi A., Gikas P., Farazak M. & Emami Y. 2016. Salinity gradient energy potential at the hyper saline Urmia Lake-ZarrinehRud River system in Iran. *Renewable Energy*. 86:154-162.
47. Enriquez, C.; Mariño-Tapia, I.; Jeronimo, G.; Capurro-Filograsso, L. 2013. Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Cont. Shelf Res.* 69, 101–109, doi:10.1016/j.csr.2013.08.018.
48. Gallardo-Torres, A.; Badillo-Alemán, M.; Galindo-de Santiago, C.; Loera-Pérez, J.; Rioja-Nieto, R.; Chiappa-Carrara, X. 2012. *Listado Taxonómico de los Peces de la Laguna Boca de la Carbonera, Yucatán: Un Primer paso para el Manejo y Evaluación de los Recursos Costeros del Norte de Yucatán*; En Recursos Acuáticos Costeros del Sureste Vol. II. Fondo Mixto—CONACYT—Gobierno del estado de Yucatán; México. pp. 270–288; ISBN 978-607-9060-08-4.
49. García A. 2000. Manual auxiliar para la implementación de proyectos ecoturísticos: el caso de Honduras. Tesis de Licenciatura. Universidad de Zamorano, Honduras. 87 p.
50. Garner, S.B.; Boswell, K.M.; Lewis, J.P.; Tarnecki, J.H.; Patterson, W.F. 2019. Effect of reef morphology and depth on fish community and trophic structure in the northcentral Gulf of Mexico. *Estuarine Coast. Shelf Sci.* 230, 106423, doi:10.1016/j.ecss.2019.106423.
51. Gómez, L. 2013. Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Rev. Cub. Quím.* 19, 3–20.
52. Graniel, E.; Vera, I.; González, L. 2004. Dinámica de la interfase salina y calidad del agua en la costa nororiental de Yucatán. *Ingeniería*. 8, 15–25.
53. Guadarrama P., Salinas-Peba L., Chiapa-Carrara X. y Ramos-Zapata J. 2018. Floristic, composition and structure of vegetation communities of eastern portion of the State Reserve Ciénegas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 89:784-805
54. Guzmán, G. y Rodríguez J. 2015. Elementos de la vulnerabilidad ante huracanes, Impacto del huracán Isidoro en Chabihau, Yobain, Yucatán. *Política y Cultura*. 45:183-210.
55. Heinz, D. 2014. Generación a pequeña escala para electrificación de áreas rurales y remotas. Trabajo presentado para PH240, Universidad de Stanford, otoño de 2014.
56. Helfer F. & Lemckert Ch. 2015. The power of salinity gradients: An Australian example. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 50:1-16.



57. Hernández-Fontes, J.V.; Martínez, M.L.; Wojtarowski, A.; González-Mendoza, J.L.; Landgrave, R.; Silva, R. 2020. Is ocean energy an alternative in developing regions? A case study in Michoacan, Mexico. *J. Clean. Prod.* 266, 121984, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121984.
58. Heinemann, E. (2014). *ENERGAL – Energías renovables para Galápagos*. Ecuador: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
59. HydroQuébec. 2015. A renewable energy option. Osmotic Power. (<http://www.hydroquebec.com/sustainable-development/documentation-cente>).
60. Hyman & Stiffel EL. 1988. *Combining Facts and Values. In Environmental Impact Assessment: Theories and Techniques*. 1st ed.; Routledge: New York, NY, USA. p. 322
61. Huacuz J. 2005. The road to green power in Mexico-reflections on the prospects for the large scale and sustainable implementation of renewable energy. *Energy Policy*. 33:2087-2099.
62. Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático (INECOL). 2007. El mar, las islas y sus recursos. Importancia y conceptualización.
63. International Energy Agency (IEA). 2007. Energy Technologies at the Cutting Edge. Disponible en: [www.iea.org/w/bookshop/pricing.html](http://www.iea.org/w/bookshop/pricing.html)
64. IRENA. 2018. Transforming small-island power systems: Technical planning studies for the integration of variable renewables, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-074-7.
65. Jerónimo G., Gómez-Valdés J., Badillo M., López-Aguilar K., Galindo C., Gallardo A., Loera J., Arrollo-Pedraza L. y Chiappa-Carrara X. 2012. Variación estacional de temperatura y salinidad en la laguna la Carbonera, Yucatán, 2009-2010. En Recursos acuáticos costeros del sureste vol. II. Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán. ISBN 978-607-9060-08-4. 71-88p.
66. Jia Z., Wang B., Song Sh. & Fan Y. 2014. Blue energy: Current technologies for sustainable power generation from water salinity gradient. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31:91-100.
67. Karunarathne H. & Walpalage S. 2013. Applicability of Pressure Retarded Osmosis Power Generation Technology in Sri Lanka. *Energy Procedia*. 34:211-217.
68. Kjerfve B. 1986. *Comparative oceanography of coastal lagoons*. Academic Press In. 63- 81p.
69. Kuleszo J., Kroeze C., Post J. & Fekete B. 2010. The potential of blue energy for reducing emissions of CO<sub>2</sub> and non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases. *Journal Integrated Environmental Science*. 7:89-96.

70. Lara-Lara J.R., et al. 2008. *Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales, en Capital natural de México*. Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO. México. 109-134p.
71. Lastra J., Colonnier L. y Brenes B. 2012. Microgeneración de energía a partir de fuentes alternas. Tecnológico de Monterrey. 99 p.
72. Lin S., Straub A. & Elimelech M. 2014. Thermodynamic limits of extractable energy by pressure retarded osmosis. *Energy & Environmental Science*. 7:2706-2714.
73. Loeb, S. y Norman, R.S., (1975). Osmotic power plants. *Science*. 189:654-655.
74. Lokey E. 2009. Barriers to clean development mechanism renewable energy projects in Mexico. *Renewable Energy*. 34: 504–508.
75. Micale, G., Cipollina, A. y Tamburini A. (2016). *Salinity gradient energy*. Chapter 1. En Cipollina, A. y Micale, G. Sustainable Energy from Salinity Gradients. ELSEVIER. ISBN: 978-0-08-100323-7.
76. Marin Coria, E.; Enriquez, C. Variaciones de temperatura y salinidad en el sistema lagunar La Carbonera, Yucatán, México. *Rev. Digit. E-BIOS* 2016, 4, 35–45.
77. Marin E. 2016. Modelación de la hidrodinámica de un sistema lagunar en humedal costero con descargas de agua subterránea (DAS) y su relación con la distribución de algunas especies de ictiofauna. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Tesis de Maestría. 136 p.
78. Marín Coria, E.J., M. Roldán Carvajal, C. Sánchez Sáenz, C. Enríquez, A. Félix Delgado, R. Silva Casarín, y E. Mendoza Baldwin 2020. Energía del Océano. Energía del Gradiente Salino. CEMIE-Océano, Universidad Autónoma de Campeche. 57 p.
79. Marin-Coria E. Silva R. Enríquez C. Martínez ML. & Mendoza E. 2021. Environmental Assessment of the Impacts and Benefits of a Salinity Gradient Energy Pilot Plant. *Energies*. 14 (11): 3252.
80. Mariño I. y Enríquez C. 2011. *Estudios batimétricos, hidrodinámicos y de calidad de agua en lagunas costeras de Yucatán*. Reporte Técnico, Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán, Clave: 000000000066254. 121p.
81. Martínez E., Borghi C., Dalmasso A. y Candia R. 1999. Evaluación del impacto ambiental. Propuesta metodológica expeditiva y estudio de caso en la Reserva Altoandina Laguna del Diamante, Argentina. *Multequina*. 8:11-120.

82. Martínez, M.L.; Vázquez, G.; Pérez-Maqueo, O.; Silva, R.; Moreno-Casasasola, P.; Lopez-Portillo, J.; Mcgregor, I.; Hecke, I.G.; Hernández-Santana, J.; García-Franco, J.; et al. 2021. A systemic view of potential environmental impacts of ocean energy production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* Submitted.
83. Mendoza E., Lithgow D., Flores P., Félix A., Simas T. y Silva R. 2019. A framework to evaluate the environmental impact of OCEAN energy devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 112:440–449.
84. Norman, R.S., (1974). Water salination: a source of energy. *Science.* 186:350-352.
85. Ortega, S., Stenzel, P., Alvarez-Silva, O., & Osorio, A. F. (2014). Site-specific potential analysis for pressure retarded osmosis (PRO) power plants–The León River example. *Renewable energy*, 68, 466-474.
86. Osland MJ., Feher LC., López-Portillo J., Day RH., Suman DO., Guzmán-Menéndez JM. & Rivera-Monroy VH. 2018. Mangrove forests in a rapidly changing world: Global change impacts and conservation opportunities along the Gulf of Mexico coast. *Estuarine Coast. Shelf Sci.* 214, 120–140, doi:10.1016/j.ecss.2018.09.006.
87. Palko, H. 2017. *Exploring Potential Sites for Salinity Gradient Renewable Energy on the North Carolina Coast and Evaluating the Potential Effects of Local Salinity Regime Variation on SAV Communities due to Reverse Electrodialysis Effluent*; University of North Carolina at Chapel Hill, NC, USA.
88. Papapetrou M., y Kumpavat K. 2016. Environmental aspects and economics of salinity gradient power (SGP) processes. Chapter 10. In Cipollina, A. y Micale, G. Sustainable Energy from Salinity Gradients. ELSEVIER. ISBN: 978-0-08-100323-7.
89. Pattle, R. (1954). Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile. *Nature.* 174:660.
90. Planta generadora de electricidad a pequeña escala. (Oportunidades de energía renovable). Recuperado de [https://www.mpoweruk.com/ss\\_electricity\\_generation.htm?fbclid=IwAR3F6\\_s3mrAxx5Of-yCNi2EB32-LnGJNK3s0VxBoNdi2uT3xs2uIM7AwKpQ](https://www.mpoweruk.com/ss_electricity_generation.htm?fbclid=IwAR3F6_s3mrAxx5Of-yCNi2EB32-LnGJNK3s0VxBoNdi2uT3xs2uIM7AwKpQ). (Acceso: 25-05-2021).
91. Pérez-Castillo, A.G.; Rodríguez, A. 2008. Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación *Rev. Biol. Trop.* 56, 1905–1918.

92. Poot-López G., López-Rocha J., González-Salas C., Guillén-Hernández S & Villegas-Hernández H. 2019. Sex related differences in density, selectivity and vulnerability of the Atlantic blue crab, *Callinectes sapidus* (Rathbun, 1896), in the southern Gulf of Mexico. *Regional Studies in Marine Sciences*. 32: 100846.
93. Posada Vanegas, G., V. Chávez Cerón, J.V. Hernández Fontes, Y. Rodríguez Cueto, G. Cadena Sánchez, A. Félix Delgado, R. González Huerta, E. López Honorato y R. Silva Casarín. 2019. El Futuro de las Energías Marinas en México. p. 255-274. En: Rivera-Arriaga, E., P. Sánchez-Gil, y J. Gutiérrez (eds.). Tópicos de Agenda para la Sostenibilidad de Costas y Mares Mexicanos. Universidad Autónoma de Campeche. Red ricomar. 334 p. isbn 978-607-8444-57-1. doi: 10.26359/epomex.0519
94. Post J., Veerman J., Hamelers H., Euverink G., Metz S., Nymeijer K. & Buisman C. 2007. Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis. *Journal of Membrane Science*. 288:218-230.
95. Reyes-Mendoza O., Álvarez-Silva O., Chiapa-Carrara X. y Enríquez C. 2020. Variability of the thermohaline structure of a coastal hypersaline lagoon and the implications for salinity gradient energy harvesting. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 38 (2020) 100645.
96. Rodriguez, J. 2011. Escapada Rural. Energías renovables para alojamientos rurales. Recuperado el 06 de mayo del 2021 de <http://www.escapadarural.com/blog/propietarios/energias-renovables-para-alojamientos-rurales/>
97. Romero, A. 2006. Las Energías Renovables en el Turismo Comunitario. Obtenido de <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4082/1/arturoromero>. Pdf
98. Salas, M.; Gómez-López, D.; Duque, G. 2010. Estructura de las praderas de *Thalassia testudinum* en un gradiente de profundidad en la Guajira, Caribe colombiano. *Bol. Investig. Mar. Costeras*. 39, 381–395.
99. Sánchez-Santillán N., Lanza-Espino G. y Sánchez-Trejo R. 2012. Análisis de la climatología dinámica de la península de Yucatán, México. En Recursos acuáticos costeros del sureste vol. II. Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán. ISBN 978-607-9060-08-4. 353-374 p.

100. Sánchez R. 2012. *Evaluación de la hidrodinámica y modelación numérica de la laguna La Carbonera, Yucatán*. Tesis de Maestría. UNAM. Unidad Sisal, Yucatán, México. 125p.
101. Sandoval-Gio JJ., Zamora-Bustillos R., Avilés-Ramírez GA., Ortiz-León HJ. & Rosas-Correa, CO. 2016. First report of a spawning site of *Limulus polyhemus* at Ría Lagartos Biosphere Reserve, Yucatan, Mexico. *Revista Bio Ciencias*. 5:e354.
102. Santoyo, A. 2017. *Esbozo Monográfico de Sisal, Yucatán*; Reporte Técnico; Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera: México. 119p.
103. Scialdone, O., Guarisco, C., Grispo, S., D' Angelo, A., Galia, A., 2012. Investigation of electrode material—redox couple systems for reverse electro dialysis processes. Part I: iron redox couples. *J. Electroanal. Chem.* 681, 66–75.
104. Scialdone, O., Albanese, A., D' Angelo, A., Guarisco, C., Galia, A., 2013. Investigation of electrode material—redox couple systems for reverse electro dialysis processes. Part II: experiments in a stack with 10–50 cell pairs. *J. Electroanal. Chem.* 704, 1–9.
105. Silva, R.; Chávez, V.; Bouma, T.J.; van Tussenbroek, B.I.; Arkema, K.K.; Martínez, M.L.; Oumeraci, H.; Heymans, J.J.; Osorio, A.F.; Mendoza, E.; et al. 2019. The Incorporation of Biophysical and Social Components in Coastal Management. *Estuaries Coasts*, 42, 1695–1708, doi:10.1007/s12237-019-00559-5.
106. Silva, R.; Oumeraci, H.; Martínez, M.L.; Chávez, V.; Lithgow, D.; van Tussenbroek, B.I.; van Rijswijk, H.F.M.W.; Bouma, T.J. 2021. Ten Commandments for Sustainable, Safe, and W/Healthy Sandy Coasts Facing Global Change. *Front. Mar. Sci.* 8, doi:10.3389/fmars.2021.616321.
107. SEMARNAT. 2002. *Norma Oficial Mexicana NOM-059-Semarnat-2001. Protección Ambiental-Especies Nativas de México de Flora y Fauna Silvestres-Categorías de Riesgo y Especificaciones para su Inclusión, Exclusión o Cambio-Lista de Especies en Riesgo*. Diario Oficial de la Federación, 6 de Marzo del 2002, Segunda Sección; México.
108. Seyfried C., Palko H. & Dubb L. 2019. Potential local environmental impacts of salinity gradient energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 102 (2019) 111–120.
109. She Q., Jin X. & Tang Ch. 2012. Osmotic power production from salinity gradient resource by pressure retarded osmosis: Effects of operating conditions and reverse solute diffusion. *Journal of Membrane Science*. 401–402:262–273.

110. Skilhagen, S., Dugstad, J. y Aaberg R. (2008). Osmotic power-power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients. *Desalination*. 220:476-482.
111. Skramestro O. & Skilhagen S. 2008. Global status and perspectives of ocean energy technologies. Chapter: *Status of Technologies for Harnessing Salinity Power and the Current Osmotic Power Activities*.
112. Stenzel P., Wagner H., 2010. Osmotic power plants: Potential analysis and site criteria. 3rd Int Conf Ocean Energy. Proc 1–5.
113. Telesh, I.V.; Khlebovich, V.V. 2010. Principal processes within the estuarine salinity gradient: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 61, 149–155, doi:10.1016/j.marpolbul.2010.02.008.
114. Thor T. & Holt T. 2009. The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*. 335(1-2):103–110.
115. Torres W., Méndez M., Dorantes A. & Durán R. 2010. Estructura, composición y diversidad del matorral de duna costera en el litoral yucateco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 86, 37-51.
116. Vasselbehagh, M.; Karkhanechi, H.; Takagi, R.; Matsuyama, H. 2017. Biofouling phenomena on anion exchange membranes under the reverse electro dialysis process. *J. Membr. Sci.* 530, 232–239, doi:10.1016/j.memsci.2017.02.036.
117. Vidal R. 2005. *Regiones climáticas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. México. 216 p.
118. Veerman J., Saakes M., Metz SJ. & Harmsen GJ. 2009. Reverse electro dialysis: performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science*. 327:136-44.
119. Vega-Cendejas, M.E.; Hernández de Santillana, M. 2004. Fish community structure and dynamics in a coastal hypersaline lagoon: Rio Lagartos, Yucatan, Mexico. *Estuarine Coast. Shelf Sci.* 60, 285–299, doi:10.1016/j.ecss.2004.01.005.
120. Vermaas, D.A.; Kunteng, D.; Saakes, M.; Nijmeijer, K. 2013. Fouling in reverse electro dialysis under natural conditions. *Water Res.* 47, 1289–1298, doi:10.1016/j.watres.2012.11.053.

121. Wojtarowski, A.; Martínez, M.L.; Silva, R.; Vázquez, G.; Enriquez, C.; López-Portillo, J.; García-Franco, J.G.; MacGregor-Fors, I.; Lara-Domínguez, A.L.; Lithgow, D. 2021. Renewable energy production in a Mexican biosphere reserve: Assessing the potential using a multidisciplinary approach. *Sci. Total Environ.* 776, 145823, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145823.
122. Yang, X.; Lin, C.; Song, X.; Xu, M.; Yang, H. 2019. Effects of artificial reefs on the meiofaunal community and benthic environment—A case study in Bohai Sea, China. *Mar. Pollut. Bull.* 140, 179–187, doi:10.1016/j.marpolbul.2018.12.031.
123. Zhao S., Zou L., Tang Ch. & Mulcay D. 2012. Recent development in forward osmosis: Opportunities and challenges. *Journal of Membrane Science.* 396:1-21.