



Propuesta de diseño y viabilidad de uso de una Celda de Desalinización Microbiana para comunidades rurales del municipio de Riohacha.

2301-037

Gutiérrez Olaya Ruby Dayanna

Gutiérrez Solís Juan Diego

2301-037

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2023



**Propuesta de diseño y viabilidad de uso de una Celda de Desalinización Microbiana
para comunidades rurales del municipio de Riohacha.**

Práctica empresarial
2301-037

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Línea de investigación:
Ingeniería para la sostenibilidad

Director:
Jimena Roncancio Benítez

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2023

1. Tabla de contenido

4.	7
5. <i>Abstract</i>	7
6. <i>Introducción</i>	8
7. <i>Planteamiento el problema</i>	9
8. <i>Pregunta de investigación</i>	11
9. <i>Justificación</i>	11
10. <i>Objetivos general y específicos</i>	13
10.1.	13
10.2.	13
11.	13
11.1. <i>Estado del arte</i>	13
11.1.1. <i>Investigaciones académicas Universidad El Bosque</i>	13
11.1.2. <i>Investigaciones nacionales</i>	14
11.1.3 <i>Investigaciones internacionales</i>	15
11.2. <i>Marco teórico</i>	16
11.3. <i>Marco conceptual</i>	19
11.4. <i>Marco geográfico</i>	28
11.5. <i>Marco normativo</i>	31
11.6. <i>Marco Institucional</i>	33
12.	33
12.1. <i>Enfoque</i>	33
12.2. <i>Alcance</i>	34
12.3. <i>Método</i>	34
12.4. <i>Técnicas</i>	34
12.5. <i>Instrumentos</i>	35
12.6. <i>Unidad de análisis</i>	35
12.7. <i>Diseño de la investigación</i>	35
12.8. <i>Metodología por objetivo</i>	35

12.8.1. Metodología del objetivo específico 1: Comparar la eficiencia de diferentes técnicas de desalinización, con el propósito de determinar la alternativa que logré el mayor grado de desalinización y producción de agua potable.	35
12.8.2. Metodología del objetivo específico 2: Evaluar los criterios económicos, sociales y ambientales de la tecnología de CDM valorada a fin de conocer su viabilidad en las comunidades vulnerables del municipio de Riohacha.	39
12.8.3. Metodología del objetivo específico 3: Diseñar en un modelo 3D una Celda de Desalinización Microbiana evaluando la viabilidad de aplicación comunidades vulnerables del municipio de Riohacha.	41
13.	43
14.	45
15.	45
15.1. Comparar la eficiencia de diferentes técnicas de desalinización, con el propósito de determinar la alternativa que logré el mayor grado de desalinización y producción de agua potable.	45
15.2. Evaluar los criterios económicos, sociales y ambientales de la tecnología de CDM valorada a fin de conocer su viabilidad en las comunidades rurales del municipio de Riohacha.	47
15.3.	55
16.	81
16.1. Objetivo 1: Comparar la eficiencia de diferentes técnicas de desalinización, con el propósito de determinar la alternativa que logré el mayor grado de desalinización y producción de agua potable.	80
16.2. Objetivo 2. Evaluar los criterios económicos, sociales y ambientales de la tecnología de CDM valorada a fin de conocer su viabilidad en las comunidades rurales del municipio de Riohacha.	81
16.3. Objetivo 3. Diseñar una Celda de Desalinización Microbiana evaluando la viabilidad de aplicación en una comunidad vulnerable del municipio de Riohacha.	82
17.	90
18.	91
19.	93
20.	100

2. Listado de tablas

Tabla 1. Matriz normatividad ambiental.	30
Tabla 2. Continuación de la tabla 1.	31
Tabla 3. Normalización términos según tesauro de la UNESCO.	35
Tabla 4. Normalización términos según tesauro de IEEE.	35
Tabla 5. Ecuaciones para la búsqueda de información.	36
Tabla 6. Esquema de tabla comparativa para la elección de técnicas de desalinización.	37
Tabla 7. Puntaje según calidad de resultados.	38
Tabla 8. Puntaje según importancia del criterio.	38
Tabla 9. Matriz de síntesis de técnicas de desalinización.	45
Tabla 10. Comparación de implementación de técnicas de desalinización.	46
Tabla 11. Información general de los entrevistados.	49
Tabla 12. Inocuos que se pueden implementar en la celda.	74
Tabla 13. Tabla de enfermedades asociadas al consumo de agua no potable en La Guajira: Agentes causantes, síntomas y efectos.	76
Tabla 14. Materiales y costos de la CDM.	78
Tabla 15. Beneficios de un diseño compacto	82

3. Listado de Figuras

Figura 1. Mecanismo función de desalinización de la ósmosis inversa.	21
Figura 2. Celdas de desalinización microbiana.	25
Figura 3. Ubicación del municipio de Riohacha.	29
Figura 4. Primera parte de la organización de matriz de síntesis de técnicas de desalinización.	37
Figura 5. Segunda parte de la organización de matriz de síntesis de técnicas de desalinización.	38
Figura 6. Formato para la elaboración de la codificación.	41
Figura 7. Formato para la elaboración del análisis cualitativo.	41
Figura 8. Plan de trabajo del proyecto.	44
Figura 9. Vista lateral del plano y zonas de la CDM.	63
Figura 10. Dimensiones en vista lateral de la CDM.	64
Figura 11. Vista frontal de la CDM (zona E).	64
Figura 12. Vista frontal de la CDM (zona A).	65
Figura 13. Placas de membrana de la CDM.	65
Figura 14. Permeabilidad de las placas de membrana.	66
Figura 15. Sistema de flujo del agua.	67
Figura 16. Cámara de desalinización de la CDM.	68
Figura 17. Celda de Desalinización Microbiana con sistemas de flujo de agua.	69
Figura 18. Interior de la CDM.	70
Figura 19. Sistema interno de flujo de la CDM.	71
Figura 20. Sistema interno de flujo de la celda con la cubierta de la celda.	71
Figura 21. Sistema de flujo de agua salobre.	72
Figura 22. Sistema de flujo de agua salobre desde vista frontal.	72
Figura 23. Simulación de presión en la celda con entrada de agua.	73
Figura 24. Simulación de flujo de agua.	73
Figura 25. Simulación de flujo de agua en el proceso de desalinización.	74
Figura 26. Simulación de presión, flujo de agua y contornos de la superficie de la celda.	75

4. Resumen

El desafío global de la escasez de agua plantea múltiples problemáticas en Colombia, incluyendo el departamento de La Guajira, donde la falta de acceso a agua potable, una gestión inadecuada del recurso y la contaminación de fuentes hídricas generan impactos significativos. Esta situación conlleva no solo a enfermedades virales y bacterianas, sino también a un aumento de la pobreza y a la disminución en la calidad de vida de sus habitantes. En este contexto, este proyecto se enfoca en la creación de un modelo tridimensional digital de una Celda de Desalinización Microbiana (CDM) con el fin de proponer una tecnología que permita aumentar la producción de agua potable a partir de fuentes salobres. Este estudio implica un análisis exhaustivo de técnicas de desalinización, así como entrevistas semiestructuradas con los residentes de Riohacha, con el fin de proponer un diseño de CDM apropiado para las comunidades rurales que habitan en la zona de estudio. Como resultado, se logró obtener un modelo digital tridimensional de una CDM que se ajusta a las necesidades de las comunidades rurales en Riohacha, ofreciendo una posible solución para abordar la escasez de agua y mejorar las condiciones de vida de sus habitantes.

Palabras clave: Celdas de Desalinización Microbiana, escasez de agua, aplicabilidad, salud ambiental.

5. Abstract

The global challenge of water scarcity poses multiple problems in Colombia, including the department of La Guajira, where the lack of access to drinking water, inadequate management of the resource and contamination of water sources generate significant impacts. This situation leads not only to viral and bacterial diseases, but also to an increase in poverty and a decrease in the quality of life of its inhabitants. In this context, this project focuses on the creation of a three-dimensional digital model of a Microbial Desalination Cell (MDC) in order to propose a technology to increase the production of drinking water from brackish sources. This study involved an exhaustive analysis of desalination techniques, as well as semi-structured interviews with residents of Riohacha, in order to propose an appropriate MDC design for the rural communities living in the study area. As a result, a three-dimensional digital model of a CDM that fits the needs of the rural communities in Riohacha was obtained, offering a possible solution to address water scarcity and improve the living conditions of its inhabitants.

Keywords: Microbial Desalination Cells, water scarcity, applicability, environmental health.

6. Introducción

La escasez de agua es uno de los principales problemas a los cuales nos enfrentamos en el presente. Según el informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020, actualmente 2.200 millones de personas están privadas de acceso a agua potable y otros 4.200 millones están careciendo de sistemas de saneamiento seguro (UNESCO, 2020), poniendo en peligro el alcance del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 “Agua limpia y saneamiento” de la agenda 2030 de las Naciones Unidas (UNESCO, 2020).

Riohacha, ubicado en el departamento de La Guajira, se enfrenta a esta problemática de escasez de agua debido particularmente a las largas sequías que allí se presentan y la sobreexplotación de sus recursos naturales en actividades económicas como la minería y el turismo (Fernando et al., 2015). Esta problemática genera diversos desafíos en términos de seguridad hídrica y calidad de vida para los residentes de Riohacha.

Abordar esta complicación requiere un enfoque integral que considere tanto la gestión sostenible de los recursos hídricos como la necesidad de equilibrar el desarrollo económico con la protección de los recursos naturales y el bienestar de la comunidad local en Riohacha, La Guajira. Es por ello que se propone implementar tecnologías desalinizadoras que permitan la remoción de sal del agua salobre con el fin de disminuir la escasez de este recurso en comunidades rurales de Riohacha.

Entre las tecnologías innovadoras para proporcionar agua segura, se encuentran los mecanismos de desalinización por medio de procesos térmicos y de membrana, que consisten en el uso de distintos tipos de combustibles y diferencias de presión para disminuir la salinidad en el agua. Una técnica de lo mencionado anteriormente es la desalinización de electrodiálisis que se basa en la desmineralización de aguas salobres, haciendo que los iones de una misma carga vayan a lugares diferentes a los iones de carga opuesta, esto se logra mediante la aplicación de campos eléctricos con diferencias de potencial aplicados a los electrodos, y usando membranas que permitan solo el paso de los iones (Bonell Parada H, 2015) (Fernandez Contreras M, 2012). Así mismo, en el proceso de desalinización de ósmosis inversa, se hace pasar el agua aplicando una presión mayor a la osmótica, mediante una membrana semipermeable logrando hacer pasar el agua pura o filtrando los iones de la sal (Bonell Parada H, 2015) (Fernandez Contreras M, 2012).

Es por esto que se han ido desarrollando a lo largo del tiempo tecnologías alternativas para dar solución a la escasez de agua y sus altos costos de desalinización. Por consiguiente, se plantea el uso de las Celdas de Desalinización Microbiana (CDM), las cuales cumplen con 3 funciones principales, tratar las aguas residuales, generar electricidad y desalinizar el agua (Cao et al., 2009). Dicha tecnología es usada alrededor del mundo debido a la eficiencia de remoción de sal y la disminución de los costos.

En Colombia las Celdas de Desalinización Microbiana aún no han sido implementadas, esto debido a los pocos estudios que se han realizado en el país, la dificultad para transportar la tecnología y el mantenimiento de la misma. Es por ello que como aporte al país desde la ingeniería ambiental, en este proyecto solo elaborará un diseño digital 3D de una CDM que se adapte a las necesidades de las comunidades rurales de Riohacha, y la viabilidad que esta tendría en esta zona del país.

A lo largo de este documento se despliegan 19 capítulos que abarcan desde el resumen hasta los anexos. Incluye una introducción detallada con el planteamiento del problema y la pregunta de investigación,

delineando los objetivos, tanto general como específicos, además de extensos marcos referenciales: estado del arte, conceptual, teórico, geográfico, normativo e institucional. La metodología general del proyecto se detalla minuciosamente, desde su enfoque hasta las técnicas e instrumentos utilizados, presentando un paso a paso metodológico para alcanzar cada objetivo. En este contexto, se presenta un plan de trabajo y los resultados obtenidos, destacando el diseño tridimensional digital de la CDM, disponible en el capítulo 15, con planos 2D y 3D acompañados de medidas y descripciones pertinentes, culminando con una breve simulación del rendimiento de esta. Posteriormente, se aborda el análisis y discusión de los resultados obtenidos por cada objetivo específico, concluyendo con las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos que complementan este trabajo.

7. Planteamiento el problema

Según el Instituto de Recursos Mundiales (World Resources Institute, 2021), cerca de mil millones de personas viven o están expuestas a la escasez de agua y hasta 3.500 millones de personas podrían verse afectadas por la escasez de agua para 2025. De acuerdo con lo anterior, los países que se han visto más afectados por dicha problemática son Kuwait, Bahrein, Emiratos Árabes Unidos, Egipto y Qatar; siendo estos quienes han invertido en la investigación y el desarrollo de tecnologías de desalinización y ahora confían y satisfacen sus necesidades a partir de estas (World Resources Institute, 2021).

Una de las principales causas de la escasez del recurso hídrico es su contaminación directa. Es por ello que las matrices suelo y aire entran en esta ecuación, ya que algunos países abusan de estas dos esferas del ambiente para satisfacer sus necesidades, sobreexplotando el uso de estos, generando así un consumo alto innecesario. Las inequidades sociales tienen un impacto directo en la salud pública, especialmente en contextos donde el acceso limitado a servicios básicos como el saneamiento provoca la contaminación del agua, esta contaminación conduce a diversas enfermedades debido al consumo de agua no potable, creando un ciclo perjudicial. Estos problemas ambientales no solo afectan la salud física, sino que también generan tensiones sociales, aumentando los conflictos dentro de las comunidades afectadas. La falta de acceso a agua potable y saneamiento básico perpetúa la desigualdad, creando barreras para la educación y el empleo, por lo tanto, abordar estas inequidades requiere políticas inclusivas y acciones colaborativas para garantizar el acceso equitativo a servicios esenciales.

Colombia, específicamente en La Guajira; Riohacha, cuenta con una población promedio de 53.002 habitantes, conformada por afrocolombianos y comunidades indígenas, entre estas se encuentran las etnias Wayuu, Wiwa, Kogui, Arhuaco, Zenú y Kamkuamo (Sistema Estadístico Nacional, 2020). Esta zona del país presenta diferentes problemáticas sociales como la falta de niveles de educación adecuados para la toma de decisiones informadas, lo que desencadena problemas de saneamiento básico y salud ambiental dificultando la comunicación y la cooperación de las comunidades étnicas para el abastecimiento de agua, afectando de esta manera el ambiente, la sociedad y la economía del territorio. Otra causa del desabastecimiento de agua en la zona de estudio es el vertimiento, mal manejo de residuos y el acaparamiento de los recursos hídricos por las industrias y el turismo (Hudgson Reeves, R., 2021). Esta problemática particular genera escasez; una cuestión que en Riohacha es recurrente, y causante de enfermedades infecciosas, disminución de actividades agrícolas y ganaderas, incremento de la desnutrición, reducción del turismo, falta de mano de obra, aumento de la pobreza, desescolarización, desaparición de ecosistemas estratégicos, y demás (Castillo, 2017).

A pesar de la existencia de soluciones actuales para abordar la escasez de agua en La Guajira, persisten desafíos significativos relacionados con los sistemas de almacenamiento, estos sistemas, cruciales para garantizar la distribución y disponibilidad continua del recurso hídrico, a menudo presentan deficiencias que limitan su eficacia a largo plazo. Ejemplos concretos de estas soluciones, como la planta desalinizadora de sal en Manaure y la entrega de agua potable mediante carrotanques a comunidades rurales, resaltan la necesidad de abordar las limitaciones en la capacidad de almacenamiento y distribución para garantizar un acceso sostenible y efectivo al agua en la región.

La planta desalinizadora de sal en Manaure, La Guajira, representa una solución existente para abordar la escasez de agua potable en la región, mediante procesos de desalinización, la planta extrae la sal del agua de mar, produciendo agua apta para el consumo humano. Esta iniciativa es una respuesta concreta a la necesidad urgente de acceso a agua potable en zonas afectadas por la salinidad del agua en La Guajira, ofreciendo una fuente de suministro sostenible y directa. Sin embargo, es crucial analizar la eficiencia de la planta y su capacidad para abastecer a toda la población, considerando la creciente demanda y los posibles impactos ambientales asociados con la desalinización a gran escala siendo una de las mayores problemáticas el transporte de esta planta a la comunidad ya que no cuentan con sistemas de acueducto. Imitola González, A. A., Ramírez Gutiérrez, J. A., & López Ortega, A. D. (2019).

Por otro lado, el suministro de agua potable a comunidades rurales de La Guajira a través de carrotanques es otra estrategia implementada para mitigar la escasez de agua. Este enfoque, aunque proporciona acceso inmediato al recurso, presenta desafíos significativos a largo plazo. Las comunidades dependen de entregas regulares, y el transporte de agua a largas distancias implica costos significativos y emisiones de carbono. Además, la calidad del agua puede no cumplir con estándares óptimos, lo que plantea preocupaciones sobre la salud de la población. Ortiz, J., Miranda, J., Ortiz, L., Navarro, Y., & Mattar, S. (2015).

Ambas soluciones actuales enfrentan deficiencias en términos de capacidad, sostenibilidad y afrontan desafíos logísticos. La implementación futura de la celda de desalinización microbiana podría ofrecer una alternativa prometedora al abordar estos problemas. Este diseño tiene el potencial de proporcionar agua potable de manera eficiente, sostenible y localizada, minimizando la dependencia de soluciones externas y reduciendo el impacto ambiental asociado con la desalinización convencional.

Es por ello por lo que se crea la necesidad de implementar una tecnología que ayude a satisfacer la demanda de agua segura mediante la desalinización de fuentes de agua salobre. Las Celdas de Desalinización Microbiana (CDM), se presentan como una alternativa eficaz para el departamento de la guajira, toda vez que la evidencia muestra que logra eliminar entre un 80% a un 90% de sal dependiendo de la tecnología que se implemente y se obtuvo energía con una potencia máxima de 31 W/m³; este desenlace se dio al hacer uso de diferentes concentraciones de sal (Cao et al., 2009; Wang & Wang, 2019).

Además, las CDM son una tecnología comúnmente usada en países de Asia, sin embargo, en Colombia, aunque hay alrededor de 1000 estudios, es una técnica de sostenibilidad bastante nueva, por lo que el proyecto presentado en el presente documento cobra importancia para el país ya que ofrece una solución que puede ser definitiva para la escasez de agua que afecta a los habitantes de La Guajira.

Sin embargo, es importante tener presente que la implementación de celdas de desalinización microbiana (CDM) en regiones como La Guajira presenta desafíos específicos que deben abordarse cuidadosamente. Uno de los principales factores limitantes podría ser la accesibilidad a recursos y la infraestructura de transporte. Dada la geografía única y a veces remota de La Guajira, el transporte de materiales y equipos necesarios para la instalación y mantenimiento de tecnologías como las CDM podría ser logísticamente complicado, aumentando los costos y dificultando su aplicación.

Los factores económicos también son cruciales, ya que la inversión inicial y los costos de mantenimiento de las CDM podrían ser complicados para comunidades con recursos limitados. Además, es esencial considerar la población indígena local y sus necesidades, la participación y consulta activa con las comunidades indígenas es fundamentales para garantizar que la implementación de tecnologías no cause impactos negativos en términos de recursos naturales, tradiciones culturales y sostenibilidad a largo plazo.

8. Pregunta de investigación

¿Cuál sería el diseño óptimo de la Celda de Desalinización Microbiana (CDM) que maximice la viabilidad técnica, económica y ambiental como solución de abastecimiento de agua potable en una comunidad rural del municipio de Riohacha?

9. Justificación

El agua potable es un recurso esencial para la salud y el desarrollo de actividades como la industria y la agricultura, las cuales son primordiales para que los humanos puedan gozar de una vida sana. Sin embargo, alrededor del 40 % de la población mundial sufre la escasez de dicho recurso (Milne, 2021); además es probable que esta preocupante cifra ascienda a medida que aumentan las temperaturas globales a causa del cambio climático (Milne, 2021).

Como se ha mencionado a lo largo de este documento, es necesario encontrar una tecnología que permita disminuir la sal en el agua y al mismo tiempo sea eficiente económica, social y ambientalmente. Es por ello que se espera proponer un diseño de CDM viable en una comunidad rural de Riohacha, esto con el fin de ofrecerle a los habitantes de esta zona del país la posibilidad de implementar una tecnología innovadora que les permita acceder a agua segura de una manera sostenible económica, social y ambientalmente. Es importante hacer uso de una tecnología alternativa, como las CDM, ya que estas ofrecen desalinización de agua salobre; lo que ayuda a aumentar la oferta de agua segura a una población que muere de diversas enfermedades como diarrea, cólera, hepatitis A, enfermedades parasitarias, enfermedades transmitidas por vectores, y de desnutrición al no contar con recursos hídricos que les permitan llevar a cabo sus actividades básicas para subsistir en su territorio. (Macías Gállego, C., 2016).

Este proyecto de grado surge como una respuesta a las demandas locales y una contribución a la creciente literatura científica y tecnológica que busca optimizar una aproximación innovadora. Con un enfoque en la adaptación de técnicas de ingeniería avanzadas, se explorará cómo esta tecnología puede abordar eficazmente la escasez de agua en una región con condiciones geográficas y ambientales únicas. Además, se considerará la colaboración con entidades gubernamentales, instituciones educativas, actores económicos y organizaciones ambientales y sociales como parte integral del marco institucional necesario para el éxito y la sostenibilidad de este proyecto.

Por otra parte el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 6, "Agua limpia y saneamiento", establece la meta de garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Este ODS establece una conexión directa entre la necesidad de proporcionar agua potable a comunidades rurales, como las de Riohacha; permite visualizar detalladamente la disposición de componentes, evaluar la eficiencia del proceso y anticipar posibles desafíos técnicos y logísticos.

Además, el proyecto contribuye al ODS 3 ("Salud y bienestar") al mejorar las condiciones de salud de la comunidad mediante el suministro de agua potable, esencial para prevenir enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada. El ODS 1 ("Fin de la pobreza") también se ve beneficiado, ya que la disponibilidad de agua potable es esencial para mejorar las condiciones de vida y reducir la vulnerabilidad de las comunidades empobrecidas. Asimismo, el ODS 11 ("Ciudades y comunidades sostenibles") se fortalece al introducir una tecnología sostenible que puede tener un impacto positivo en la infraestructura y la calidad de vida de la comunidad. En conjunto, el proyecto de la CDM en Riohacha se convierte en una iniciativa integral que aborda múltiples ODS, destacando la interconexión y la contribución significativa a metas más amplias de desarrollo sostenible en la región. (Gómez Duque, Á. M., 2021).

En respuesta a la crítica escasez de agua que enfrentan las áreas rurales de Riohacha, La Guajira, presentamos esta tecnología ya que no solo aborda las necesidades críticas de acceso a agua potable, sino que también conlleva beneficios económicos y ambientales significativos. Desde una perspectiva económica, la celda de desalinización microbiana ofrece una reducción sustancial de costos operativos al minimizar la dependencia de entes externos, además, su instalación y mantenimiento genera educación comunitaria de manera sostenible, por otra parte la celda se caracteriza por su bajo costo, lo que posibilita su implementación a futuro sin complicaciones por parte de las comunidades rurales de Riohacha, esto garantiza que, ya sea mediante recursos propios o a través de apoyo externo, la sostenibilidad del proyecto sea alcanzable de manera efectiva.

Desde el punto de vista ambiental, esta tecnología presenta una huella de carbono inferior en comparación con métodos convencionales de desalinización, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. Asimismo, al aprovechar microorganismos para remover la sal, se promueve el uso sostenible de los recursos, evitando la sobreexplotación de fuentes no renovables. En cuanto a su aplicabilidad, la celda de desalinización microbiana se adapta eficazmente a las condiciones específicas de La Guajira y se destaca por su escalabilidad, lo que permite una expansión gradual según las demandas cambiantes de la comunidad, esta propuesta no solo aborda la crisis hídrica, sino que también se establece como una solución integral que fomenta el desarrollo económico y la preservación ambiental en las áreas rurales de Riohacha.

La realización de este proyecto, , se proyecta como una solución integral para abordar la escasez de agua en la región, a través de una evaluación de las necesidades de consumo de agua por persona encontrada en las entrevistas realizadas en el objetivo 2 y la capacidad de producción de la celda que se estima de la misma manera. Así, la ejecución de este proyecto se presenta como una solución integral para afrontar la escasez de agua en la región. Esto se logrará mediante la evaluación de las necesidades individuales de consumo de agua, obtenidas a partir de entrevistas realizadas en el objetivo 2, y la estimación de la capacidad de producción de la celda de manera análoga. De esta forma, se asegurará que la tecnología sea capaz de satisfacer de manera efectiva las demandas diarias de esta población, garantizando un acceso sostenible al agua potable. Este enfoque, además de asegurar

viabilidad económica, considerará los factores específicos de La Guajira. Estos esfuerzos garantizarán que el proyecto no solo mejore las condiciones de vida de estas comunidades rurales, sino que perdure de manera sostenible a largo plazo, ofreciendo un beneficio significativo.

Finalmente, es importante realizar esta investigación ya que la ingeniería ambiental desea dar solución a problemas de la sociedad por medio de tecnologías que no generan poco impacto negativo en el planeta, y este es el caso de las Celdas de Desalinización Microbiana (CDM).

10. Objetivos general y específicos

10.1. Objetivo general

Elaborar un modelo tridimensional digital de Celda de Desalinización Microbiana estimando su rendimiento en la generación de agua potable a partir de agua de salobre, con implicaciones directas en la búsqueda de opciones sustentables para comunidades vulnerables.

10.2. Objetivos específicos

Comparar la eficiencia de diferentes técnicas de desalinización en CDM, con el propósito de determinar la alternativa que logré el mayor grado de desalinización y producción de agua potable.

Evaluar los criterios económicos, sociales y ambientales de la tecnología de CDM valorada a fin de conocer su viabilidad en las comunidades rurales del municipio de Riohacha.

Diseñar en un modelo 3D de una Celda de Desalinización Microbiana digital evaluando la viabilidad de aplicación en comunidades rurales del municipio de Riohacha.

11. Marcos de referencia

11.1. Estado del arte

En este apartado se presentarán las investigaciones nacionales e internacionales más relevantes acerca de las Celdas de Desalinización Microbiana (CDM) como mecanismo de desalinización de agua salobre, y la efectividad de esta tecnología en las zonas donde es usada.

11.1.1. Investigaciones académicas Universidad El Bosque

Al realizar la búsqueda en el repositorio de la universidad usando palabras clave como desalinización y Celda de Desalinización Microbiana, fueron arrojados dos resultados, en los cuales se hace énfasis en las diversas técnicas de desalinización que pueden ser usadas en el departamento de La Guajira.

Determinación de la viabilidad de un modelo de desalinización de agua de mar acoplado a una Celda Microbiana de Desalinización para comunidades vulnerables en Riohacha, Guajira por Daniel Fernando Daza González y Laura Alejandra Rodríguez Mancipe - 2021

El proyecto de grado presentado en el presente documento, nace del realizado por los ingenieros ambientales mencionados anteriormente. En dicho documento se lleva a cabo un metaanálisis con el fin de establecer cuál es la técnica de desalinización más apropiada para acoplar a una CDM e implementar dicha tecnología en comunidades vulnerables de La Guajira (Daza González & Rodríguez Mancipe, 2021).

Uno de los resultados relevantes que se obtuvo de esta investigación es que las técnicas de desalinización con mejor eficiencia y capacidad de tratamiento son la ósmosis inversa y la destilación flash multietapa (Daza González & Rodríguez Mancipe, 2021), cada una con 97,577% y 93,756% de eficiencia de sólidos totales disueltos (SDT) (Daza González & Rodríguez Mancipe, 2021).

Evaluación de métodos de obtención de agua para su uso en agricultura alternativa en el corregimiento de Camarones, La Guajira por Alejandro Guzmán Pérez - 2019

A pesar de que la investigación no contiene información sobre las CDM, es de importancia para el presente proyecto debido a que en este es posible encontrar información de la desalinización en La Guajira. Este proyecto ejecutado por el ingeniero ambiental Alejandro Guzmán evalúa las diversas técnicas de desalinización que puedan ser aplicadas para la obtención de agua dulce con el fin de ser implementada en la agricultura del municipio de Camarones, La Guajira (Guzmán Pérez, 2019). De dicha investigación, se tuvo como resultado importante que la destilación solar es el método con mejor aplicabilidad en la zona costera por su facilidad de uso y sus bajos costos de construcción (Guzmán Pérez, 2019); Guzmán Pérez tuvo en cuenta para esta sugerencia el espacio necesario para la técnica, costo-beneficio y condiciones climáticas del municipio de Camarones (Guzmán Pérez, 2019).

11.1.2. Investigaciones nacionales

La información obtenida de estudios nacionales acerca de las CDM es muy escasa, ya que la única investigación encontrada en diferentes bases de datos académicas fue la realizada por los ingenieros ambientales Daniel Fernando Daza González y Laura Alejandra Rodríguez Mancipe en el 2021 como proyecto de grado en la Universidad El Bosque. Sin embargo, es posible acceder a información de interés para la ejecución de este proyecto. A continuación, se expone el documento con mayor relevancia en las técnicas de desalinización usadas en el territorio colombiano con el fin de disminuir la salobridad del agua de mar para la ejecución de diversas actividades humanas.

Análisis comparativo entre acuíferos costeros y plantas desalinizadoras como fuente de suministro para poblaciones con escasez de fuentes hídricas superficiales por Constanza Viviana Alarcón Herazo, Lehide Johana Amaya Gomez y Oscar Javier Díaz Monroy - 2015

Existen múltiples técnicas y tecnologías para la desalinización de agua salobre, en las cuales se destacan los métodos que hacen uso de membranas (Alarcón Herazo et al., 2015), este es el mecanismo de funcionamiento de las CDM. En este tipo de desalinización es muy común la ósmosis inversa y la electrodiálisis (Alarcón Herazo et al., 2015), dichos sistemas reducen las concentraciones de SDT en el agua por medio de la separación selectiva de iones de sal (electrodiálisis) (Alarcón Herazo et al., 2015), o con ayuda de la presión disminuir los porcentajes de sales en el agua de mar (Alarcón Herazo et al., 2015). Es de gran importancia tener en cuenta los requerimientos y limitaciones de dichas técnicas de remoción de sal, ya que de esta forma es posible implementarlas en zonas adecuadas

económica, social y ambientalmente. Un ejemplo de ello son las plantas desalinizadoras de Cabo de la Vela y Manaure (Alarcón Herazo et al., 2015), las cuales mediante la ósmosis inversa son capaces de producir 0,83 l/s a 13,89 l/s de agua potable respectivamente para el consumo humano (Alarcón Herazo et al., 2015).

11.1.3 Investigaciones internacionales

En el mundo, se destacan alrededor de 20 publicaciones científicas acerca de la desalinización de agua de mar haciendo uso de las Celdas de Desalinización Microbiana. En este apartado se mostrarán los artículos más relevantes para la elaboración de este proyecto.

Celda de Desalinización Microbiana con biocátodo fotosintético: generación de energía, desalinización y reducción de DQO por Laura Katherin Chaparro Diaz - 2020

Además de desalinizar el agua, las CDM generan energía y simultáneamente contribuyen a la disminución de DQO cuando este es alto en las fuentes hídricas (Chaparro Diaz, 2020). En este estudio se construyó un sistema de Celda de Desalinización Microbiana con unas características específicas para su funcionamiento, dicha tecnología fue puesta en práctica de forma in-situ (Chaparro Diaz, 2020). Entre los resultados más significativos de estas pruebas, se obtuvo que la salinidad del agua fue reducida en un 77,3%, la DQO se disminuyó en un 32,89 % y la generación de energía fue de 0,11 kWh/m³ (Chaparro Diaz, 2020). Con estos datos se permite evidenciar científicamente que las CDM son una tecnología de desalinización autosuficiente energéticamente, lo que genera menor inversión económica para su mantenimiento (Chaparro Diaz, 2020).

Es por esto que se espera que las Celdas de Desalinización Microbiana puedan ser usadas en plantas desalinizadoras a nivel macro, donde estas tengan como función principal el pretratamiento del agua con el fin de suministrar energía para la desalinización y disminuir los costos de esta (Chaparro Diaz, 2020).

Advancements in spontaneous microbial desalination technology for sustainable water purification and simultaneous power generation: A review for Monika Patel, Shiv Singh Patel, Pradip Kumar, Dehi Pada Mondal, Bhupendra Singh, Mohd Akram Khan y Shiv Singh - 2021

Debido a la gran cantidad de técnicas de desalinización que existen es posible adaptar muchas de ellas a las CDM, esto por medio de diferentes diseños que les permitan la mejor eficacia y productividad (Patel et al., 2021). Esta tecnología innovadora es nueva en el mundo, es por ello que los expertos hacen ajustes constantes a los componentes de esta con el fin de mejorar su viabilidad.

De los resultados más importantes que se encuentran en este documento son los porcentajes de eficiencia que tienen estas celdas con diferentes técnicas, componentes y capacidades para el tratamiento de agua. La ósmosis directa y el uso de microorganismos fotovoltaicos tuvieron los mejores resultados en dicho componente, donde se alcanzaron el 94% y el 97% respectivamente (Patel et al., 2021), lo que quiere decir que las CDM son una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales y la desalinización de agua de mar (Patel et al., 2021).

A New Method for Water Desalination Using Microbial Desalination Cells por Xiaoxin Cao, Xia Huang, Peng Liang, Kang Xiao, Yingjun Zhou, Xiaoyuan Zhang y Bruce E. Logan - 2009

Este documento, el cual es clave para la realización de este proyecto, expone los altos costos de la desalinización y el porqué es importante llevar a cabo este proceso por medio de nuevas tecnologías (Cao et al., 2009; Wang & Wang, 2019). En el caso específico de este estudio se puso a prueba un sistema de CDM, el cual consistía en tres cámaras, donde la intermedia era la encargada de ejecutar el proceso de desalinización del agua (Cao et al., 2009; Wang & Wang, 2019). Al hacer uso de esto, se pudo observar que esta tecnología no solo se encarga de disminuir la sal del agua, sino que también genera energía a partir de una fuente renovable y es capaz de dar tratamiento a las aguas residuales (Cao et al., 2009; Wang & Wang, 2019).

A partir de este sistema de desalinización innovador se logró eliminar en un 90% la sal y se obtuvo energía con una potencia máxima de 31 W/m³ (Cao et al., 2009; Wang & Wang, 2019); este desenlace se dio al hacer uso de diferentes concentraciones de sal (Cao et al., 2009; Wang & Wang, 2019).

11.2. Marco teórico

La desalinización, el proceso básico para extraer agua dulce de fuentes saladas, está desempeñando un papel cada vez más importante en la búsqueda global de soluciones a la creciente escasez de agua dulce. A nivel mundial, la demanda de agua potable y la escasez de agua siguen aumentando debido al crecimiento demográfico y al cambio climático (Shahzad et al., 2019; Ghaffour et al., 2021). Este proceso es una estrategia clave para garantizar la disponibilidad sostenible de agua el cual no se limita únicamente a la remoción de agua de pozo, también se extiende a fuentes de agua salina como acuíferos salinos y aguas subterráneas contaminadas, aumentando aún más su importancia. (Ghaffour et al., 2021; Warsinger et al., 2020).

A nivel mundial, la desalinización se ha convertido en una industria en rápido crecimiento, respaldada por avances tecnológicos que han mejorado la eficiencia de los procesos y reducido los costos de producción de agua dulce (Kim et al., 2021; Warsinger et al., 2020). Países con recursos hídricos limitados, como Israel y los Emiratos Árabes Unidos, han adoptado con éxito la desalinización como parte integral de su cartera de suministro de agua (Shahzad et al., 2019). Además, la desalinización se ha extendido a regiones propensas a sequías y estrés hídrico, como California, donde las plantas desalinizadoras están contribuyendo significativamente a la mitigación de la escasez de agua (Cooley et al., 2019).

Sin embargo, a pesar de los beneficios, la desalinización presenta desafíos y consideraciones críticas en todo el mundo, estos incluyen altos requisitos energéticos, la generación de subproductos salinos, impactos ambientales en los ecosistemas costeros y marinos, y preocupaciones sobre la sostenibilidad a largo plazo de los recursos hídricos. (Sharma et al., 2021; García-Rodríguez et al., 2011; Linares-Rodríguez et al., 2019). En este contexto, el diseño tridimensional de desalinización microbiana emerge como una idea innovadora que combina principios de ingeniería en donde se abordan algunos desafíos de manera integrada (Xu et al., 2021; Rahimi et al., 2020; Guo et al., 2018).

En las zonas rurales del municipio de Riohacha, La Guajira, la falta de agua dulce es un problema crítico por lo tanto la implementación de un sistema de desalinización microbiana se presenta como

una oportunidad estratégica vital. Esta iniciativa no solo aborda la escasez de agua potable en comunidades que no tienen acceso a agua segura y/o potable, sino que también ejemplifica el poder de las ciencias de la implementación, estas ciencias actúan como el puente entre la investigación científica y soluciones prácticas en el terreno, permitiendo que avances teóricos se traduzcan en tecnologías aplicables. Este enfoque interdisciplinario no solo involucra aspectos técnicos y científicos, sino también consideraciones económicas, sociales y culturales, como la participación comunitaria y la gestión adecuada de los recursos naturales.

En Riohacha, la aplicación de Celdas de Desalinización Microbiana no sólo disminuye la crisis hídrica, sino que también ilustra cómo la ciencia y la comunidad pueden colaborar para transformar desafíos en oportunidades, demostrando así el impacto tangible de las ciencias de la implementación en la vida cotidiana de las personas.

La ingeniería ambiental se centra en la aplicación de principios científicos y técnicos para resolver problemas ambientales y promover la sostenibilidad (Equipo editorial de Indeed, 2023). En este contexto, la implementación de las ciencias de la implementación requiere ideas efectivas para soluciones innovadoras como la desalinización microbiana, es esencial abordar uno de los desafíos más significativos en las últimas décadas como la escasez de agua potable en comunidades vulnerables, que a menudo enfrentan condiciones adversas y carecen de acceso a recursos hídricos seguros.

Las ciencias de la implementación desempeñan un papel crucial al actuar como el puente entre la investigación científica y la aplicación práctica en el terreno, permiten que los avances teóricos y los desarrollos tecnológicos se traduzcan en soluciones concretas que puedan ser implementadas en comunidades que las necesitan desesperadamente, esto implica un enfoque interdisciplinario que abarca no sólo los aspectos técnicos y científicos, sino también los económicos, sociales y culturales que influyen en la viabilidad y efectividad de la tecnología (Fejes, M, E, Santos, A., Calil, M. R., Franzolin, F., Morita, E. M., & Tolentino-Neto, L. C., 2004).

Una de las razones por las que las ciencias de la implementación son esenciales en este contexto es su capacidad para identificar y superar barreras, la implementación exitosa de una tecnología como la desalinización microbiana no es solo cuestión de desarrollar el mejor modelo o sistema, sino de considerar las condiciones específicas de cada una de las comunidades afectadas, esto implica adaptar la tecnología a las limitaciones económicas, ambientales y de infraestructura locales, en Riohacha la Guajira, así como comprender las necesidades y preferencias de la población afectada mediante un enfoque interdisciplinario.

Además, las ciencias de la implementación ayudan a garantizar que los proyectos sean sostenibles a largo plazo, sin embargo no es suficiente implementar una solución tecnológica; es fundamental asegurar que sea mantenida, monitoreada y que continúe siendo efectiva con el tiempo, esto implica la capacitación de la comunidad local en la operación y el mantenimiento de la tecnología, así como la consideración de factores ambientales y sociales en curso que podrían afectar su funcionamiento (Contreras, P., Montecinos, E. 2019).

Las ciencias de la implementación son esenciales para llevar a cabo proyectos como la construcción de modelos tridimensionales de desalinización microbiana y su aplicación en comunidades vulnerables. Al abordar de manera integral los desafíos técnicos, económicos, sociales y culturales, estas disciplinas garantizan que la tecnología se traduzca en soluciones efectivas y sostenibles que

mejoren la calidad de vida de las poblaciones vulnerables y contribuyan a la conservación de los recursos hídricos y la protección del medio ambiente. Este enfoque holístico es fundamental para abordar de manera efectiva los problemas ambientales más apremiantes de nuestro tiempo (Contreras, P., & Montecinos, E., 2019).

Es por esto que desempeñan un papel fundamental en el proyecto ya que actúa como un puente entre la teoría y la práctica, facilitando la interpretación efectiva de conocimientos y soluciones a la realidad, estas disciplinas se encargan de planificar, gestionar y evaluar la ejecución de proyectos, asegurando que los resultados de la investigación se apliquen de manera efectiva en contextos reales. Además, identifican obstáculos, adaptan las estrategias a las circunstancias específicas y garantizan la sostenibilidad a largo plazo, lo que resulta esencial para lograr impactos positivos y duraderos en comunidades, organizaciones o sistemas, alineando así los objetivos teóricos con los resultados concretos.

Por otra parte, la implementación efectiva de tecnologías revolucionarias, como las CDM, se basa en un enfoque multidisciplinario que incorpora tanto métodos cualitativos como cuantitativos. Las ciencias de la implementación son una rama de estudio que se enfoca en cómo las intervenciones científicas y tecnológicas se adoptan, adaptan y se integran en contextos reales, convirtiéndose en un campo fundamental para transformar innovaciones científicas en soluciones prácticas.

En el contexto específico de las Celdas de Desalinización Microbiana, un enfoque de ciencias de la implementación implica una profunda comprensión de las necesidades de las comunidades, así como de las limitaciones tecnológicas y sociales que podrían surgir durante la implementación. Las entrevistas, como método cualitativo, desempeñan un papel esencial en este proceso, ya que permiten recopilar las experiencias de las personas en las comunidades afectadas. Estas entrevistas proporcionan una visión holística de los desafíos que enfrentan estas comunidades en términos de acceso al agua potable y, al mismo tiempo, ayudan a identificar sus expectativas y preocupaciones en relación con las soluciones propuestas, como las celdas de desalinización microbiana.

Además de las entrevistas cualitativas, un análisis cuantitativo se vuelve de suma importancia para fundamentar y validar las observaciones cualitativas, los datos numéricos proporcionan una estructura sólida para evaluar la viabilidad y la eficacia de las tecnologías propuestas, un análisis cuantitativo puede ayudar a evaluar la eficiencia del proceso de desalinización, la tasa de producción de agua potable y la relación costo-beneficio.

Al recopilar datos sobre la calidad del agua antes y después del tratamiento, así como el rendimiento de las celdas en condiciones controladas, pueden validar empíricamente la efectividad de la tecnología, además, los análisis cuantitativos pueden extenderse a estudios de mercado para evaluar la demanda potencial de estas soluciones en las comunidades afectadas, esta información cuantitativa es esencial para respaldar las decisiones durante la fase de diseño y para garantizar que las celdas de desalinización microbiana se adapten de manera óptima a las necesidades y capacidades de las comunidades en las que se implementarán.

En última instancia, la combinación estratégica de entrevistas cualitativas y análisis cuantitativos en el proceso de implementación no solo enriquece la comprensión de los desafíos y oportunidades, sino que también guía el diseño y la optimización de las celdas de desalinización microbiana para garantizar un impacto positivo y sostenible en las comunidades rurales.

11.3. Marco conceptual

El diseño de una Celda tridimensional de Desalinización Microbiana en el Departamento de La Guajira, específicamente en Riohacha, representa un desafío significativo que busca abordar la crítica escasez de agua potable en regiones áridas y semiáridas.

En primer lugar, se destaca la importancia de seleccionar microorganismos autóctonos adaptados a las condiciones extremas presentes en La Guajira. La investigación previa ha demostrado que ciertas cepas microbianas poseen la capacidad de sobrevivir y prosperar en entornos salinos, lo que las convierte en candidatas ideales para desempeñar un papel clave en el proceso de desalinización. Es por esto que se usan diferentes técnicas de desalinización.

Por ejemplo, la **ósmosis inversa microbiana (MRO)** es una técnica que aprovecha la actividad metabólica de estos microorganismos para eliminar la salinidad del agua se instituye como una opción prometedora (Ramírez-Moreno, M., Ródenas, P., Aliaguilla, M., Bosch-Jiménez, P., Borrás, E., Zamora, P., & Esteve-Núñez, A.,2021).

En segundo lugar, la celda tridimensional diseñada para la desalinización debe ser objeto de una cuidadosa planificación y optimización. Esto involucra consideraciones técnicas detalladas, como la disposición precisa de las membranas y la configuración específica de la celda. Estos factores son fundamentales para maximizar la interacción entre los microorganismos y las membranas, lo que a su vez facilita la eliminación efectiva de los iones de sal presentes en el agua. Para lograr un rendimiento óptimo, es necesario tener en cuenta las características particulares del agua salobre local.

La sostenibilidad es otro pilar fundamental en el diseño y operación de la celda tridimensional de desalinización microbiana. En un esfuerzo por reducir la huella de carbono asociada con el proceso, se promueve la eficiencia energética. En esta línea, se propone el uso de fuentes de energía renovable, en particular la energía solar, como una fuente de alimentación para impulsar el proceso de desalinización. Esta elección no solo contribuiría a la reducción de los costos operativos, sino que también tendría un impacto ambiental positivo al disminuir la dependencia de fuentes de energía no renovable y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Sharma, A., et al., 2021). Además de los aspectos técnicos y ambientales, el marco conceptual considera aspectos sociales y comunitarios.

La participación activa de la comunidad local en el proceso de diseño de la celda de desalinización es esencial para su éxito a largo plazo. La aceptación y el apoyo de la comunidad son factores cruciales que pueden influir en la eficacia del proyecto y en su capacidad para resolver la crisis del agua en la región. Asimismo, es imperativo cumplir con todas las regulaciones ambientales y de salud pertinentes, asegurándose de que el proceso de desalinización cumpla con los estándares de calidad del agua y de protección de la salud pública. Además, es vital considerar la gestión adecuada de los subproductos generados durante el proceso de desalinización, como los concentrados salinos, para evitar impactos negativos en el medio ambiente circundante (Hossain, M. A., et al., 2019).

La integración efectiva de aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos en el diseño de una celda tridimensional de desalinización microbiana en Riohacha, La Guajira, es esencial para abordar los desafíos contemporáneos de manera holística y sostenible. Este enfoque reconoce que los proyectos de ingeniería no pueden considerarse de forma aislada, sino que operan en un entorno complejo y

dinámico que abarca una amplia gama de influencias, (Brown & Green, 2018). Desde una perspectiva técnica, el diseño de la celda tridimensional debe basarse en un sólido entendimiento de los principios científicos y técnicos que rigen los sistemas naturales y construidos (Anderson, 2021). Esto implica la aplicación de tecnologías innovadoras de tratamiento de aguas con concentraciones elevadas de sal que aborden problemas ambientales específicos, como la desalinización del agua salobre para abordar la escasez de agua potable en la región (Chen et al., 2020).

Estas soluciones técnicas deben cumplir con estándares de calidad del agua y al mismo tiempo considerar la eficiencia energética y la minimización de subproductos nocivos (Johnson, 2019). Sin embargo, la ingeniería no puede operar de manera aislada, y es aquí donde se entrelazan los aspectos ambientales. La consideración de los impactos ambientales del proyecto es fundamental para mitigar los efectos adversos y promover prácticas sostenibles (Smith & Brown, 2017). Esto implica realizar evaluaciones de impacto ambiental, identificar áreas críticas de conservación y minimizar la degradación del ecosistema local, como la preservación de la biodiversidad marina en las cercanías de Riohacha (García et al., 2020). Además, se deben adoptar enfoques de diseño que busquen la simbiosis entre la infraestructura humana y el entorno natural, como la construcción de sistemas de desalinización que minimicen el impacto en los ecosistemas costeros (Martínez & López, 2018).

Los aspectos sociales son igualmente cruciales en el diseño de la celda tridimensional. La percepción y aceptación del proyecto por parte de la sociedad pueden influir en su éxito y sostenibilidad a largo plazo (Rodríguez & Pérez, 2021). La consulta pública, la comunicación efectiva y la creación de vínculos con las partes interesadas son elementos clave para la gestión del proyecto y la construcción de un consenso en la comunidad local (González et al., 2019). Además, es vital garantizar que el proyecto beneficie a la comunidad, creando empleos locales, mejorando la calidad de vida y respetando las tradiciones culturales (Díaz et al., 2020).

Por último, pero no menos importante, se encuentra la dimensión económica del proyecto. Debe ser financieramente viable y rentable a largo plazo para asegurar su viabilidad y continuidad (López & Pérez, 2019). Esto implica la consideración de los costos de inversión y operación, así como la evaluación de los beneficios económicos derivados del proyecto, como el ahorro de recursos hídricos y la generación de ingresos a través de prácticas sostenibles (Gutiérrez & Ramírez, 2021).

La convergencia de estos aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos es esencial para el diseño exitoso de una celda tridimensional de desalinización microbiana en Riohacha, La Guajira. Esta integración no solo permite la identificación y resolución efectiva de problemas complejos, sino que también promueve la creación de valor compartido para la sociedad, el ambiente y la economía en una región que enfrenta desafíos significativos en relación con el acceso al agua potable y la conservación de sus recursos naturales (Pérez & Martínez, 2020). En un mundo en constante cambio y con recursos limitados, los proyectos de ingeniería ambiental abrazan esta integración holística, están mejor posicionados para prosperar y dejar un legado positivo para las generaciones futuras (Sánchez & Rodríguez, 2018).

La desalinización, el proceso de eliminar la sal y otros contaminantes del agua para hacerla apta para el consumo humano y otros usos, desempeña un papel vital en la resolución de los desafíos globales relacionados con la escasez de agua dulce ya que son limitadas y la demanda de agua potable está en constante aumento, las técnicas de desalinización se han convertido en una herramienta esencial para garantizar el acceso a agua segura y de alta calidad este es un componente crítico que determina la

eficiencia y la efectividad de estas técnicas. A continuación, se mostrarán algunos de los conceptos más importantes y las técnicas de desalinización más relevantes, en donde argumentará la importancia de estas técnicas para el diseño de la celda en su funcionamiento óptimo.

Teniendo en cuenta que este proyecto desea realizar tratamiento de agua, se deben tener en cuenta conceptos como agua potable y agua segura. El **agua potable** se refiere a agua que es segura para el consumo humano y cumple con los estándares de calidad establecidos por las autoridades sanitarias. El agua potable debe estar libre de contaminantes y microorganismos que puedan causar enfermedades cuando se consume. Se somete a procesos de tratamiento para eliminar impurezas, bacterias y químicos dañinos, asegurando que sea segura para beber y utilizar en actividades diarias (Torres-Parra, C. A., García-Ubaque, C. A., García-Ubaque, J. C., García-Vaca, M. C., & Pacheco-García, R, 2017)

Por otro lado, el agua **segura** abarca un concepto más amplio. Además de cumplir con los criterios de potabilidad, el agua segura implica que el suministro y acceso al agua son consistentes, confiables y sostenibles a largo plazo. Implica no solo la calidad del agua, sino también la accesibilidad continua a fuentes seguras, especialmente en comunidades vulnerables donde la escasez de agua es un problema persistente. El término "agua segura" incluye no sólo la pureza fisicoquímica y bacteriológica del agua, sino también su disponibilidad constante y el acceso equitativo para toda la comunidad, lo que contribuye significativamente a la mejora de las condiciones de vida y la salud de las personas (Torres-Parra, C. A., García-Ubaque, C. A., García-Ubaque, J. C., García-Vaca, M. C., & Pacheco-García, R, 2017).

En el contexto de Riohacha y las comunidades rurales de este, contar con agua segura no solo se trata de tener agua potable, sino también de garantizar su accesibilidad y disponibilidad de manera sostenible, lo que se lograría a través de tecnologías como la desalinización microbiana.

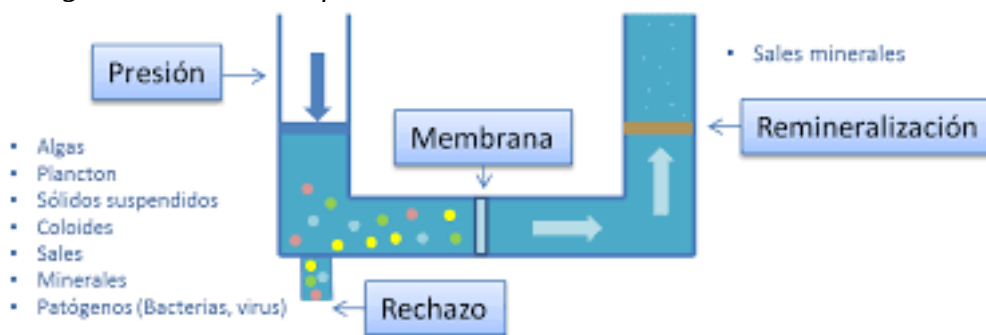
El **nivel freático** se refiere al punto subsuperficial en el cual el suelo y las rocas están completamente saturados de agua. Este nivel varía con las condiciones climáticas y geológicas de una región específica, en el contexto de Riohacha, La Guajira, una zona afectada por la aridez y la escasez de agua dulce, el nivel freático es crucial para determinar la disponibilidad de agua subterránea, en esta región, donde el agua dulce es escasa, entender la profundidad y la variabilidad del nivel freático es esencial para la planificación y gestión del suministro de agua para las comunidades locales, especialmente considerando que muchas dependen de pozos y fuentes subterráneas para satisfacer sus necesidades hídricas, la importancia de la celda de desalinización en el contexto de agua contaminada por el nivel freático es de vital relevancia para las comunidades afectadas. Dado que el nivel freático, especialmente en zonas costeras como comunidades rurales en Riohacha, puede estar contaminado con agua salobre debido a la intrusión salina, contar con una celda de desalinización eficiente se convierte en una necesidad urgente. Esta tecnología no solo ofrece la posibilidad de transformar el agua salobre en agua potable, sino que también proporciona una solución práctica y sostenible para abordar la contaminación del agua causada por el nivel freático. Al implementar una celda de desalinización, las comunidades pueden asegurar un suministro de agua limpia y segura para el consumo humano y otras necesidades diarias, mejorando significativamente la calidad de vida y reduciendo los riesgos para la salud asociados con el consumo de agua contaminada. Girón, D. (2009).

La **ósmosis inversa (OI)** es una técnica de desalinización ampliamente reconocida y utilizada que se basa en principios físicos y químicos fundamentales para eliminar las sales y otras impurezas disueltas en el agua, su aplicación se ha convertido en una solución esencial para abordar el creciente problema

de la escasez de agua potable en todo el mundo donde el acceso a fuentes de agua dulce es limitado. La ósmosis inversa es un proceso de purificación altamente efectivo que se ha consolidado como una tecnología líder para convertir agua de mar, agua salobre y otros recursos hídricos salinos en agua potable de alta calidad (Colomina Montava, J, 2016).

En el proceso de desalinización de la ósmosis inversa se encuentra una membrana semipermeable, que es una barrera física que permite el paso de moléculas de agua mientras excluye moléculas más grandes, como las sales y otras impurezas, esta membrana, a menudo hecha de materiales poliméricos avanzados, es esencial para el proceso ya que el agua de entrada en el proceso de desalinización del agua de alimentación contiene una concentración significativa de sales y otras sustancias disueltas, estas se presurizan y se fuerza a pasar a través de la membrana semipermeable (Soto Álvarez, G., & Soto Benavides, C, 2013).; como resultado de esta presión, el agua pura atraviesa la membrana, mientras que las sales y las impurezas quedan atrapadas y se eliminan, el agua purificada, conocida como permeado, se recoge en un lado de la membrana, lista para el consumo como agua potable o para aplicaciones industriales y agrícolas (Soto Álvarez, G., & Soto Benavides, C, 2013).

Figura 1. Mecanismo función de desalinización de la ósmosis inversa.



Fuente: Hossain, M. A., et al. (2019).

La celda de desalinización microbiana, con un sistema de ósmosis inversa, funciona mediante el siguiente mecanismo: En su núcleo, esta tecnología aprovecha la capacidad natural de ciertos microorganismos para desalinizar el agua, en el proceso inicial, el agua salobre es conducida a través de membranas biológicas, donde bacterias específicas trabajan activamente para metabolizar y reducir la salinidad, este proceso biológico, conocido como la desalinización, constituye la primera fase de purificación, como resultado, el agua tratada sale de esta etapa con una significativa reducción de salinidad, preparada para el siguiente paso del proceso de desalinización. Posteriormente, el agua tratada pasa a través de un sistema de ósmosis inversa, una tecnología consolidada que utiliza membranas semipermeables para eliminar los iones de sal residuales y otras impurezas, asegurando una calidad de agua óptima y potable. La integración de la ósmosis inversa garantiza que el agua producida cumpla con los estándares de calidad requeridos por la OMS, al tiempo que mejora la eficiencia global del proceso al reducir la carga salina en las membranas biológicas. Sin embargo, durante este proceso, se genera un subproducto denominado "rechazo salino", este rechazo, contiene la concentración más alta de sales y otros compuestos no deseados, se aparta del agua purificada y debe ser gestionado de manera adecuada para prevenir impactos negativos en el entorno circundante. Implementar prácticas de disposición segura del rechazo salino es esencial para garantizar la sostenibilidad ambiental del sistema de desalinización y minimizar cualquier posible impacto en los recursos hídricos y el suelo de la región. Chaparro Diaz, L. K. (2020).

Este sistema no solo maximiza la capacidad de producción de agua dulce sino que también minimiza la necesidad de productos químicos y la energía asociada, resultando en un enfoque sostenible y de bajo costo. Además, la modularidad de esta celda permite adaptarse a diversas condiciones locales, facilitando su implementación en áreas rurales

La eficiencia de la ósmosis inversa radica en la capacidad de la membrana semipermeable para discriminar entre las moléculas de agua y las partículas más grandes. Las membranas utilizadas en la ósmosis inversa tienen poros extremadamente pequeños, lo que les permite retener eficazmente las sales y otras impurezas, incluso a nivel molecular. Este proceso selectivo garantiza que el agua purificada tenga una calidad excepcionalmente alta, con niveles extremadamente bajos de contenido de sales y contaminantes. Como resultado, se considera uno de los métodos más eficientes para producir agua potable, cumpliendo con los estándares de calidad más exigentes.

Un aspecto crítico de la ósmosis inversa es la presión aplicada para forzar el agua a través de la membrana, la presión, medida en unidades de presión conocidas como pascales (Pa) o bares (bar), es esencial para superar la presión osmótica natural del agua de alimentación; en donde la presión osmótica es la fuerza que tiende a igualar las concentraciones de solutos en ambos lados de la membrana aplicando una presión mayor que la presión osmótica, se invierte el flujo natural del agua y se logra la desalinización efectiva. La cantidad de presión necesaria varía según la concentración de sales en el agua de alimentación y la eficiencia de la membrana, pero suele oscilar en el rango de 5 a 70 bar; una de las ventajas notables de la ósmosis inversa es su versatilidad ya que puede utilizarse para tratar agua salobre, que generalmente contiene una concentración de salinidad del 3.5%, así como agua salobre de fuentes subterráneas o superficiales con concentraciones de salinidad más bajas (Mendoza Montalvo, J, 2016). Esto significa que es aplicable en diversas condiciones geográficas y ambientales, lo que la convierte en una herramienta valiosa para regiones costeras y áridas donde la escasez de agua es una preocupación crítica (García, J. C, 2016).

Esta técnica se utiliza en la industria alimentaria, la industria farmacéutica, la producción de energía y muchas otras aplicaciones donde la pureza del agua es esencial. El agua que se va a desalinizar generalmente se somete a un proceso de pretratamiento para eliminar partículas suspendidas, materia orgánica y otras impurezas que podrían obstruir o dañar la membrana semipermeable, el pretratamiento puede incluir la filtración, la coagulación-floculación, la desinfección y otros procesos diseñados para acondicionar el agua de alimentación y garantizar un rendimiento óptimo, el pretratamiento adecuado no solo mejora la eficiencia de la desalinización, sino que también prolonga la vida útil de la membrana y reduce los costos de mantenimiento.

Su eficiencia en la eliminación de una amplia variedad de contaminante además de las sales disueltas, las membranas utilizadas retienen con eficacia contaminantes orgánicos, microorganismos, virus, metales pesados y otros compuestos no deseados esto resulta en un agua purificada que cumple con los estándares de calidad más exigentes, lo que la hace segura para el consumo humano y adecuada para aplicaciones industriales y agrícolas teniendo una alta eficiencia energética en comparación con otras técnicas de desalinización. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a pesar de sus ventajas evidentes, también presenta algunos desafíos significativos siendo el más importante la acumulación de concentrados salinos o rechazo, que consiste en las sales y las impurezas eliminadas durante el proceso, la gestión adecuada de estos concentrados es esencial para evitar impactos ambientales negativos y costos adicionales en donde en algunos casos, el rechazo se descarga al océano

o se utiliza en aplicaciones industriales, pero la búsqueda de soluciones sostenibles para su disposición (Mendoza Montalvo, J, 2016).

La **ósmosis directa (OD)** es una técnica de desalinización que se ha destacado en los últimos años debido a su potencial para abordar los desafíos asociados con la escasez de agua dulce. A diferencia de la ósmosis inversa, que utiliza una membrana semipermeable para separar las sales del agua, esta técnica implica la utilización de una membrana selectiva que permite el flujo de agua pero bloquea el paso de iones y otras partículas disueltas, lo que facilita la concentración de las sales en una corriente de rechazo y la obtención de agua dulce purificada.

El principio fundamental se basa en el fenómeno de la ósmosis, donde el agua tiende a fluir desde una solución diluida hacia una solución más concentrada a través de una membrana semipermeable se aplica una diferencia de concentración entre dos lados de una membrana selectiva, lo que induce el flujo de agua desde la solución menos concentrada (agua de alimentación) hacia la solución más concentrada (agua de rechazo) (Herrera, A., Vela, L., Morales, G., & Castro, I, 2016). A medida que el agua fluye a través de la membrana selectiva, esta retiene las sales y otras impurezas, permitiendo que el agua dulce pase al otro lado, una de las principales funciones que no requiere una alta presión, lo que la hace menos energéticamente intensiva, esto puede ser beneficioso en áreas donde la energía es un recurso limitado o costoso, igualmente tiene el potencial de tratar agua salobre, agua salobre y fuentes de agua contaminada, lo que la hace versátil y adecuada para una variedad de aplicaciones. Sin embargo, todavía enfrenta desafíos técnicos que deben superarse para su adopción a gran escala. Uno de los principales desafíos es el desarrollo de membranas selectivas eficientes y duraderas que puedan resistir la exposición prolongada a soluciones altamente concentradas y, al mismo tiempo, permitir un flujo de agua suficiente, además, el control preciso de la diferencia de concentración y la gestión de la acumulación de sales en la membrana son áreas de investigación críticas para mejorar la eficiencia del proceso. García Martínez, C. (2017).

La **desalinización fotomicrobiana**, también conocida como "desalinización basada en microorganismos fotosintéticos", es una técnica innovadora que aprovecha la fotosíntesis de microorganismos, como las cianobacterias y las algas, para eliminar las sales y otras impurezas del agua. Esta técnica se ha convertido en un área de investigación prometedora debido a su enfoque sostenible y su capacidad para funcionar utilizando recursos naturales, como la luz solar, en lugar de energía convencional.

El proceso de desalinización fotomicrobiana se basa en la capacidad de los microorganismos fotosintéticos para capturar la energía solar y utilizarla para impulsar la fotosíntesis, un proceso en el cual convierten el dióxido de carbono y el agua en compuestos orgánicos, liberando oxígeno como subproducto (Chilón Rivera, L. J., & Deza Ayasta, L. I, 2014).

En el contexto de la desalinización, esta fotosíntesis se utiliza para concentrar las sales disueltas en el agua de mar o salobre y generar agua dulce, la desalinización fotomicrobiana se lleva a cabo en sistemas de cultivo de microorganismos, donde se cultivan cianobacterias o algas en un medio acuoso que contiene agua de mar o agua salobre estos microorganismos absorben la luz solar y utilizan la energía para eliminar selectivamente iones de sodio y otros iones disueltos de la solución, concentrándose en un espacio limitado; el agua dulce resultante se puede recoger y utilizar como recurso hídrico de alta calidad.

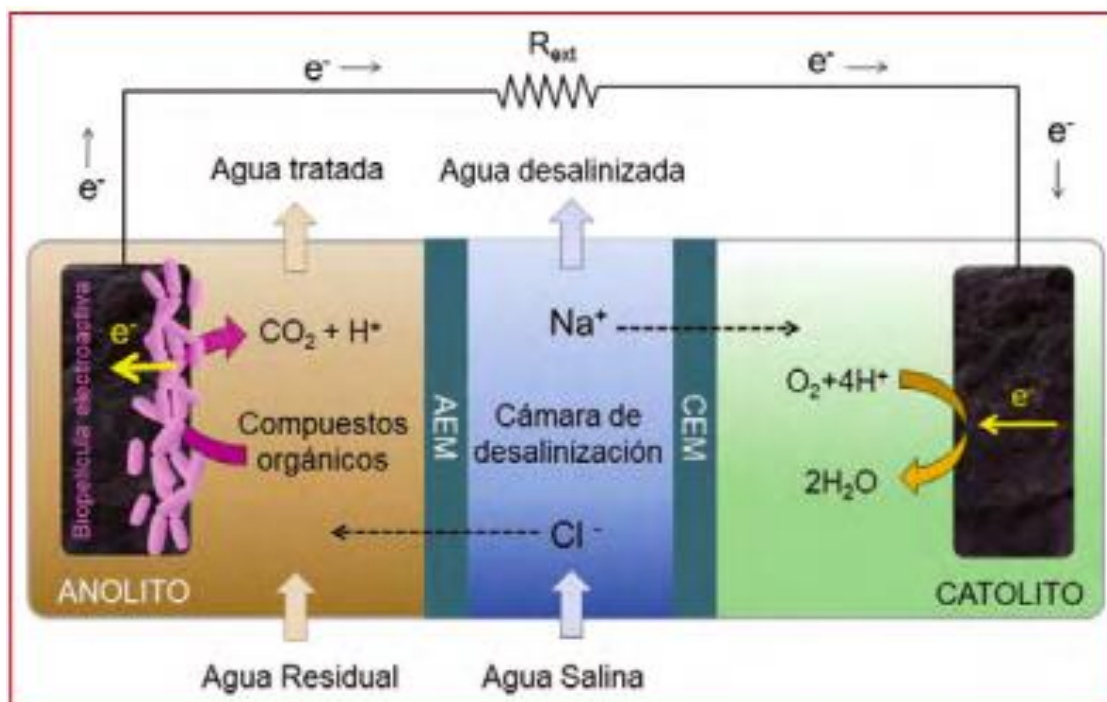
Una ventaja clave de la desalinización fotomicrobiana es su enfoque sostenible a diferencia de otras técnicas que requieren grandes cantidades de energía, como la ósmosis inversa, esta técnica depende en gran medida de la energía solar, lo que la hace respetuosa con el medio ambiente y potencialmente más económica en regiones con una alta disponibilidad de luz solar. Sin embargo, los microorganismos utilizados en el proceso pueden crecer rápidamente y ser cultivados de manera sostenible, por lo tanto, la desalinización fotomicrobiana aún se encuentra en una etapa experimental y enfrenta desafíos técnicos importantes, uno de los principales desafíos es la optimización de las condiciones de cultivo, incluida la selección de microorganismos adecuados y la gestión de la densidad poblacional para lograr una eliminación eficiente de sales. Además, la tecnología debe abordar problemas relacionados con la biofouling (acumulación de organismos en las superficies) y la gestión de subproductos orgánicos generados durante el proceso (Salas Valverde-Fredet, J, 2016).

Las **Celdas de Desalinización Microbiana (CDM)** representan una innovadora y prometedora técnica en el campo de la desalinización que combina principios de electroquímica y microbiología para abordar el desafío global de la escasez de agua potable funcionan a través de la interacción simbiótica entre microorganismos y electrodos, lo que resulta en la desalinización del agua de manera eficiente y sostenible en donde se encuentra una configuración de celda electroquímica que consta de dos electrodos, un cátodo y un ánodo, sumergidos en un compartimento de agua salina o salmuera.

Entre estos electrodos, se coloca una membrana selectivamente permeable que permite el paso de iones y evita la mezcla directa del agua salina con el agua dulce, el proceso de desalinización es un fenómeno multifacético que involucra tanto procesos electroquímicos como biológicos a medida que la corriente eléctrica fluye a través de la celda, los iones cargados positivamente, conocidos como cationes, se desplazan hacia el cátodo, mientras que los iones cargados negativamente, conocidos como aniones, migran hacia el ánodo esto resulta en una concentración gradual de iones en el compartimento de la salmuera y, al mismo tiempo, la generación de una corriente eléctrica que puede ser recolectada y utilizada como energía, sin embargo, lo que hace que sean únicas es la contribución de microorganismos al proceso.

En la superficie del cátodo, se forma una biopelícula compuesta por microorganismos, generalmente microorganismos electroactivos, que catalizan la reacción de reducción de oxígeno, esto crea un ambiente enriquecido en electrones en el cátodo, lo que conduce a una reducción de iones de metal en el agua salina, como resultado, los iones de metal precipitan en forma de sales sólidas en el compartimento de la salmuera, separándose así del agua, lo que da como resultado agua desalinizada en el compartimento de agua dulce (Navarro Chao, M, 2017).

Figura 2. Celdas de desalinización microbiana.



Fuente: Bonell Parada, H. D. (2015).

El proceso biológico de las Celdas de Desalinización Microbiana es un ejemplo de cómo los microorganismos pueden desempeñar un papel fundamental en la mejora de la eficiencia de la desalinización, la actividad microbiana en el cátodo aumenta la capacidad de eliminación de iones metálicos y reduce la concentración de sales en el agua, lo que es esencial para producir agua potable de alta calidad, también ofrecen varias ventajas técnicas y ambientales significativas en comparación con otras tecnologías de desalinización, en primer lugar, son energéticamente eficientes, ya que aprovechan la energía generada en el proceso para alimentar la desalinización en lugar de depender de fuentes externas de energía esto puede reducir significativamente los costos operativos y la huella ambiental de la desalinización además son altamente modulares y escalables, lo que las hace adecuadas para una amplia variedad de aplicaciones, desde sistemas de pequeña escala para comunidades rurales hasta instalaciones industriales de gran envergadura, la capacidad de adaptarse a diferentes tamaños y requisitos de producción las convierte en una opción versátil para abordar las necesidades de agua potable en diversas ubicaciones geográficas (Chaparro Diaz, L. K, 2020).

Otra ventaja clave es su capacidad para funcionar en condiciones ambientales variables y en presencia de fuentes de agua de calidad variable a menudo pueden tolerar fluctuaciones en la composición del agua de alimentación y trabajar eficazmente incluso cuando el agua contiene contaminantes diversos, además tiene el potencial de generar productos secundarios valiosos. Por ejemplo, la precipitación de sales sólidas en el proceso de desalinización puede llevar a la recuperación de metales valiosos a partir del agua salina, lo que podría convertir la desalinización en una fuente adicional de recursos económicos; un aspecto destacado de es su sostenibilidad ambiental a diferencia de algunas tecnologías de desalinización que pueden generar subproductos problemáticos como salmuera concentrada producen un residuo sólido que es más fácil de manejar y eliminar de manera segura al utilizar microorganismos y procesos electroquímicos, en donde no generan productos químicos ni subproductos indeseados, lo que reduce su impacto ambiental.

En cuanto a la disponibilidad de recursos, pueden utilizar agua de mar, agua salobre o incluso aguas residuales salinas como fuentes de agua de alimentación, esto significa que pueden ayudar a abordar la escasez de agua en una variedad de contextos, desde áreas costeras con acceso a agua de mar hasta regiones con aguas subterráneas salinas (Navarro Chao, M, 2017).

La elección de microorganismos específicos desempeña un papel crítico en la eficacia del proceso de desalinización, se han identificado diversas cepas de **bacterias halófilas** como candidatos potenciales para este propósito, estas bacterias han demostrado adaptaciones únicas que les permiten prosperar en ambientes salinos, y su capacidad para interactuar con la salinidad del agua las convierte en participantes valiosos en el proceso de remoción de sal. Entre las bacterias halófilas, se destacan las **halobacterias** y las **bacterias halófilas extremas**, que han mostrado adaptaciones bioquímicas y fisiológicas excepcionales para sobrevivir y proliferar en condiciones de alta salinidad. Su presencia en la CDM puede catalizar la reducción de la concentración de sal en el agua salobre, contribuyendo así al objetivo central de producir agua potable (Fennix Agudelo, M. A., & Miranda Castro, W. P., 2015). A continuación se pueden observar algunos inocuos que se pueden utilizar en la celda de desalinización:

1. ***Desulfovibrio spp.*** (Bacteria): *Desulfovibrio spp.* Son bacterias anaeróbicas que participan en la reducción de sulfatos. Su actividad principal no está centrada directamente en la desalinización, pero su capacidad para reducir sulfatos puede tener implicaciones en ciclos biogeoquímicos, potencialmente afectando la salinidad del entorno (Hagiya, H., Kimura, K., Nishi, I., Yamamoto, N., Yoshida, H., Akeda, Y. y Tomono, K., 2018).
2. ***Shewanella spp.*** (Bacteria): Descripción: *Shewanella spp.* Son bacterias electroactivas que pueden transferir electrones directamente a electrodos. Además, están implicadas en la reducción de metales. Su actividad electroquímica podría contribuir a la desalinización al reducir iones metálicos y transferir electrones al sistema (Martín-Rodríguez, A. J., Martín-Pujol, O., Artiles-Campelo, F., Bolaños-Rivero, M., & Römling, U., 2017).
3. ***Haloquadratum walsbyi*** (Archaea): Este microorganismo es una arquea halófila extrema adaptada a ambientes de alta salinidad. Aunque no está directamente involucrado en procesos de desalinización, su capacidad para realizar fotosíntesis anaeróbica podría influir en la salinidad del entorno (Chen, Y., Zhou, F., Li, G., & Xu, Y., 2009).
4. ***Dunaliella salina*** (Alga): *Dunaliella salina* es una microalga conocida por su tolerancia a altas concentraciones de sal. Acumula sales en vacuolas y, aunque no elimina directamente las sales del agua, puede influir en la concentración iónica en su entorno (Mishra, A., & Jha, B., 2009).
5. ***Pseudomonas spp.*** (Bacteria): Son bacterias versátiles con capacidades metabólicas variadas. Algunas cepas están implicadas en procesos de degradación de contaminantes, y ciertas especies pueden afectar la salinidad del entorno a través de sus actividades metabólicas (Leyton, Y. E., Letelier, A. S., Mata, M. T., & Riquelme, C. E., 2017).

La eficiencia de la remoción de sal dependerá no solo de la elección de los microorganismos, sino también de las condiciones de operación de la celda. Factores como la temperatura, la concentración de sal inicial, y la disponibilidad de nutrientes también influyen en la capacidad de los microorganismos para realizar la desalinización de manera efectiva. Es importante destacar que la

investigación en este campo continúa avanzando, y la identificación y optimización de microorganismos específicos para adaptarse a las condiciones locales y mejorar la eficiencia de la desalinización es un área activa de estudio. Este enfoque, centrado en la biotecnología microbiana, busca proporcionar soluciones más sostenibles y eficientes para abordar la escasez de agua en regiones afectadas.

Por otra parte, al momento de realizar el diseño se tuvieron en cuenta las fórmulas utilizadas para calcular el diámetro del sistema de flujo en la celda de desalinización se basan en principios fundamentales de la física y la ingeniería. La Ley de Darcy, la Ley de Fick y la Ley de Conservación de Masas son conceptos clave que respaldan estas ecuaciones.

La **Ley de Darcy**: describe el flujo de un fluido a través de un medio poroso, como puede ser el caso de una membrana en un sistema de desalinización. Esta ley establece que el flujo de agua a través de un medio poroso es proporcional al gradiente de presión y a la permeabilidad del medio. En el contexto del diseño de la celda, la Ley de Darcy es esencial para entender cómo el agua se moverá a través de la membrana y cómo se puede optimizar este proceso (Askeland, D. R., & Wright, W. J., 2017).

La **Ley de Fick**: se aplica al transporte de especies a través de un medio, como la difusión de solutos a través de una membrana. En el diseño de la celda de desalinización, la Ley de Fick es relevante para comprender cómo ocurre la difusión de sales a través de la membrana y cómo afecta la calidad del agua tratada (Askeland, D. R., & Wright, W. J., 2017).

La **Ley de Conservación de Masas**: establece que la cantidad total de masa en un sistema cerrado permanece constante con el tiempo. En el contexto de la desalinización, esta ley es crucial para garantizar que los flujos de entrada y salida de agua y solutos se equilibren adecuadamente, evitando pérdidas o acumulaciones no deseadas (Tamir, A., & Ruiz Beviá, F., 2005).

11.4. Marco geográfico

El municipio de Riohacha, ubicado en el Departamento de La Guajira, Colombia, posee un rico y diverso contexto geográfico que influye en múltiples aspectos de la vida cotidiana de sus habitantes y en el desarrollo de la región. Geográficamente, Riohacha se encuentra en la costa caribeña de Colombia, con una extensa línea costera a lo largo de la bahía de su mismo nombre y acceso directo al Mar Caribe. Esta ubicación costera estratégica ha contribuido al desarrollo de la ciudad como un centro económico y comercial, facilitando el comercio y la actividad portuaria (Gobierno de La Guajira, 2021).

Desde el punto de vista gubernamental, Riohacha es la capital del Departamento de La Guajira y alberga las principales instituciones gubernamentales de la región. La administración municipal y departamental juega un papel fundamental en la gobernanza local y en la toma de decisiones relacionadas con el desarrollo socioeconómico y ambiental de la zona. Además, la presencia de comunidades indígenas, como los Wayuu, plantea desafíos únicos en términos de autogobierno y preservación de la cultura (Alonso & Vergara, 2015).

En las zonas rurales de Riohacha, la población se dedica principalmente a la agricultura de subsistencia y a la pesca, dependiendo en gran medida de los recursos naturales para su sustento, el suelo, aunque fértil en algunas áreas, puede ser desafiante para la agricultura debido a la aridez y la falta de agua.

Las comunidades que habitan esta zona de Riohacha suelen vivir en casas tradicionales construidas con materiales locales, y a menudo enfrentan dificultades en el acceso a servicios básicos como agua potable, electricidad y atención médica. La Guajira también es hogar de comunidades indígenas Wayú, que han habitado la región durante siglos y tienen una rica cultura y tradiciones propias, la interacción entre estas comunidades indígenas y las poblaciones rurales crea un tejido social diverso y complejo en el área. (Secretaría de Educación de La Guajira, 2021). Las condiciones geográficas como la falta de agua y la sequía frecuente proporcionan el contexto para comprender los desafíos y las oportunidades que enfrentan las poblaciones rurales en Riohacha, La Guajira.

Figura 3. Ubicación del municipio de Riohacha.



Fuente: Corporación Autónoma Regional de La Guajira. (2021).

En el ámbito económico, Riohacha y La Guajira dependen en gran medida de la agricultura, la pesca y la ganadería como fuentes de ingresos. La tierra fértil y las condiciones climáticas favorables permiten la producción de productos agrícolas como maíz, sorgo y ají. La pesca comercial y deportiva es una actividad importante debido a la proximidad al mar y la diversidad de especies marinas. Además, el turismo desempeña un papel creciente en la economía local, ya que Riohacha atrae a visitantes que buscan disfrutar de sus playas y explorar la belleza natural del desierto de La Guajira (Gobierno de La Guajira, 2021).

En cuanto a la educación, Riohacha cuenta con instituciones educativas que brindan oportunidades de aprendizaje a la población local. La educación es esencial para el desarrollo de habilidades y la mejora de la calidad de vida de los habitantes. Sin embargo, persisten desafíos en términos de acceso a la educación de calidad, especialmente en las áreas rurales y para las comunidades indígenas. La promoción de la educación inclusiva y el fortalecimiento de la infraestructura educativa son objetivos clave para mejorar las oportunidades de desarrollo en la región (Secretaría de Educación de La Guajira, 2021).

En el ámbito ambiental, la geografía de La Guajira, con su desierto y su ecosistema costero, es de gran importancia. La conservación de los recursos naturales y la biodiversidad marina son preocupaciones cruciales. El manejo sostenible de los recursos hídricos y la protección de los ecosistemas costeros, incluidos los manglares y las áreas de anidación de aves marinas, son prioridades para garantizar la salud ambiental a largo plazo de la región. Además, la gestión de residuos y la mitigación de la contaminación son cuestiones clave para preservar el entorno natural de Riohacha y sus alrededores (Corporación Autónoma Regional de La Guajira, 2021).

11.5. Marco normativo

Tabla 1. Matriz normatividad ambiental.

Matriz de Normatividad Ambiental						
Tema ambiental	Nivel	Tipo de normativa	No. normativa	Fecha de expedición (dd/mm/aaaa)	Expedida por	Descripción
Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano	Nacional	Decreto	1575	9/05/2007	Ministerio de la Protección Social	Establece las normas y regulaciones para garantizar la calidad del agua potable en Colombia y la protección de la salud pública a través de la vigilancia y el control de los sistemas de abastecimiento de agua (Decreto 1575 de 2007, 2007).
Uso del Agua y Residuos Líquidos	Nacional	Decreto	4728	23/12/2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Establece los lineamientos frente a los vertimientos de residuos en aguas superficiales, subterráneas, interiores y marinas en el territorio nacional. Explica el plan de prevención y atención de desastres frente a los derrames de hidrocarburos y sus derivados (Decreto 4728 de 2010, 2010).
Ley Sanitaria	Nacional	Ley	9	24/01/1979	Congreso de Colombia	Garantizar un ambiente sano y equilibrado para todos los ciudadanos colombianos y proteger el patrimonio ambiental y los recursos naturales del país. Esta norma a tenido diversas modificaciones a lo largo de los años, sin embargo sigue vigente (Ley 9 de 1979, 1979).
Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Nacional	Decreto-Ley	2811	18/12/1974	Presidencia de la República	Regular y promover la conservación, protección y uso sostenible de los recursos naturales renovables y la preservación del medio ambiente en Colombia. Modificada parcialmente por la Ley 2099 de 2021 (Decreto 2811 de 1974, 2021).
Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Nacional	Decreto	1076	26/05/2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Unificar y consolidar las normativas y regulaciones relacionadas con el sector ambiental y el desarrollo sostenible en Colombia en un solo documento, con el fin de facilitar la comprensión y aplicación de las disposiciones legales. Esta norma es compilatoria de diferentes normas ambientales. Última actualización 25 de agosto de 2023 (Decreto 1076 de 2015, 2023).
Sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano	Nacional	Resolución	2115	22/06/2007	Ministerio de la Protección Social- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Definir los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en Colombia para garantizar que sea segura y adecuada para el consumo humano (Resolución 2115 de 2007, 2007).
Requisitos técnicos para los proyectos de agua y saneamiento básico de zonas rurales	Nacional	Resolución	844	8/11/2018	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Establece los requisitos técnicos aplicable durante las etapas de perfil de proyecto, planeación, construcción y puesta en marcha administración u operación y mantenimiento de la infraestructura destinada al suministr de agua para consumo humano y doméstico y saneamiento básico a población asentada en zonas rurales (Resolución 0844 de 2018, 2018).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Continuación de la tabla 1.

Matriz de Normatividad Ambiental						
Tema ambiental	Nivel	Tipo de normativa	No. normativa	Fecha de expedición (dd/mm/aaaa)	Expedida por	Descripción
Inversión Forzosa por la utilización del agua tomada directamente de fuentes naturales	Nacional	Decreto	2099	22/12/2016	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Estipula que todo proyecto que requiera licencia ambiental y que involucre en su ejecución el uso del agua tomada directamente de fuentes naturales para cualquier actividad, deberá destinar no menos del 1% del total de la inversión para la recuperación, conservación, preservación y vigilancia de la cuenca hidrográfica que alimenta la respectiva fuente hídrica. El presente decreto deberá entenderse incorporado al Decreto número 1076 de 2015 y rige a partir de la fecha de su publicación (Decreto 2099 de 2016, 2016).
Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua	Nacional	Decreto	1090	28/06/2018	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y aplica a las Autoridades Ambientales, a los usuarios que soliciten una concesión de aguas y a las entidades territoriales responsables de implementar proyectos o lineamientos dirigidos al uso eficiente y ahorro del agua (Decreto 1090 de 2018, 2018).
Creación Ministerio del Medio Ambiente	Nacional	Ley	99	22-dic-1993	Congreso de Colombia	Promover el desarrollo sostenible en Colombia, equilibrando el crecimiento económico con la conservación y protección del ambiente (Ley 99 de 1993, 2023).
Costos económicos de servicios públicos domiciliarios de acueducto y/o alcantarillado	Nacional	Resolución	963	17-marzo-2022	Comisión de regulacio de agua potable y saneamiento basico-Cra	Establecer la regulación para la unificación de los costos económicos de referencia de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y/o alcantarillado en esquemas regionales de prestación en los cuales las personas prestadoras decidan unificar todos los costos económicos (Resolución 963 de 2022, 2022).
Saneamiento Basico	Nacional	Resolución	955	27-sept-2021	Comisión de regulacio de agua potable y saneamiento basico-Cra	Establece los lineamientos de costo, suspensión, reconexión y demás a las empresas prestadoras de servicio público y sus suscriptores (Resolución 955 de 2021, 2021).

Fuente: Elaboración propia.

La relevancia del marco normativo (tabla 1 y 2) en esta investigación que tiene como meta la proposición de una alternativa tecnológica para reducir la escasez de agua en comunidades rurales de Riohacha, La Guajira, se fundamenta en su función crucial para establecer directrices legales que regulan el uso, gestión y conservación del recurso hídrico.

Este marco, salvaguarda los ecosistemas acuáticos y terrestres, resultando esencial para comprender la interdependencia entre el suministro de agua y la preservación ambiental. Asimismo, estas regulaciones ejercen un impacto directo en la calidad de vida de las comunidades, al garantizar un acceso equitativo y sostenible al vital líquido.

Desde una perspectiva investigativa, el marco normativo proporciona un sólido fundamento metodológico, estableciendo criterios, límites legales y parámetros para el análisis de datos y la formulación de soluciones. Su énfasis en tecnologías sostenibles y la preservación de recursos plantea una base integral para abordar la escasez de agua, atendiendo tanto las necesidades inmediatas de la población como la conservación a largo plazo de los recursos naturales.

11.6. Marco Institucional

El diseño tridimensional de desalinización microbiana en Riohacha, La Guajira, se encuentra inmerso en un complejo marco institucional que involucra una variedad de entidades gubernamentales, actores económicos, instituciones educativas, organizaciones ambientales y sociales. Este marco es fundamental para garantizar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto, abordando aspectos técnicos, económicos, educativos, ambientales y sociales de manera integral.

Desde el punto de vista gubernamental, las entidades desempeñan un papel crucial en el diseño y la implementación de la celda de desalinización. En el nivel local, la Alcaldía de Riohacha es la entidad encargada de la administración municipal y desempeña un papel coordinador en la planificación y ejecución de proyectos de desarrollo en la ciudad. A nivel departamental, la Gobernación de La Guajira ejerce un papel de supervisión y apoyo, proporcionando recursos y regulaciones necesarias para proyectos de esta envergadura (Gobierno de La Guajira, 2021).

En el ámbito educativo, la formación y capacitación son esenciales para garantizar la operación eficiente de la celda de desalinización y el desarrollo de capacidades locales. Las instituciones educativas locales, como la Universidad de La Guajira, pueden desempeñar un papel fundamental en la formación de técnicos y profesionales en el campo de la desalinización y la gestión del agua. Además, la cooperación con instituciones de investigación y desarrollo a nivel nacional e internacional puede enriquecer la base de conocimientos y la innovación tecnológica.

En cuanto a las entidades ambientales, la Corporación Autónoma Regional de La Guajira (Corpoguajira) es la autoridad ambiental encargada de supervisar y regular proyectos que puedan afectar el entorno natural de la región. La cooperación con Corpoguajira es esencial para garantizar que el diseño de la celda de desalinización cumpla con las normativas ambientales y contribuya a la conservación de los ecosistemas costeros (Corporación Autónoma Regional de La Guajira, 2021).

Las organizaciones y comunidades sociales locales desempeñan un papel significativo en la aceptación y el éxito del proyecto. La consulta pública y la participación activa de las comunidades indígenas, como los Wayuu, son esenciales para respetar sus derechos y tradiciones culturales (Alonso & Vergara, 2015). Las organizaciones no gubernamentales (ONG) pueden colaborar en proyectos de desarrollo sostenible y en la promoción de prácticas responsables.

12. Metodología

En el presente apartado se mostrará la metodología planteada para el proyecto, con el propósito de lograr los objetivos específicos del mismo, y de esta manera alcanzar el cumplimiento total de la investigación. Es por esto que la metodología tiene como objetivo proponer un diseño de Celda de Desalinización Microbiana que sea viable para una futura aplicación de dicha tecnología en una comunidad rural del municipio de Riohacha.

12.1. Enfoque

La viabilidad de una CDM a partir de un modelo tridimensional para la remoción de agua salobre y su posible aplicabilidad en comunidades rurales de Riohacha (Guajira) teniendo en cuenta el análisis de técnicas, investigación cualitativa (entrevistas) y diseño de esta, corresponde a una investigación de **enfoque mixto** ya que se combinarán datos cualitativos, resultados textuales y

verbales (entrevista a la comunidad acerca de su percepción del diseño de la CDM), y cuantitativos, obtención y recopilación de datos numéricos (cálculos para el diseño de la tecnología). Con dicho enfoque investigativo será posible entender de forma más precisa el problema de escasez de agua a la que se enfrentan día a día las comunidades rurales de Riohacha y de esta manera generar una posible solución, a través del diseño de una Celda de Desalinización Microbiana, a este inconveniente social, ambiental y económico de un modo integral y holístico.

12.2. Alcance

Teniendo en cuenta los objetivos específicos planteados para la ejecución de este proyecto investigativo, se determinaron tres fases de ejecución y con estas su respectivo alcance. Para el primer objetivo específico se determinó que su alcance es **explicativo**, ya que esta fase del proyecto es la encargada de analizar diferentes tipos de técnicas de desalinización y cuál de estas es la más apropiada para adaptar el modelo a la CDM, también es importante aclarar que este tipo de alcance es usado cuando el tema de investigación es poco estudiado en la zona de estudio elegida (Hernández Sampieri, R, 2014).

El alcance del objetivo específico número dos es **correlacional**, puesto que esta sección del proyecto requiere del análisis de múltiples variables económicas, sociales y ambientales que se encuentran asociadas entre sí, esto con el fin de determinar la aplicabilidad del modelo de la CDM en las comunidades rurales de Riohacha, La Guajira.

El último objetivo específico corresponde a un alcance de tipo **descriptivo**, debido a que en esta fase se establecen las características del prototipo de la CDM y así mismo se describe cada parte de la misma, además, es en este momento del proyecto donde se evalúa el potencial que puede llegar a tener la Celda de Desalinización Microbiana.

12.3. Método

Teniendo en cuenta que para el desarrollo correcto de la investigación fue necesario iniciar con el entendimiento de conceptos, técnicas, y métodos, se estableció el **método deductivo** como la herramienta principal para alcanzar los objetivos propuestos en este proyecto (Hernández Sampieri, R, 2014). Es importante resaltar que con este instrumento fue posible obtener conclusiones a partir de conocimientos generales y lógicos (Hernández Sampieri, R, 2014). En este caso en particular se partió desde el análisis de técnicas de desalinización que puedan ser acopladas a una Celda de Desalinización Microbiana, definir su aplicabilidad en comunidades rurales de Riohacha (La Guajira) por medio del análisis de datos cualitativos, y de esta manera poder diseñar dicha tecnología. Finalmente, se obtuvieron conclusiones de la viabilidad de esta tecnología en la zona y comunidad de estudio.

12.4. Técnicas

Para la ejecución de este trabajo de grado son necesarias varias técnicas de investigación debido a la complejidad de su alcance. Con el primer objetivo específico se hará uso del análisis de información propuesto por la biblioteca Juan Roa Vásquez para la recolección de información nacional e internacional acerca de técnicas de desalinización y Celdas de Desalinización Microbiana, seguido a esto, es necesario el establecido de una matriz de información que permita el análisis de las técnicas de desalinización y así mismo la elección de la más apropiada, esta última técnica es desarrollada de manera libre por los autores de este proyecto. Ahora bien, para

el segundo objetivo específico es necesario el establecimiento y elección de las personas por medio de técnicas de investigación cualitativa como definición y conformación de grupos focales, entrevistas semiestructuradas y el análisis espacial cualitativo. Finalmente, para el tercer objetivo específico es necesario hacer uso de técnicas de diseño en software aplicados que permitan la visualización de la CDM en diferentes planos y posibiliten una simulación del funcionamiento de la tecnología para finalmente definir la viabilidad de la CDM en la comunidad seleccionada.

12.5. Instrumentos

Los instrumentos para la recolección o medición de los diferentes objetivos del proyecto varían según estos debido a que sus metas son diferentes en cada uno. Sin embargo, entre los diferentes instrumentos resaltan los formatos de entrevista, recibo de servicio público de acueducto y alcantarillado, programas de dibujo computacional, bases de datos, y demás que serán mencionados en el anexo 1. Dichos materiales permitirán la medición de variables independientes.

12.6. Unidad de análisis

En el presente proyecto investigativo se considera como unidad de análisis la aceptación y percepción de la Celda de Desalinización Microbiana en la comunidad seleccionada.

12.7. Diseño de la investigación

El diseño general de la investigación es **experimental** debido a que el diseño de la tecnología propuesta tendrá en cuenta a la comunidad pueda recibir algún beneficio de esta, el desarrollo de la misma tiene variables definidas, se tendrá en cuenta la relación de estas y se evaluarán los resultados con la posibilidad de que estos no sean los esperados, esto desde el enfoque cuantitativo. Para el enfoque cualitativo, también se tiene un diseño experimental ya que en este se hará uso de análisis espacial para validar o refutar la hipótesis propuesta según los resultados obtenidos de las personas entrevistadas habitantes de Riohacha, La Guajira.

Como se ha mencionado a lo largo de este apartado de metodología, cada objetivo específico se lleva a cabo con alcances, técnicas e instrumentos diferentes, lo que conlleva a que sus variables y actividades también lo sean. En el anexo 1 es posible visualizar estos ítems por cada objetivo específico.

12.8. Metodología por objetivo

12.8.1. Metodología del objetivo específico 1: Comparar la eficiencia de diferentes técnicas de desalinización, con el propósito de determinar la alternativa que logré el mayor grado de desalinización y producción de agua potable.

Para dar el correcto cumplimiento a este objetivo, se empleó una metodología basada en la recolección de información bibliográfica propuesta por la Biblioteca Juan Roa Vásquez. Esta consistió en una serie de pasos, los cuales serán explicados más adelante, que permitieron dar como resultado la construcción de una matriz de técnicas de desalinización usadas en el mundo para la reducción de sal en el agua de pozo con condiciones salobres; dicho resultado con el fin

de seleccionar la mejor alternativa para acoplar al diseño de Celda de Desalinización Microbiana (CDM).

12.8.1.1) Selección de palabras clave y normalización de términos

Para dar inicio a la recopilación de información se definieron palabras clave que facilitarían la búsqueda de información, estas fueron “técnicas de desalinización” y “Celda de Desalinización Microbiana”. Al obtener dichos términos, fue posible hacer un filtro en la revisión de literatura y de esta manera facilitar y agilizar la búsqueda de información de las posibles técnicas de desalinización que pueden ser acopladas a la CDM.

Con las palabras clave seleccionadas, se llevó a cabo la normalización de términos (tesauros), esto fue de primordial importancia ya que de esta manera se estandarizó y se controló el área de estudio de la investigación, y así obtener información de calidad. En este caso se hizo uso de los siguientes tesauros: IEEE y UNESCO. A continuación se mostrará la normalización de términos de cada uno.

A) Tesauro de la UNESCO

Tabla 3. Normalización términos según tesauro de la UNESCO.

Palabra clave	Término preferido o concepto genérico	Términos en inglés	Conceptos relacionados
Desalinización	Tratamiento del agua	Desalination	● Agua de mar ● Agua salada ● Calidad del agua ● Oceanografía química ● Salinidad

Fuente: Elaboración propia.

B) Tesauro IEEE

Tabla 4. Normalización términos según tesauro de IEEE.

Palabra clave	Término más amplio (BT)	Término relacionado (RT)
Desalinización	● Conservación del agua ● Recursos hídricos	Ósmosis inversa

Fuente: Elaboración propia.

12.8.1.2) Definición criterios de búsqueda y bases de datos

Con los tesauros obtenidos, fue posible definir el tipo de literatura que sería usada para la revisión bibliográfica. En esta se establece que la información a revisar sería tomada de varias fuentes, sin embargo, se destacaron los artículos científicos, tesis de grado y estudios de caso.

Los operadores booleanos fueron usados para la obtención de literatura de calidad para la investigación y de esta manera los resultados de esta sean más precisos y eficientes. En la tabla

que se observa a continuación, se resaltan las maneras de búsqueda con mayor relevancia para la elaboración del objetivo 1.

Tabla 5. Ecuaciones para la búsqueda de información.

Búsqueda de información generalizada
Técnicas AND Desalinización
Desalination AND Techniques
Desalinización AND “Tratamiento del agua”
Desalinización AND “Ósmosis inversa”
Desalinización AND “Agua de mar”

Fuente: Elaboración propia.

Con la información proporcionada por la tabla 5 se dio inicio a la búsqueda de información en bases de datos otorgadas de la Biblioteca Juan Roa Vásquez. Estas fuentes fueron: Science Direct, ProQuest y Google académico. La selección de las bases de datos fue dada por la importancia que tiene cada una de estas en la publicación de documentos relevantes para la ingeniería.

12.8.1.3) Filtración de información

La información obtenida en las diferentes bases de datos fue filtrada por medio de la lectura rápida de resumen de artículos que cumplieran con los pasos anteriores. Con esta revisión rápida se determinó si dichos documentos proporcionaban datos de interés para la investigación. De esta manera se logró reducir la cantidad de documentos que serían usados para la construcción de la matriz de técnicas de desalinización.

12.8.1.4) Construcción de matriz de recopilación de información

Con las publicaciones más relevantes para la investigación se realizó la matriz comparativa de técnicas de desalinización. Esta se construyó teniendo en cuenta diferentes criterios de interés para el planteamiento del diseño de la Celda de Desalinización Microbiana (CDM). En esta se establecieron ítems de: título de la publicación, autores, año, tipo de literatura, técnica de desalinización, descripción de la misma, tiempo de desalinización, capacidad, porcentaje de eficiencia o remoción de sal, y costo de cada una de las técnicas por metro cúbico de agua salobre a tratar; las figura 4 y 5 muestra cómo sería organizada esta información. Cada uno de estos parámetros fue usado con el fin de definir cuál técnica de desalinización es la más adecuada para acoplar a la CDM teniendo en cuenta los requerimientos de las comunidades rurales del municipio de Riohacha.

Figura 4. Primera parte de la organización de matriz de síntesis de técnicas de desalinización.

Título	Autores	Año	Tipo de literatura	Técnica de desalinización
--------	---------	-----	--------------------	---------------------------

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Segunda parte de la organización de matriz de síntesis de técnicas de desalinización.

Descripción de técnica de desalinización	Tiempo que requiere para desalinizar	Capacidad	Porcentaje de eficiencia	Costo (COP/m3)
--	--------------------------------------	-----------	--------------------------	----------------

Fuente: Elaboración propia.

12.8.1,5) Análisis y elección de técnica de desalinización

Con la información obtenida de la matriz de síntesis de información de técnicas de desalinización se llevó a cabo un análisis de cada una de estas por medio de una tabla comparativa (tabla 6), donde se seleccionó el sistema de remoción de sal que proporcionará mejor rendimiento en cada uno de los criterios de la matriz.

Tabla 6. Esquema de tabla comparativa para la elección de técnicas de desalinización.

Técnica de desalinización	Capacidad	Tiempo de tratamiento	Costo	Eficiencia de remoción de sal	Puntaje total
Ósmosis inversa					
Ósmosis directa					
Destilación flash multietapa					
Fotomicrobiana					
Bio-electro-Fenton					

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar dicha tabla (tabla 6) se evaluaron cuatro criterios principales: capacidad, tiempo, costo y eficiencia de remoción de sal de las cinco técnicas de desalinización puestas en la matriz de recopilación de técnicas de desalinización.

Ahora bien, con los criterios de evaluación seleccionados se hizo uso de la metodología de los “Criterios de cuantificación basados en el peso de la evidencia”, propuesta por Matthews et al., (2006). Este enfoque implica la asignación de valores a la información recopilada en función de su calidad y fiabilidad (Matthews et al., 2006). Con el objetivo de realizar una evaluación precisa de los parámetros presentados en la tabla 6, se adoptó esta metodología adaptada desde el análisis multicriterio realizado en toxicología ambiental, al considerar su facilidad de aplicación y adaptabilidad para el cumplimiento del objetivo 1 del presente proyecto.

La aplicación de los criterios de cuantificación se llevó a cabo considerando la calidad, precisión y relevancia de cada fuente de información relacionada con las técnicas de desalinización. Se asignaron valores a los diferentes parámetros evaluados en la tabla 6, de acuerdo con la consistencia y la credibilidad de los datos recopilados. Dichos valores pueden ser visualizados en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Puntaje según calidad de resultados.

Calidad de resultados	
Baja	15
Media	20
Alta	25

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Puntaje según importancia del criterio.

Importancia de criterios	
Baja	1
Media	2
Alta	3

Fuente: Elaboración propia.

A cada uno de estos ítems de evaluación se les asignaron valores de calificación de 15 a 25 (tabla 7) dependiendo de la calidad de los resultados obtenidos, según se indica en la metodología de Santos, 2015. Seguido a esto, cada valor se multiplicó por 1, 2 ó 3 teniendo en cuenta las consideraciones de los autores en la evaluación de la importancia del criterio para el diseño de la CDM y las necesidades de las comunidades rurales de Riohacha.

Este enfoque permitió realizar una evaluación más detallada y equitativa de las distintas técnicas de desalinización, facilitando la comparación y la identificación de las características más relevantes de cada técnica. Asimismo, la integración de estos criterios proporcionó una base sólida para la elaboración de la tabla comparativa, ofreciendo una visión holística y fundamentada de las diversas opciones de desalinización disponibles.

12.8.2. Metodología del objetivo específico 2: Evaluar los criterios económicos, sociales y ambientales de la tecnología de CDM valorada a fin de conocer su viabilidad en las comunidades vulnerables del municipio de Riohacha.

El cumplimiento de este objetivo se llevó a cabo por medio de entrevistas sincrónicas donde participaron diferentes habitantes de Riohacha, La Guajira. Esto se hizo con el fin de hacer un diagnóstico de condiciones económicas y sociales de la zona donde la CDM sería implementada, para así optimizar el diseño de la misma a los criterios dados por la comunidad. Estas entrevistas se realizaron de la siguiente forma:

12.8.2.1) Creación de entrevistas semiestructuradas

Se realizó un formato de entrevista semiestructurada para obtener información cualitativa de importancia para la investigación. Estas se dividieron en componentes clave que permitieran un diagnóstico de las necesidades de la población; estos aspectos fueron:

- a. Información del entrevistado
- b. Accesibilidad a agua potable
- c. Viabilidad y factibilidad de la CDM en la zona de estudio
- d. Diseño y tecnología
- e. Impacto comunitario
- f. Sostenibilidad y mantenimiento
- g. Financiamiento
- h. Participación comunitaria, y espacio
- i. Preguntas y recomendaciones

El formato de la entrevista semiestructurada con las preguntas específicas pueden ser visualizadas en el anexo 2.

12.8.2.2) Aplicación de entrevistas

Por medio de familiares, amigos y redes sociales, se hizo llegar la convocatoria de participación a la entrevista para las personas de Riohacha que desearán contribuir a esta investigación. En la difusión de información se comunicó el objetivo del proyecto, las entrevistas y cómo se llevarían a cabo estas.

Este mecanismo de recolección de información cualitativa (entrevista semiestructurada) se llevó a cabo sincrónicamente haciendo uso de aplicaciones como Google Meet y videollamadas de WhatsApp, la cual empezó por la presentación de los investigadores y participantes del proyecto, seguido de esto se leyó el consentimiento informado (anexo 3) al entrevistado, y finalmente se realizó la entrevista.

Este grupo de personas estuvo conformado por estudiantes de ingeniería ambiental de la universidad de La Guajira, los cuales se encontraban cursando la materia de calidad del agua; un profesional de ingeniería ambiental y un técnico en radiología, Para este ejercicio se contó con la participación de 3 personas individualmente y un grupo focal conformado por 10 personas, de las cuales se obtuvo información de 6 debido a fallos en la conectividad de edades entre 19 y 50 años. Al tener acceso a una comunidad con diferentes perspectivas se obtuvo información diversa que fue clave para el diseño de la CDM.

12.8.2.3) Transcripción de entrevistas

Con las grabaciones de cada una de las entrevistas, se hizo su respectiva transcripción una a una siguiendo detenidamente cada detalle para que esta fuera lo más acertada posible y así no tener sesgos en la información recolectada.

Para la transcripción se utilizó la inteligencia artificial Deepgram para el reconocimiento de audio, sin embargo, este no es muy preciso por lo tanto se realizó gran parte de las transcripciones de manera manual; seguido a esto una de las personas codificadoras validó la información del audio y la transcripción, y así poder enviar a algunos entrevistados estas anotaciones para tener su verificación.

12.8.2.4) Análisis de las entrevistas

Para realizar el análisis de datos cualitativos se siguió el enfoque fenomenológico, realizando una codificación axial independiente por dos miembros del equipo investigador (ver figura 6). La codificación fue entonces revisada por ambas partes realizando modificaciones dependiendo de las consideraciones realizadas y llegando a un libro de códigos final que fue aplicado a todas las entrevistas.

Figura 6. Formato para la elaboración de la codificación.

Código	Genero	Ocupación / Características que influyeron en la elección de las personas	Lugar de Origen	Lugar de Residencia	Promedio de edad
--------	--------	---	-----------------	---------------------	------------------

Fuente: Elaboración propia.

Ya finalizada la codificación de cada una de las transcripciones se hace un análisis por cada categoría y subcategoría, como se muestra en la figura 7, de lo que el entrevistador quiere mostrar. Para este ejercicio no se tomó ningún tipo de software para el análisis cualitativo.

Figura 7. Formato para la elaboración del análisis cualitativo.

Categoría / subcategoría	Análisis
Código: Cita	Análisis de los fragmentos citados en las entrevistas

Fuente: Elaboración propia.

12.8.3. Metodología del objetivo específico 3: Diseñar en un modelo 3D una Celda de Desalinización Microbiana evaluando la viabilidad de aplicación comunidades vulnerables del municipio de Riohacha.

Se empleó modelado 3D utilizando la herramienta SolidWorks, esta técnica permite crear representaciones digitales detalladas y precisas de los componentes de la celda de desalinización, lo que facilita la visualización del diseño y la identificación de posibles mejoras, además, se utilizan simulaciones computacionales para analizar el flujo de agua y la concentración de sal en el sistema, lo que ayuda a optimizar el diseño y garantizar su eficacia en la producción de agua potable, la combinación de estos enfoques, técnicas e investigaciones asegura una aproximación integral para desarrollar una solución efectiva y viable para la comunidad de Riohacha. A continuación se describe este enfoque metodológico con mayor detalle:

12.8.3.1) Diseño preliminar y modelado en SolidWorks

Con los datos recopilados, se procede al diseño preliminar 2D realizado en AutoCAD, teniendo en cuenta las dimensiones generales de la celda de 1 metro de alto, ancho y largo (Se pueden observar en el análisis del objetivo 3), y la disposición de los componentes clave. Luego, utilizando SolidWorks, se crea un modelo 3D detallado de la CDM, cada componente, desde las placas de membrana hasta los sistemas de tuberías.

12.8.3.2) Simulaciones y optimización del diseño

Las simulaciones en SolidWorks son esenciales para analizar el flujo de agua a través de la celda y evaluar la concentración de sal en el agua dulce producida, estas simulaciones ayudan a identificar áreas de mejora y posibles congestiones en el sistema basándose en los resultados de

las simulaciones, se realiza una optimización iterativa del diseño; ajustes en las dimensiones de las placas de membrana y la configuración de los canales de flujo son implementados para lograr un diseño altamente eficiente capaz de tratar 1000 litros/día de agua de pozo al día.

La metodología para la optimización del diseño de la Celda de Desalinización Microbiana (CDM) se realiza adoptando el siguiente paso a paso:

- i) Inicia con la recopilación de datos esenciales, incluyendo información sobre la calidad del agua en la región de Riohacha y la demanda diaria de agua potable, estimada en 5 litros por persona según las entrevistas realizadas a la comunidad.
- ii) Posteriormente, se procede a la configuración detallada del modelo tridimensional en SolidWorks, integrando dimensiones específicas y propiedades físicas del agua y componentes. Para eso se tiene en cuenta la siguiente información:
 - a. Los pozos en La Guajira, Colombia, que se caracterizan por concentraciones significativas de sales disueltas debido a la aridez de la región. (Majarres F, 1964). En este aspecto, de acuerdo con Ramos Nemocon, J. S., & Ramos Quintero, J. F. (2017), la composición del agua del nivel freático en áreas rurales de La Guajira puede variar de acuerdo con las concentraciones específica de cloruros y sulfatos, asimismo, se han reportado niveles apreciables de minerales como hierro y manganeso en pozos de la zona, lo que puede afectar la calidad del agua y generar coloraciones no deseadas.
 - b. El nivel temperatura del agua puede considerarse cálido debido a las altas temperaturas superficiales (28- 30°C) y la profundidad de los pozos del área de Riohacha (Ulloa et al., 1988).
 - c. Debido a las características geológicas y climáticas del territorio, la calidad del agua en estos pozos puede variar en términos de pH, así como la presencia de otros contaminantes de origen antrópico. Se espera la presencia de contaminantes microbiológicos, como bacterias y virus, que pueden ser un desafío adicional para la potabilización del agua
 - d. La profundidad del nivel freático, fluctuante según la temporada y ubicación específica, también influye en la accesibilidad y calidad del agua en los pozos.
- iii) Se identifican parámetros cruciales como la permeabilidad del material de la celda (P), la remoción de sal, la producción de energía y el caudal de agua, la selección de materiales permeables y la evaluación de la permeabilidad siendo está tomada de información predeterminada desde su fabricación; estos cálculos se realizan para garantizar la eficiencia del proceso.
- iv) Finalmente, se desarrolla un modelo matemático que describe las interacciones entre microorganismos, el material de la celda y el agua salina, permitiendo cálculos iterativos para optimizar la permeabilidad y otros factores. Se realiza un análisis detallado del caudal y el flujo de agua, asegurándose de que el diseño permita un flujo adecuado para maximizar la eficiencia de la desalinización. La metodología se completa con la evaluación de la producción de energía.

Una última fase implica la ejecución de simulaciones en SolidWorks Flow Simulation para analizar el flujo de agua a través de la celda y evaluar la concentración de sal en el agua dulce producida. Estas simulaciones proporcionan datos cruciales para identificar áreas de mejora y posibles congestiones en el sistema. Con base en los resultados, se lleva a cabo una optimización

del diseño, implementando ajustes en las dimensiones de las placas de membrana y la configuración de los canales de flujo.

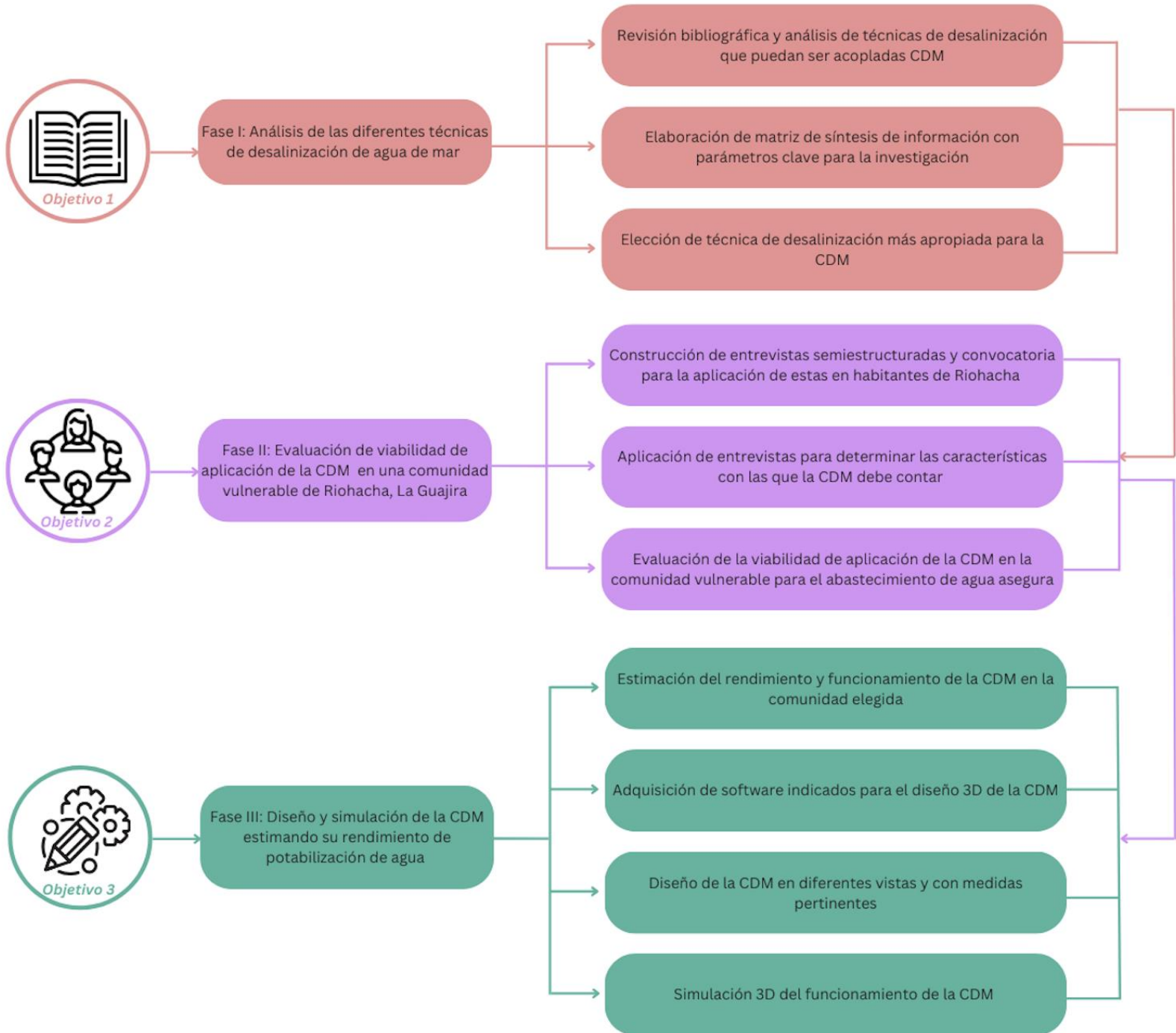
12.8.3.3) Evaluación de viabilidad

Se evalúa la viabilidad del diseño considerando factores como los costos de producción, la disponibilidad de materiales en la región y la sostenibilidad a largo plazo. Además, se analizan aspectos culturales y sociales para asegurar la relevancia y aplicabilidad del sistema en la comunidad de Riohacha. Esta metodología detallada y centrada en resultados no solo proporciona una solución técnica a la escasez de agua potable, sino que también establece un modelo para futuros proyectos similares en otras regiones vulnerables del mundo. Al integrar la tecnología avanzada de SolidWorks con un enfoque meticuloso y orientado a la comunidad, se espera mejorar significativamente la calidad de vida para las personas que enfrentan desafíos diarios debido a la falta de acceso a agua potable confiable.

13. Plan de trabajo

El presente plan de trabajo (figura 8) se propone con el fin de establecer un sistema organizado y equilibrado para llevar a cabo los objetivos planteados para la realización completa y correcta del proyecto de investigación enseñado a lo largo de este documento. Para esto se consideró fijar tres fases, la primera consta de una revisión bibliográfica que permita el análisis de diferentes técnicas de desalinización de agua de pozo con condiciones salobres para así poder establecer cuál de dichos métodos es el más apropiado para su adaptación en la Celda de Desalinización Microbiana. En la segunda fase se espera hacer la valoración de aplicabilidad de la CDM en comunidades rurales de Riohacha, La Guajira, por medio de la instauración de criterios económicos, sociales y ambientales de dicha población. En la última y tercera fase se realizará el diseño de la CDM en el cual se hará uso de un software de dibujo que permita visualizar la tecnología en diferentes vistas; seguido a esto se hará la simulación de funcionamiento de la CDM donde se pueda visualizar el funcionamiento real de la misma.

Figura 8. Plan de trabajo del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Los esquemas de cronograma, donde es posible visualizar por actividades el tiempo de ejecución de cada una de estas, y el presupuesto para la elaboración de este proyecto se encuentran en el anexo 4.

14. Aspectos éticos

Realizar entrevistas en proyectos de investigación conlleva una gran responsabilidad ética hacia los participantes. Estos son algunos aspectos clave a considerar para asegurar que las entrevistas sean éticas, respetuosas y valiosas tanto para los investigadores como para los participantes: En el proceso de realizar entrevistas en proyectos de investigación, es crucial adherirse a principios éticos fundamentales para garantizar la integridad y el respeto hacia los participantes, esto incluye obtener el consentimiento informado de los participantes, asegurando la confidencialidad y el anonimato de la información recopilada, protegiendo el bienestar emocional y psicológico de los participantes, respetando las diferencias culturales y sociales, evitando cualquier forma de sesgo o manipulación en las preguntas y respuestas, utilizando la información únicamente para los fines acordados, obteniendo la supervisión ética de un comité especializado, expresando agradecimiento y reconocimiento a los participantes, y revisando y actualizando continuamente los estándares éticos, todo este proceso se encuentra respaldado por la Ley Estatutaria 1581 de 2012, reglamentada parcialmente por el Decreto Nacional 1377 de 2013, "por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales", que establece las normas y regulaciones para garantizar la privacidad y seguridad de la información personal de los participantes en investigaciones, reforzando así la integridad y legalidad de todo el proceso de investigación.

15. Resultados

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos específicos.

15.1. Comparar la eficiencia de diferentes técnicas de desalinización, con el propósito de determinar la alternativa que logré el mayor grado de desalinización y producción de agua potable.

A partir de la recolección de información en bases de datos de Science Direct, ProQuest y Google Académico, haciendo uso de los términos de la tabla 5 se obtuvieron diferentes resultados acerca de las múltiples técnicas de desalinización utilizadas en el mundo, entre los cuales destacan la ósmosis inversa y directa.

Al realizar las diferentes lecturas rápidas de cada uno de los documentos, fue posible seleccionar los más relevantes para definir las técnicas de desalinización que pueden ser acopladas o ya han sido usadas en CDM. De esta manera, se consiguió elegir 7 documentos que cumplieran con los criterios de búsqueda para el diligenciamiento de la matriz de síntesis de información (ver matriz completa en el anexo 5). En la siguiente tabla se observan los resultados significativos de la revisión bibliográfica.

Tabla 9. Matriz de síntesis de técnicas de desalinización.

Título	Año	Técnica de desalinización	Tiempo que requiere para desalinizar	Capacidad	Porcentaje de eficiencia	Costo (COP/m3)
Determinación de la viabilidad de un modelo de desalinización de agua de mar acoplado a una Celda Microbiana de Desalinización para comunidades vulnerables en Riohacha Guajira	2021	Ósmosis inversa	Día	22199,773 m3/día	97,577	8.439
Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments	2006	Ósmosis inversa	Hora / Día	8 - 16 L/h	94% - 96%	
Low-capacity Reverse Osmosis Solar Desalination Plant	2014	Ósmosis inversa	Día	1,6 m3/día	99,4%	
Reverse osmosis for desalination of water from the Guarani Aquifer System to produce drinking water in southern Brazil	2014	Ósmosis inversa	Hora	100 L	97,0%	
Enhancing desalination and wastewater treatment by coupling microbial desalination cells with forward osmosis	2015	Ósmosis directa	Día	105 L	94,0 %	8.439
Determinación de la viabilidad de un modelo de desalinización de agua de mar acoplado a una Celda Microbiana de Desalinización para comunidades vulnerables en Riohacha Guajira	2021	Destilación flash multietapa	Día	36292,882 m3/día	93,76%	16.878
A high-performance photo-microbial desalination cell	2016	Fotomicrobiana	Hora	10 ml en la cámara de desalinización	96%	25.317
Application of polypyrrole modified cathode in bio-electro-Fenton coupled with microbial desalination cell (MDC) for enhanced degradation of methylene blue	2018	Bio-electro-Fenton	Día	2 L	64,98 %	25.317

Fuente. Elaboración propia.

Como es posible observar en la tabla anterior, de los 7 documentos analizados, uno de ellos se repite, esto debido a que este es trabajo de grado realizado por Daniel Fernando Daza González y Laura Alejandra Rodríguez Mancipe (2021) es el inicio de la investigación de posibilidad de aplicación de CDM en La Guajira.

Las técnicas de desalinización expuestas en la tabla 9 han sido usadas en diferentes Celdas de Desalinización Microbiana alrededor del mundo. La ósmosis inversa resalta en dicha matriz debido a que esta técnica de remoción de sal en el agua es la más usada en el mundo, resaltando América Latina, debido a su alta efectividad y bajo costo. Por otro lado, la ósmosis directa también es una buena opción para el uso de esta en la CDM, ya que su costo es bajo y su eficiencia es alta, sin embargo, al no obtener más literatura acerca de esta, no fue posible compararla con diferentes capacidades (volumen) en el tratamiento de agua, como fue realizado con la ósmosis inversa. Aunque las demás técnicas expuestas, tienen un porcentaje de eficiencia en desalinización mayor al 60%, su costo es elevado, por lo que se dificulta la implementación de cualquiera de estas en la CDM.

Para complementar este análisis que se extrajo de la matriz de recopilación de técnicas de desalinización, se realizó un cuadro comparativo (tabla 10) con el fin de seleccionar la mejor alternativa para la implementación de esta en la zona rural de Riohacha; con esta herramienta se tuvo en cuenta aspectos sociales y económicos de la población muestra, ya que son ellos los que más adelante evaluarán si con las condiciones que les ofrecemos la tecnología es viable para su posible implementación en el futuro.

Tabla 10. Comparación de implementación de técnicas de desalinización.

Técnica de desalinización	Capacidad	Tiempo de tratamiento	Costo	Eficiencia de remoción de sal	Puntaje total
Ósmosis inversa	25	20	15	25	210
Ósmosis directa	15	20	15	25	170
Destilación flash multietapa	25	20	20	25	205
Fotomicrobiana	15	15	25	25	195
Bio-electro-Fenton	15	15	25	20	180

Fuente. Elaboración propia.

El cuadro comparativo de técnicas de desalinización permitió la elección de una de estas para su uso en el diseño de la CDM. Como se presenta en dicha tabla, se evidencia que la ósmosis inversa tiene mayor puntaje total, lo que quiere decir que, al evaluar las diferentes categorías de gran relevancia para el diseño de la CDM, esta técnica de remoción de sal es la más efectiva para la tecnología y la zona en la que se va a usar. Por otro lado, como segunda opción se encuentra la ósmosis directa, pero debido a su capacidad, tiempo de tratamiento y eficiencia de remoción de sal, esta técnica es menos indicada para su uso en zonas rurales de Riohacha que tienen recursos sociales y económicos de difícil acceso.

A pesar de que la destilación flash multietapa no se encuentra en el primer puesto, esta podría llegar a ser una buena alternativa, ya que todos los criterios de evaluación, exceptuando el costo, tienen un puntaje sobresaliente.

15.2. Evaluar los criterios económicos, sociales y ambientales de la tecnología de CDM valorada a fin de conocer su viabilidad en las comunidades rurales del municipio de Riohacha.

Al considerar el enfoque fenomenológico y el método de muestreo a conveniencia en las entrevistas realizadas en la región de La Guajira sobre la problemática del agua, es evidente cómo las experiencias individuales y subjetivas de las personas son cruciales para entender la complejidad de este problema.

Este enfoque, en cuanto a las entrevistas, se centró en comprender la vivencia personal de cada individuo en relación con el acceso al agua potable, cada entrevistado proporcionó una visión única y detallada de sus experiencias, destacando las luchas diarias, los desafíos y las preocupaciones que enfrentan en relación con el agua, desde la preocupación por la calidad del agua hasta las estrategias de supervivencia, estas experiencias revelan una riqueza de detalles sobre cómo las personas viven y se adaptan en medio de una crisis de acceso al agua.

El método de muestreo a conveniencia también añade una capa de profundidad a estas experiencias, a través de la selección específica de personas para entrevistar, se pudo capturar una gama diversa de perspectivas y situaciones. Desde estudiantes de ingeniería ambiental hasta residentes locales y miembros de comunidades indígenas, cada entrevistado aportó un contexto único y valioso a la discusión.

Este enfoque permitió explorar las diferentes dimensiones del problema del agua en la región, desde la contaminación de fuentes hasta las soluciones tecnológicas propuestas, al adoptar el

enfoque fenomenológico y el método de muestreo a conveniencia, se pudo profundizar en las experiencias subjetivas de las personas y capturar sus narrativas de manera auténtica. Esto no solo enriquece nuestra comprensión de la problemática del agua en La Guajira, sino que también destaca la necesidad de soluciones personalizadas y culturalmente sensibles para abordar este desafío, las personas y las experiencias individuales se vuelven esenciales para informar políticas y proyectos que sean verdaderamente efectivos y que respeten la dignidad y la diversidad de las personas afectadas.

El reconocimiento de la saturación de la muestra en el estudio es un aspecto fundamental en la metodología de investigación cualitativa, la saturación indica que, a medida que se llevan a cabo más entrevistas, la información nueva y significativa comienza a disminuir, esta observación sugiere que el investigador ha explorado las experiencias y perspectivas de los participantes de manera lo suficientemente profunda como para capturar los patrones y temas clave relacionados con el problema de estudio.

En el contexto de las entrevistas sobre la problemática del agua en La Guajira, este fenómeno indica que las experiencias individuales y las percepciones en relación con el acceso al agua potable se han examinado a fondo en las entrevistas realizadas (Ortiz, G, 2015). La limitación de no poder hablar específicamente con personas dentro de una comunidad rural, aunque sea justificada por las dificultades logísticas en el proceso de investigación, es un factor importante a considerar, la falta de representación directa de las personas de las comunidades rurales podría influir en la comprensión completa de los desafíos y necesidades específicas que enfrentan estas comunidades en particular.

Las áreas rurales a menudo experimentan problemas únicos en términos de infraestructura, acceso y recursos, y estas personas son cruciales para una comprensión completa del problema del agua en La Guajira, a pesar de esta limitación, el estudio proporciona una visión valiosa y detallada de las experiencias de diversas personas aunque la mayoría no directamente de comunidades rurales, ofrecen una gama diversa de perspectivas que son esenciales para comprender la problemática del agua en la región, además, la saturación de la muestra indica que se han explorado en profundidad las experiencias de los entrevistados alcanzados, lo que proporciona una comprensión rica y completa de los desafíos relacionados con el acceso al agua potable en La Guajira.

Para futuras investigaciones, podría ser beneficioso explorar estrategias adicionales para alcanzar a personas específicamente dentro de comunidades rurales, tal vez a través de la colaboración con organizaciones locales o líderes comunitarios que puedan facilitar el acceso a estas personas, esto ayudaría a abordar la limitación identificada y proporcionaría una imagen aún más completa y detallada de la situación del agua en las áreas rurales de La Guajira.

El proceso de análisis de datos que describiste se llevó a cabo de manera colaborativa y manual, implicando la participación activa de dos personas como codificadores, es relevante considerar las características de estos codificadores para entender los posibles sesgos que podrían haber influido en el proceso de codificación y en la interpretación de los datos, uno de los codificadores propuso inicialmente un árbol de códigos, mientras que el segundo codificador realizó modificaciones, este enfoque colaborativo es valioso, ya que permite la revisión constante del análisis para asegurar la validez y la fiabilidad de los resultados, además, la necesidad de llegar a un acuerdo sobre el árbol de códigos final indica un proceso de negociación y consenso que ayuda a evitar sesgos individuales y a garantizar una representación precisa de los datos. Es

importante tener en cuenta que el análisis se realizó utilizando una metodología de codificación axial, donde se crearon categorías y subcategorías para organizar y estructurar la información recopilada, este enfoque sistemático facilita la comprensión y la interpretación detallada de los datos cualitativos, permitiendo la identificación de patrones y temas clave en las respuestas de los participantes.

Es notable que no se utilizó ningún software de análisis cualitativo específico en este estudio, aunque los softwares especializados pueden facilitar el proceso de codificación y análisis, el enfoque manual empleado demuestra una cuidadosa consideración y reflexión por parte de los codificadores. La falta de software específico no parece haber afectado negativamente la calidad del análisis, ya que se llegó a un acuerdo sobre el árbol de códigos final y se utilizaron categorías y subcategorías definidas para clasificar la información de manera estructurada.

Para una revisión completa del análisis, sería beneficioso consultar los anexos mencionados, que contienen el cuadro detallado de las categorías y subcategorías definidas. Este recurso proporcionará una visión clara y transparente del proceso de codificación y de cómo se estructuraron los datos cualitativos recopilados en el estudio.

Cuatro entrevistas fueron llevadas a cabo para proporcionar un contexto integral sobre la viabilidad de la tecnología de Celda de Desalinización Microbiana (CDM) en las comunidades rurales de Riohacha, situadas en el departamento de La Guajira. Una de estas entrevistas se realizó con un grupo focal, el cual incluyó individuos provenientes de esta región y residentes en Riohacha y comunidades Wayú, con el propósito de evaluar criterios económicos, sociales, ambientales y culturales relacionados con la implementación de la tecnología CDM. La diversidad de participantes, incluyendo ingenieros ambientales, estudiantes, profesionales del área de salud y miembros de la comunidad en general, permitió obtener una perspectiva multifacética de la situación evitando que la muestra sea saturada.

La cantidad de entrevistas fue limitada para evitar la saturación de datos y se eligió específicamente a participantes con experiencia y conocimiento local para ofrecer una visión más clara y detallada de los problemas existentes en la región.

Estas interacciones proporcionan información valiosa para evaluar la viabilidad y aplicabilidad práctica de la tecnología CDM, sirviendo como contexto específico para el diseño del proyecto y contribuyendo a una comprensión más profunda de su potencial beneficio en las comunidades de Riohacha. A continuación, se presenta un resumen conciso de cada entrevista, destacando los factores clave y relevantes para el proyecto (las transcripciones completas de las entrevistas realizadas se presentan en los anexos con su respectiva caracterización y análisis cualitativo).

A continuación se puede evidenciar información general de los entrevistados.

Tabla 11. Información general de los entrevistados.

Código	Género	Ocupación / Características que influyeron en la elección de las personas	Lugar de origen	Lugar de residencia	Promedio de edad
1	Femenino	Estudiante e indígena Wayúu	Riohacha	Riohacha	19-23
2	Femenino	Estudiante y trabajadora en deportes náuticos	Mayapo	Riohacha	19-23
3	Femenino	Esudiante e indígena Wayúu	Riohacha	Riohacha	21
4	Masculino	Estudiante	Riohacha	Riohacha	19-23
5	Femenino	Estudiante	Riohacha	Riohacha	19-23
6	Masculino	Estudiante	Riohacha	Riohacha	19-23
7	Masculino	Radiólogo	San Juan Del César	Riohacha	30-35
8	Masculino	Ingeniero Ambiental	San Juan Del César	San Juan Del César / Riohacha	45-50

Fuente. Elaboración propia.

15.2.1) Calidad del agua y tratamiento insuficiente, desafíos de las comunidades indígenas

El análisis revela una situación alarmante en cuanto al acceso al agua potable en las comunidades rurales de Riohacha y La Guajira. Las entrevistas resaltan la mala calidad del agua, proveniente principalmente del río Ranchería y de pozos locales, que se contamina debido a la explotación de carbón en la región. Los testimonios subrayan cómo las condiciones socioeconómicas y climáticas han llevado a que las personas almacenen agua en albercas subterráneas y jagüeyes, enfrentando problemas de acceso intermitente y contaminación. Es evidente que las comunidades indígenas son las más afectadas, dependiendo de fuentes inseguras y, a menudo, salobres.

La falta de acceso regular al agua potable ha resultado en desafíos de salud significativos y ha contribuido a la desnutrición e infecciones, especialmente en niños. Este análisis pone la urgencia de intervenir para mejorar la calidad y el suministro del agua, así como la necesidad de soluciones de tratamiento adecuadas para abordar la contaminación y garantizar el acceso a agua segura para todas las comunidades.

El estudiante de la Universidad de la Guajira hace “un estimado de alrededor de 150 - 200 personas por cada comunidad que reside en esta zona” Estudiante de la Universidad de la Guajira (2023), asegurando que hay demasiadas comunidades con difícil acceso al agua potable desde su perspectiva, ya que tuvo que mudarse a un tipo de pensiones en donde residen alrededor de 12 personas por hogar ya que cuentan con mejores condiciones y comodidades con respecto al recurso hídrico, sin embargo asegura que vivió en otras áreas de Riohacha y asegura el suministro es aún más limitado teniendo acceso de agua potable de 2 a 3 veces a la semana; el estudiante “calcula que utiliza aproximadamente cinco litros de agua al día debido al clima cálido y desértico de la región” Estudiante Universidad de la Guajira. (2023), “En el área del centro de Riohacha, el agua del acueducto llega seis veces a la semana, específicamente los jueves por la mañana y los viernes por la noche. Sin embargo, en otras zonas de Riohacha, el agua llega solo una vez a la semana ya, por lo menos, las zonas rurales, ya allá no llega nada

de aguas por el acueducto, lo que obliga a las personas a almacenar agua en albercas subterráneas para cubrir sus necesidades básicas” Estudiante de la Universidad de la Guajira. (2023), por lo que las personas se ven obligadas a comprar agua embotellada para cocinar y beber.

El profesional de la salud hizo hincapié en la fuente de agua del río Ranchería como proveedora de agua potable en el barrio Che Guevara de Riohacha, sin embargo, surgieron preocupaciones significativas en torno a la contaminación del agua y su impacto en la salud pública, resaltando la necesidad de soluciones efectivas y sostenibles para abordar esta problemática debido a que: *“actualmente los desafíos que hay con el agua potable es que les hago, cómo la visión para que vean el panorama de Riohacha actualmente, el agua que llega a Riohacha, llega del río Ranchería y el río Ranchería hace un trayecto bastante largo por toda la Guajira, pero qué pasa, es que en la Guajira hay un pueblo que se llama Albania, donde está el cerrejón, la mina de carbón, el agua de Albania es malísima, yo siempre lo he tenido claro, el agua en Albania es mala y esa es la misma agua que va a dar a Riohacha”* Profesional de la salud (2023), *“el agua la traen los acueductos para el consumo humano pero muchas personas la mueven para otras actividades, para cultivos y otras actividades por ejemplo hacen criaderos de cerdo, en galpones y el agua también empieza como que a ensuciarse, pero si llega el agua pero con mucha carga, ya se escasea un poco por las actividades que la pongan”* Ingeniero ambiental (2023).

Los participantes del grupo focal han compartido información crucial sobre el acceso al agua potable en la región principalmente en comunidades indígenas *“En las comunidades ustedes saben que utilizamos los molinos, entonces abrimos la llave y empieza a salir el agua, ahí llevamos la garrafa y sale una cantidad de agua, no es mucho pero si llega, lo que hacemos es qué hacemos varios huequitos en la comunidad, unos para almacenar agua en forma de jagüeyes y otros pozos para que los animales beban de esa agua, ósea nosotros los Wayúu no desperdiciamos el agua porque para nosotros el agua es muy importante, en algunas usan los molinos para que pueda llegar el agua mejor y a veces pueda llegar más limpia, pero nosotros no tenemos agua como tal pero nos toca hacer eso y cuando no está llegando nos toca pedir carrotanques”* Estudiante Universidad de la Guajira (2023), destacando las deficiencias en el sistema de tratamiento de agua y los desafíos que enfrentan las comunidades rurales en términos de acceso intermitente, contaminación del agua y disponibilidad limitada, *“cuando hablamos de los jagueyes, vea aquí es muy difícil ya que no llueve, en la alta los jagueyes tienen contaminada el agua, allá se mueren personas en las comunidades por falta de agua, por desnutrición, el agua no les llega, hablando de la zona media de la media Guajira, acá en su zona baja de Riohacha, están los pozos, de Riohacha para abajo conseguimos ríos y ya la cosa cambia, la cosa es de Riohacha así arriba, de Maicao para allá, ya la cosa es un poco mayor, y hay más riesgo entonces en esta zona de Riohacha y sus alrededores, pueden haber muchos pozos o pueden haber muchísimos jagueyes pero dentro de esos jagueyes los efectos antrópicos que ella explicaba vendrían siendo de que los animales toman de esas aguas; muchos de los animales ensucian esas aguas a sus alrededores, los niños o las personas agarran esa aguas también como balneario y se bañan, entonces esos aspectos, o también por escorrentía, las lluvias, todos estos aspectos como los estiércoles de los animales consensuan dentro de los jagueyes, provocando así que el agua no esté apta para el consumo y sea como para otras actividades como recreativas”,* Estudiante Universidad de la Guajira (2023).

15.2.2) *Desafíos en el diseño y la implementación: Subcategoría Sostenibilidad, mantenimiento de la infraestructura, financiamiento, recursos limitados, necesidad de capacitación y educación.*

La segunda categoría destaca los desafíos en el diseño y la implementación de soluciones efectivas para mejorar el acceso al agua potable. La sostenibilidad y el mantenimiento de la infraestructura, junto con la obtención de financiamiento y recursos limitados, son preocupaciones clave, además, se menciona la necesidad crítica de capacitación y educación para las comunidades, subrayando la importancia de la colaboración con organizaciones gubernamentales y no gubernamentales para garantizar el éxito a largo plazo de los proyectos.

Las entrevistas revelan que las comunidades rurales, especialmente las indígenas, han sido desatendidas en términos de acceso adecuado al agua potable, y que se requiere una inversión significativa en infraestructura y educación para superar estos desafíos.

La falta de acceso regular al agua potable ha tenido un impacto negativo en la salud y el bienestar de las personas, enfatizando la necesidad apremiante de abordar estos problemas de manera integral y sostenible. el estudiante de la Universidad de la Guajira desde su experiencia, *“la mayoría de las casas cuentan con albercas subterráneas para almacenar agua, y en áreas rurales, dependen de pozos, compran agua o la recolectan durante la temporada de lluvias las cuales no cuentan con condiciones óptimas para el consumo humano en su mayoría”*.

El estudiante expresó que la implementación de la tecnología de CDM en comunidades rurales, particularmente en la Alta Guajira, sería beneficiosa para mitigar la escasez de agua potable. El profesional de la salud ve con buenos ojos la idea de utilizar microorganismos para convertir agua salobre en agua potable y cree que es posible implementar esta tecnología en su comunidad. El profesional de la salud menciona la presencia de un parque eólico en la Guajira, sugiriendo que la energía eólica podría ser una fuente sostenible para alimentar el proceso de desalinización. En cuanto a la viabilidad del proyecto, considera que al menos de quince mil a veinte mil personas podrían beneficiarse de esta tecnología, principalmente en la zona rural, a pesar de su entusiasmo en donde menciona *“la capacitación de la comunidad es vital para el éxito del proyecto, y creo que las comunidades indígenas están dispuestas a aprender sobre estas tecnologías para mejorar sus condiciones de vida”*. El profesional de la salud (2023).

El ingeniero hizo hincapié en la necesidad de preservar el recurso y educar a la población al respecto debido a la creciente escasez de agua en la región, el entrevistado también se refirió a la falta de acceso al agua potable en comunidades indígenas y cómo la implementación de tecnologías como la desalinización microbiana podría ser una solución crucial para estas áreas debido a que este tipo de poblaciones suplen el acceso a agua potable de Pozos y de Jagüeyes, en donde afirma que esta agua sale contaminada y en la mayoría de casos salobre *“había tenido entendido que es buenísimo para acá para sobre todo, para acá para la zona de Riohacha porque aquí por ejemplo las comunidades indígenas sufren mucho por falta de agua falta de agua, muchos se abastecen de los jagüeyes, cuando llueve. Esos jagüeyes se llenan de agua, ahí mismo”* Ingeniero ambiental (2023), en este contexto, destacó la importancia de proyectos como la desalinización microbiana, que podría transformar agua de mar en agua potable. el ingeniero mostró un interés positivo hacia esta tecnología y consideró que sería beneficiosa para las comunidades rurales de la región, especialmente para las comunidades indígenas y áreas remotas que sufren la escasez de agua potable, destacó la necesidad de una educación ambiental adecuada para que la comunidad comprenda y acepte esta tecnología como una alternativa viable, además,

enfaticó la importancia del apoyo de entidades gubernamentales, ONG y otras organizaciones para garantizar la implementación sostenible de estos proyectos a largo plazo.

Por otro lado los estudiantes consideran que esta tecnología podría ser una solución innovadora y beneficiosa para las comunidades rurales de la región, especialmente aquellas que enfrentan problemas de acceso al agua potable debido a la salinidad del agua en pozos y jagüeyes, *“Yo soy Wayúu y mi comunidad no tiene acceso a agua potable, el agua que consumimos es de un molino y esa agua es agua salobre y también utilizamos pozo pero también super salobre y también tenemos un jagüey y algunas personas utilizan esa agua para el consumo pero ósea no es un agua que se pueda tomar pero pues como no tienen más entonces les toca tomarla y lo que utilizan son molinos que conectan a paneles solares y tiene un pequeño proceso que les purifique el agua pero pues no son todas la comunidades.”* Estudiante Universidad de la Guajira (2023).

En cuanto a la viabilidad del proyecto, los participantes expresaron su interés en conocer más acerca del diseño y si se logrará desarrollar un prototipo funcional en el futuro *“creo que acá en Guajira, que sería realmente innovador, dado que, este, por eso, por ejemplo, en la zona alta, de la zona la alta Guajira, lo que tenemos que es mar. Entonces, es una buena propuesta realmente”* Estudiante Universidad de la Guajira (2023). Para la tercera categorización se tomaron ítems sobre algunos desafíos identificados

15.2.3) Confianza y promesas incumplidas: Subcategorías Confianza y promesas incumplidas, negligencia gubernamental y corrupción

La tercera categoría resalta la pérdida de confianza de las comunidades debido a promesas incumplidas y prácticas gubernamentales negligentes y corruptas. La falta de transparencia en la distribución del agua tratada ha llevado a la desconfianza de las personas, especialmente en comunidades indígenas, que han sido testigos de proyectos fallidos en el pasado. Además, la politización del acceso al agua potable ha creado divisiones y desigualdades dentro de las comunidades.

Las entrevistas subrayan la necesidad de mantener la transparencia en todas las etapas del proceso y de evitar la politización del acceso al agua potable. Además, se destaca la importancia de la colaboración continua con las comunidades y las autoridades locales para garantizar el éxito a largo plazo del proyecto.

El estudiante de la Universidad de la Guajira señaló desafíos significativos, como la falta de mantenimiento y el choque cultural. También mencionó *“Bueno, como le digo, aquí bastantes fundaciones, y la mayoría de ellas, por no decir todas, cuentan con personal Wayuu, o sea, que hablé el idioma, o sea, gente de acá, que ellos se sientan, por lo menos, en confianza porque, por lo menos, si vendrían ejemplo, ustedes de allá, esté, personas del interior, ellos vendrían, lo verían como quien dice algo incómodo”*. Estudiante Universidad de la Guajira. (2023).

Por otra parte el profesional de la salud destaca la importancia de la transparencia y la equidad en la distribución del agua tratada, evitando cualquier forma de discriminación. El ingeniero explicó que los esfuerzos para llevar agua a estas comunidades han sido insuficientes y cómo la falta de acceso al agua potable afecta negativamente a los niños y contribuye a altas tasas de desnutrición e infecciones, ya que menciona que los problemas en estas áreas se da debido a que las comunidades tienen como alimentarse ya que cultivan sus alimentos pero las condiciones del

agua hacen que se generen enfermedades, provocando en algunos casos la muerte de dicha población.

Los estudiantes también destacaron varios desafíos potenciales para la implementación de esta tecnología en las comunidades rurales; uno de los desafíos principales es la necesidad de obtener el consentimiento y la cooperación de las comunidades, especialmente en el contexto de promesas incumplidas en proyectos anteriores, además, se señaló la importancia de abordar la equidad en la distribución del agua y garantizar que todas las familias tengan acceso adecuado al recurso siendo este equitativo *“en el ámbito de las comunidades indígenas, hemos estado escuchando a través de varios conversatorios establecidos por la universidad en donde, prácticamente, la mayoría de las comunidades indígenas, el agua que consumen es, este, salobre, dado que los pozos de donde se saca esta agua están prácticamente al mismo nivel del mar, entonces, el agua de mar se pasa por los pozos y, por ende, la mayoría de las comunidades indígenas prácticamente consumen aguas que no son apta para consumo humano”* Estudiante Universidad de la Guajira (2023).

La colaboración continua con las comunidades y las autoridades locales es esencial para el éxito del proyecto. Las entrevistas proporcionan información valiosa sobre el acceso al agua en las comunidades rurales de Riohacha, destacando la necesidad de soluciones innovadoras y sostenibles para abordar el problema. Las personas se enferman debido al consumo de agua contaminada de pozos, afectando gravemente a las comunidades.

Los participantes plantean preguntas sobre el tratamiento de aguas residuales y expresan interés en la correcta aplicación de la tecnología de desalinización en diferentes contextos. Consideran positiva la propuesta del proyecto y relevante para las comunidades vulnerables, enfocándose en aspectos económicos, sociales y ambientales. La existencia de un parque eólico se menciona como fuente de energía sostenible para la desalinización. También se resalta la importancia de garantizar la potabilidad del agua tratada y evitar la politización del proyecto.

La necesidad apremiante de mejorar el acceso al agua potable en las comunidades rurales se subraya, destacando la urgencia de proyectos sostenibles y equitativos. Las entrevistas recalcan la importancia de soluciones como la desalinización microbiana para mejorar significativamente la calidad de vida en la región, enfatizando la necesidad de educación y apoyo institucional para el éxito de estos proyectos.

Teniendo en cuenta toda la información administrada por la población local, se llegó a varias conclusiones en donde primero para tener en cuenta el agua siempre ha sido escasa en la alta y media Guajira, una región caracterizada por paisajes áridos y desérticos, aunque existen más de 1.200 pozos y molinos en el departamento, el 70% de estos se encuentran con deficiencias por falta de mantenimiento (Guzmán Pérez, A, 2019).

Un hallazgo significativo actualmente, es la población de la península ya que adquiere agua (potable o no potable) de pozos, jagüeyes, servicio de acueductos y carrotanques que les suministran el servicio, en donde se extraen principalmente por molinos en donde esta agua no siempre es potable debido a la contaminación por parte de la comunidad y de algunos animales característicos de su cultura ya que contaminan el recurso con sus heces.

Por otro lado el sistema en la mayoría de zonas rurales y la gran mayoría de poblaciones indígenas o rancherías como se hacen llamar, cuentan con un sistema de distribución altamente

intermitente de agua potable, en donde en algunas zonas llega solo dos veces por semana, en otras se tiene gran incertidumbre ya que no se sabe con certeza en que horario o el día en específico en que llega el recurso hídrico a sus hogares, también se conoce que las personas de esta población tienen un consumo diario bajo del recurso hídrico siendo en algunos casos de 5 litros diarios por persona, teniendo en cuenta que los hogares de estas zonas tienen familias nucleares numerosas.

Otro resultado obteniendo es que la población se encuentra totalmente de acuerdo en que se realice este tipo de proyectos en diferentes zonas de la Guajira ya que lo caracterizan como innovador y útil para suplir una necesidad básica que deberían tener todas las personas; teniendo en cuenta que una de las principales problemáticas es la aceptación por parte de la población indígena Wayúu ya que están cansados de promesas y de que no se tome la situación con la importancia que se le debería dar, sin embargo cabe recalcar que este tipo de proyecto podría tener una aceptación un poco mayor respecto a otros debido a que es una problemática que debe ser solucionada lo antes posible.

15.3. Diseñar en un modelo 3D una Celda de Desalinización Microbiana evaluando la viabilidad de aplicación en una comunidad vulnerable del municipio de Riohacha.

El diseño de una Celda de Desalinización Microbiana para comunidades rurales en Riohacha se elaboró en la herramienta SolidWorks, teniendo en cuenta capacidad de tratamiento de agua de 1000 litros al día, representa un avance significativo en el abastecimiento de acceso a agua potable en áreas con recursos limitados.

Esta celda se elabora con dimensiones específicas: 1 metro de ancho, 1 metro de largo y 1 metro de alto, estas son esenciales para albergar todos los componentes necesarios para el proceso de desalinización, el componente central de esta celda son las dos placas de membrana, cada una con dimensiones de 1 metro de ancho, 1 metro de largo y 0.01 metros de alto; este elemento permite que el agua de pozo profundo y el agua dulce fluyan a través de la celda, la tecnología de membranas es esencial para la desalinización, debido a que esta proporciona una barrera selectiva que permite el paso de las moléculas de agua mientras retiene las sales y otras impurezas, produciendo agua potable para la comunidad rural de La Guajira y se fundamenta en una evaluación de las necesidades específicas de la población local.

Considerando un consumo promedio de 5 litros de agua por persona, se estima un requerimiento diario de 1000 litros/día para satisfacer las necesidades básicas de los 200 habitantes de la comunidad. Esta estimación se ha elaborado teniendo en cuenta los patrones de consumo humano recopilados de las entrevistas y adaptándose a las condiciones particulares de la comunidad, asegurando así que el diseño de la CDM sea totalmente adecuado para abastecer las demandas esenciales de agua potable de la población local en La Guajira.

Por otra parte las entrevistas jugaron un papel fundamental en el diseño de la Celda de Desalinización Microbiana (CDM) para la comunidad rural de La Guajira, ya que permitieron establecer un vínculo directo con los habitantes locales y entender a fondo sus necesidades y preocupaciones respecto al acceso al agua potable, a través de las entrevistas, se identificaron las particularidades del entorno, las prácticas locales de consumo de agua y las limitaciones específicas que enfrenta la comunidad, este conocimiento detallado fue esencial para adaptar el diseño de la CDM a las condiciones reales de la zona, asegurando así su eficacia y relevancia.

Además, las entrevistas ofrecieron la oportunidad de incorporar las perspectivas y conocimientos de los residentes locales en el proceso de diseño, los habitantes de la comunidad proporcionaron información valiosa sobre los recursos hídricos disponibles, las prácticas de saneamiento existentes y las soluciones que consideraban viables y culturalmente aceptables.

Esta retroalimentación directa no solo enriqueció el diseño técnico de la CDM, sino que también promovió un sentido de apropiación y participación comunitaria en el proyecto. En última instancia, las entrevistas fueron un puente entre el conocimiento técnico y la realidad cotidiana de la comunidad, permitiendo un enfoque más holístico y colaborativo en el diseño de la Celda para la comunidad rural de La Guajira.

Es importante aclarar que, en Riohacha, la falta de agua potable ha llevado a la dependencia de pozos como fuente primaria de agua, sin embargo, la mayoría de estos pozos se encuentran en zonas cercanas a la costa, donde el nivel freático está influenciado por la intrusión salina. La sobreexplotación de los pozos ha llevado al ascenso del agua salobre hacia capas más superficiales, contaminando así los pozos con agua de mar. Este fenómeno se agrava por la extracción excesiva y la falta de recarga natural, convirtiendo el agua de los pozos en salobre y no apta para el consumo humano. Por lo tanto, se evidencia la importancia de la implementación de una celda de desalinización en estas comunidades para tratar el agua de pozo ya que la comunidad tiene problemas severos mencionados en las entrevistas. Girón, D. (2009).

El sistema de flujo de agua de pozo profundo es otro componente fundamental, este sistema alimenta la celda con agua de pozo profundo que se someterá al proceso de desalinización, la presión y el flujo controlados son necesarios para asegurar que el agua de pozo profundo se distribuya uniformemente sobre las placas de membrana, optimizando así la eficiencia del proceso de desalinización.

Por otro lado, el sistema de flujo de agua dulce recoge el agua desalinizada producida por la celda, esta agua es tratada y vital para las comunidades rurales que luchan por tener acceso a agua potable segura.

Garantizar un sistema eficiente para la recolección y almacenamiento de este recurso es esencial para satisfacer las necesidades diarias de la comunidad, además, se debe implementar un sistema de aireación que proporcione oxígeno a los microorganismos que participan en el proceso de desalinización microbiana. Estos tienen un papel importante en la descomposición de la materia orgánica y la reducción de las sales presentes en el agua de pozo profundo, un suministro adecuado de oxígeno es esencial para mantener activos estos microorganismos y, por ende, garantizar la eficiencia del sistema de desalinización, en términos de simulación y optimización del sistema.

El modelo 3D se utiliza para calcular el flujo de agua a través de la celda y la concentración de sal en el agua dulce producida, esta simulación es esencial para comprender mejor el rendimiento del sistema y realizar ajustes si es necesario. Se pueden realizar pruebas virtuales utilizando el modelo 3D para evaluar diferentes condiciones operativas y encontrar la configuración óptima que garantice una producción de agua potable constante y confiable.

El diseño de esta Celda de Desalinización Microbiana representa una esperanza para las comunidades rurales en Riohacha, al aprovechar tecnologías innovadoras y asegurar una implementación cuidadosa. Además, esta celda tiene el potencial de transformar vidas al

proporcionar acceso a agua potable, segura y confiable. Asimismo, la capacidad de simulación a través del modelo 3D permite una optimización continua, asegurando un suministro de agua sostenible para las generaciones futuras en esta comunidad. Es un paso significativo hacia un futuro donde el acceso al agua potable ya no sea un privilegio, sino un derecho fundamental para todas las personas.

15.3.1) Parámetros para el diseño de la CDM

Para diseñar una CDM capaz de producir 1.000 litros de agua potable al día en una comunidad rural de Riohacha, se deben considerar varios aspectos, incluyendo las dimensiones de la celda, el material de las placas de membrana y los parámetros del proceso. A continuación, se presentan los resultados de los cálculos realizados:

15.3.1.1) Dimensiones de la celda

- Ancho (A) = 1 metro
- Largo (L) = 1 metro
- Alto (h) = 1 metro

Dado que queremos que A sea $1m^2$ y considerando que queremos una celda cuadrada (para simplificar), podemos establecer .

$$\begin{aligned}\text{Área de la base} &= \text{largo} \times \text{ancho} \\ 1m^2 &= 1m \times \text{Ancho} \\ \text{Ancho} &= 1m\end{aligned}$$

Ahora, para la altura , asumiendo que queremos una celda de, simplemente dividimos el volumen total deseado por el área de la base:

$$\text{Alto} = \frac{\text{Volumen Total}}{\text{Área de la base}} = \frac{1000 \text{ Litros}}{10m \times 10m} = 1m$$

Por lo tanto, para lograr una producción diaria de 1000 litros con una celda de desalinización microbiana con ósmosis inversa, las dimensiones pueden ser de 10 metros de largo, 10 metros de ancho y 1 metro de alto. Es importante destacar que estos cálculos son aproximados y pueden requerir ajustes según las condiciones específicas del sistema y los parámetros de diseño detallados.

15.3.1.2) Parámetros del material de la membrana

Permeabilidad (P) = $10\text{-}12 m^2$ este componente se debe tener en cuenta la cantidad de agua que puede pasar a través de las placas de membrana por unidad de tiempo), este coeficiente se toma teniendo en cuenta el material ya que las membranas de poliamida, comúnmente utilizadas en tecnologías de ósmosis inversa, presentan permeabilidades típicas en este rango

Para calcular las dimensiones de la celda de desalinización con tres cámaras, dos de membranas, un sistema de flujo que alimente la celda, un sistema de flujo que recoja el agua desalada y un sistema de aireación, se deben tener en cuenta los parámetros dados y algunas consideraciones adicionales. La ecuación que se puede utilizar para este propósito es la Ley de Fick para la difusión a través de la membrana, que está dada por:

$$q = \frac{re * (C_{inicial} - C_{final})}{l}$$

Donde:

- q es el flujo de agua a través de la membrana (m³/s).
- D es el coeficiente de difusión del soluto en la membrana (m²/s).
- A es el área de la membrana (m²).
- C_{inicial} es la concentración inicial de sal en el agua de salobre (g/L).
- C_{final} es la concentración final de sal en el agua potable (g/L).
- l es el espesor de la membrana (m).

Primero, podemos calcular el flujo de agua a través de la membrana utilizando el flujo de caudal dado:

$$q = 0,0416 \times 10^{-6} m^3/s$$

Para calcular el área de la membrana podemos usar la ecuación del flujo de agua:

$$A = \frac{Q * L}{re * (C_{inicial} - C_{final})}$$

Dado que se conocen los valores de q, C_{inicial} y C_{final}, y se puede asumir un valor para D (considerando que se utiliza una membrana polimérica que tiene un coeficiente de difusión en el rango de 10⁻⁹m²/s, podemos calcular el área de la membrana necesaria para lograr una eficiencia de desalinización del 90%.

Además, para cumplir con las dimensiones especificadas de la celda (1 metro de ancho, 1 metro de largo y 1 metro de alto), se puede determinar el espesor de la membrana (l) que permita alcanzar el área requerida. Es importante considerar que este espesor debe ser realista y factible en términos de fabricación y mantenimiento de la membrana.

Es fundamental tener en cuenta que este cálculo es una aproximación inicial y puede requerir ajustes adicionales durante el diseño detallado de la celda de desalinización, que incluirá consideraciones específicas sobre la geometría de la membrana, el tipo de material y otros factores técnicos.

Para calcular el espesor de la membrana, podemos reorganizar la fórmula del área de la membrana y despejar :

$$A = \frac{(0,0417 \times 10^{-6} m^3/s) * l}{(10^{-9} m^2/s) \times (35 \frac{g}{L} - 10 \frac{g}{L})}$$

$$A = \frac{(0,0417 \times 10^{-6} m^3/s) * l}{\left(\frac{10^{-9} m^2}{s}\right) \times (25 \frac{g}{L})}$$

$$A = \frac{(1,0425 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}) * l}{2,5^{-8} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$A = 4,17 \text{ m}^2 * l$$

$$l = \frac{A}{4,17 \text{ m}^2/\text{m}} = 0,01 \text{ m}$$

Entonces, el espesor de la membrana necesario para las dimensiones de la celda de desalinización especificadas es de 0.01 metros o 10 milímetros. Es importante tener en cuenta que este cálculo se basa en el área de la membrana requerida para el proceso de desalinización y puede variar según el tipo de material de la membrana y las especificaciones técnicas del sistema.

15.3.1.3) *Parámetros del proceso*

- Temperatura del Agua (T) = 25 °C
- Concentración de sal en el agua o fuentes salobres (Cinicial) = 35 g/L
- Flujo del agua (Q) = $0.0417 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
- Eficiencia de desalinización (η) = 90% (considerando pérdidas por diversos factores como concentración de microorganismos, resistencia eléctrica, etc.)
- Concentración final de sal en el agua potable (Cfinal) $\leq$ 10g/L (cumpliendo con los estándares de la OMS para agua potable)

El agua salobre es común en muchas regiones costeras y puede encontrarse en acuíferos subterráneos, estuarios y algunas fuentes de agua superficial en áreas cercanas al mar, aunque no es apta para el consumo humano, la desalinización microbiana ofrece una solución para convertirla en agua dulce utilizable. Este proceso implica el uso de microorganismos para eliminar las sales del agua, proporcionando así una fuente segura y sostenible de agua potable a partir de una celda con membranas de ósmosis inversa para las comunidades rurales de La Guajira.

El límite de 35 gramos por litro (g/L) para el agua salobre es un estándar reconocido en las regulaciones internacionales para clasificar diferentes tipos de agua en función de su salinidad. Este límite se basa en la definición de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para agua salobre.

El agua dulce generalmente tiene una concentración de sal inferior a 1 g/L, mientras que el agua salobre tiene una concentración de sal de aproximadamente 35 g/L en promedio. Por lo tanto, el agua salobre se define como agua que tiene una concentración de sal superior a la del agua dulce pero inferior a la del agua de mar. La cifra exacta de 35 g/L se considera el punto de transición entre el agua salobre y el agua de mar. Este estándar es importante en contextos como la desalinización y la potabilización del agua, ya que el tratamiento del agua salobre es diferente al del agua dulce debido a su mayor contenido de sales, superar este límite implica que el agua se clasifica como agua de salobre, lo que tiene implicaciones en términos de los procesos y tecnologías que se deben utilizar para hacerla segura y apta para el consumo humano.

15.3.1.4) Parámetros del proceso electroquímico

- Eficiencia electroquímica (# eq) = 80% (considerando pérdidas durante la conversión de energía química a eléctrica)

15.3.1.5) Datos clave para el diseño de la CDM

- Área de la membrana (A_m): 1 m^2

- Volumen de agua tratada por día (V): $41,67 \times 10^{-6}\text{ m}^3$

$$v = \frac{Q}{A_m} = \frac{0,0417\text{ m}^3/\text{s}}{1\text{ m}^2} = 0,0417\text{ m/s}$$

- Velocidad del agua a través de la Membrana (v): $0,0417\text{ m/s}$

- Cantidad de sal removida (m): $3,5\text{ g/L}$

Con los valores proporcionados, podemos usar la ecuación del flujo volumétrico para encontrar el diámetro (D) del tubo. La ecuación es:

$$Q = A \times V$$

Donde:

Q es el flujo volumétrico $0.0416 \times 10^{-16}\text{ m}^3/\text{s}$

A es el área de la sección transversal del tubo

V es la velocidad del flujo $41,67 \times 10^{-6}\text{ m}^3/\text{s}$

El área (A) se puede expresar en términos del radio (r) o del diámetro del tubo:

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación del flujo volumétrico, obtenemos:

$$Q = \frac{\pi \times D^2}{4} \times v$$

Podemos despejar

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times v}}$$

Sustituyendo los valores proporcionados:

$$D = \sqrt{\frac{4(0.0416 \times 10^{-6}\text{ m}^3/\text{s})}{\pi(41.67 \times 10^{-6}\text{ m}^3/\text{s})}} = 0.50$$

El fundamento teórico de las fórmulas utilizadas para calcular el diámetro del sistema de flujo se basa en principios de hidrodinámica y la ecuación de continuidad. A continuación, se proporciona una explicación más detallada:

Este enfoque se basa en la conservación de la masa y la relación entre el flujo, el área y la velocidad del flujo en un sistema de tuberías. Estas fórmulas son fundamentales en la mecánica de fluidos y se aplican en el diseño y análisis de sistemas de tuberías y conductos

Las ecuaciones derivadas de estos principios teóricos se utilizan para determinar el diámetro del sistema de flujo en función de la velocidad y el flujo volumétrico, considerando la eficiencia del proceso. La importancia de estas fórmulas radica en su capacidad para guiar el diseño de la celda, asegurando un rendimiento óptimo al equilibrar la eficiencia del flujo con la calidad del agua producida. Además, permiten entender y controlar los procesos de transporte de masas y fluidos, fundamentales para el éxito y la sostenibilidad de la celda de desalinización.

15.3.1.4.1) Concentración de sal en el agua dulce (c final) según la Ley de Conservación de Masa:

La concentración de sal en el agua de pozo profundo es típicamente de aproximadamente 35 gramos por litro (g/L). Entonces, para 1000 litros/día de agua de pozos profundos se obtuvo que la concentración de sal en el agua potable es de 3,5 g/L, lo que quiere decir que se cumple con los estándares de salinidad admisible en el agua según la OMS.

$$\begin{aligned}C_{inicial} * Q_{inicial} &= C_{final} * Q_{final} \\ 35 \frac{g}{L} * 10 \frac{L}{min} &= C_{final} * 10 L/min \\ C_{final} &= 3,5 g/L\end{aligned}$$

La eficiencia de desalinización es la fracción del agua salobre que se convierte en agua potable, es decir, el porcentaje del agua salobre que se desecha. Para esta investigación se consideró una eficiencia del 90% aproximadamente, lo que significa que el 4-6% del agua de pozo se rechaza como agua salina concentrada.

En Colombia, la normativa y la preocupación de la comunidad acerca de la baja calidad del agua relacionada con los estándares de calidad del agua potable es establecida por el Ministerio de Salud y Protección Social y se rige por la Resolución 2115 de 2007. Según esta resolución, los estándares para el agua potable en Colombia son los siguientes:

1. Conductividad eléctrica: Menos de 1500 microsiemens por centímetro ($\mu S/cm$) a 25 °C.
2. Sodio: Menos de 200 miligramos por litro (mg/L).
3. Cloruros: Menos de 250 mg/L.
4. Calcio: Menos de 200 mg/L.
5. Magnesio: Menos de 150 mg/L.
6. Sulfatos: Menos de 400 mg/L.
7. Nitratos: Menos de 10 mg/L.

8. Metales pesados: Concentraciones específicas para metales como plomo, arsénico, cadmio, cromo, mercurio y otros.
9. Coliformes totales: Ausencia en 100 mililitros.
10. *Escherichia coli*: Ausencia en 100 mililitros.

La Resolución 330 de 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia establece el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, este reglamento técnico tiene como objetivo establecer las condiciones y requisitos mínimos de calidad para garantizar la seguridad y potabilidad del agua para consumo humano en Colombia, el reglamento se aplica tanto a las entidades responsables del abastecimiento de agua como a los prestadores del servicio de saneamiento básico, el reglamento establece los parámetros de calidad del agua potable, los métodos de análisis, los valores límite permisibles y las frecuencias de muestreo y análisis. Incluye parámetros como microbiológicos, físicos, químicos y organolépticos para asegurar la calidad del agua para consumo humano. A continuación algunos parámetros que podemos encontrar en el RAS:

1. Calidad del agua potable: Establece los estándares y criterios para garantizar la calidad del agua que se suministra a la población. Define los parámetros físicos, químicos y microbiológicos que el agua potable debe cumplir para ser considerada segura para el consumo humano.
2. Sistemas de tratamiento de agua potable: Especifica los requisitos para el diseño, construcción y operación de plantas de tratamiento de agua potable. Incluye pautas para la desinfección, filtración y otros procesos necesarios para purificar el agua.
3. Distribución de agua: Establece normas para la infraestructura de distribución de agua, incluyendo tuberías, tanques de almacenamiento y redes de distribución.
4. Manejo de aguas residuales: Define los estándares para la recolección, tratamiento y disposición final de aguas residuales. Incluye pautas para sistemas de alcantarillado, plantas de tratamiento de aguas residuales y sistemas de disposición segura.
5. Saneamiento básico: Cubre aspectos relacionados con el saneamiento ambiental, incluyendo la disposición adecuada de residuos sólidos y la promoción de prácticas higiénicas.
6. Vigilancia y control: Establece los procedimientos para la vigilancia, monitoreo y control de la calidad del agua potable y el saneamiento básico.

El cumplimiento de este reglamento es fundamental para garantizar la salud pública y el bienestar de la población, ya que asegura que el agua que se consume sea segura y que los desechos sean tratados de manera adecuada para prevenir la contaminación ambiental y proteger la salud de las comunidades.

15.3.2) Planos 2D de la CDM

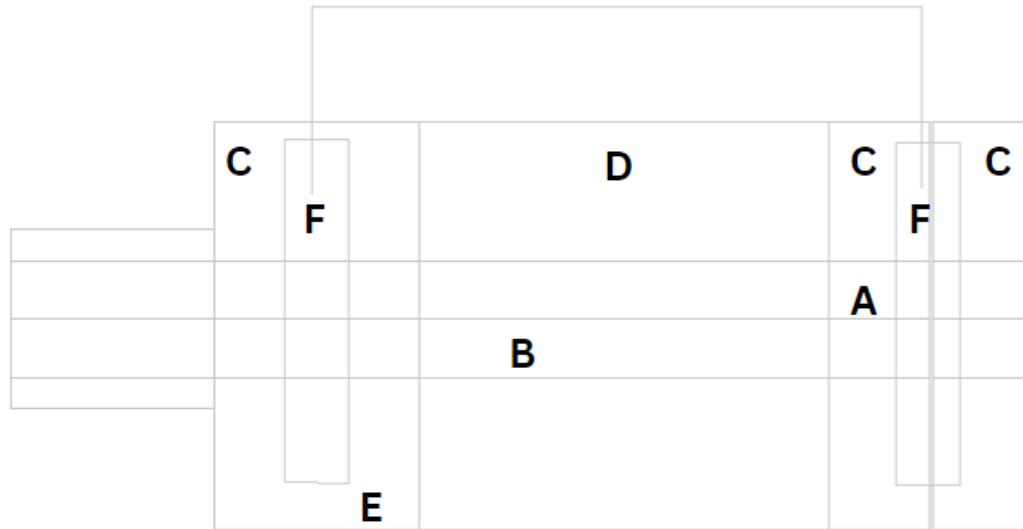
Con los respectivos cálculos realizados, fue posible hacer planos de las partes o zonas de la CDM en 2D haciendo uso del software AutoCAD. En las siguientes figuras es posible visualizar dicho diseño.

La CDM es visualizada de forma completa en vista lateral, ya que esta permite observar cada uno de sus componentes. Estas zonas fueron nombradas alfabéticamente por los autores con el objetivo de facilitar la comprensión del diseño.

Nombre de las zonas:

- Zona A: Salida de agua de la CDM
- Zona B: Sistema de flujo del agua
- Zona C: Placas de membrana
- Zona D: Cámara de desalinización
- Zona E: Entrada del agua salobre en las membranas de desalinización
- Zona F: Electrodo

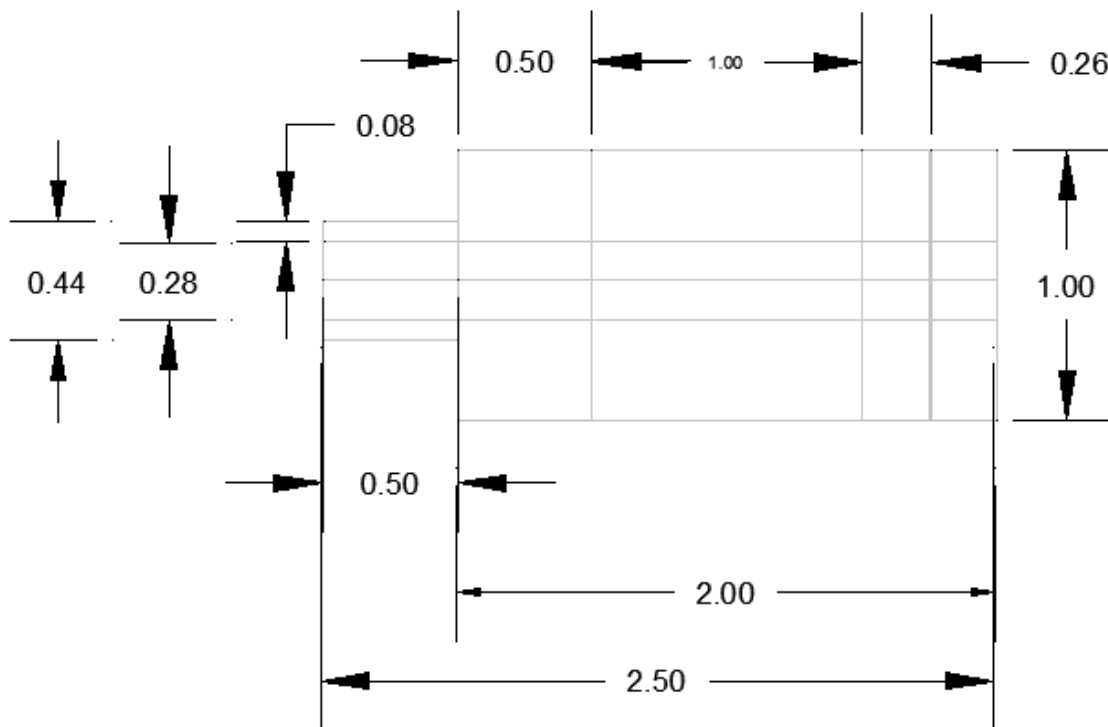
Figura 9. Vista lateral del plano y zonas de la CDM.



Fuente. Elaboración propia.

Con las zonas de la CDM nombradas anteriormente, este plano (figura 9) muestra a grandes rasgos lo que será el diseño 3D de la tecnología. A continuación, se visualizarán las dimensiones de esta, cabe aclarar que dichas medidas se encuentran en metros (m)

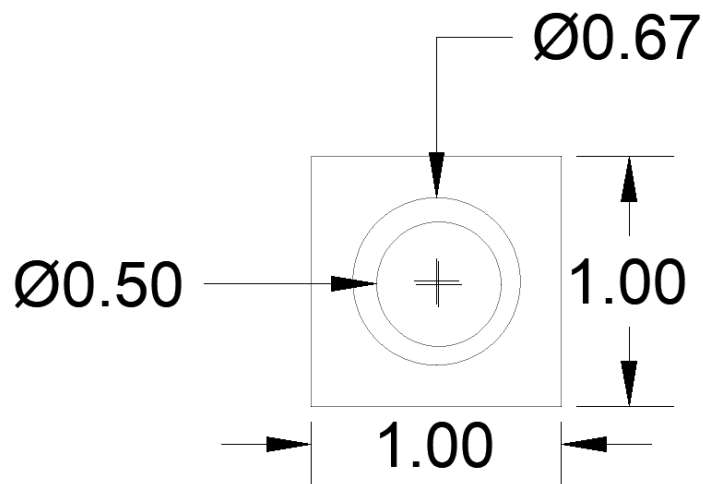
Figura 10. Dimensiones en vista lateral de la CDM.



Fuente. Elaboración propia.

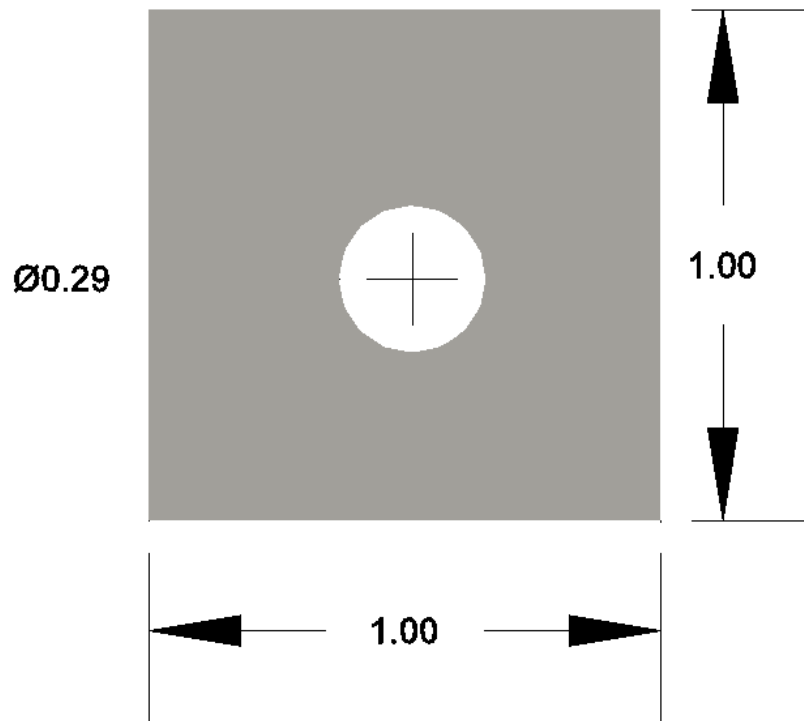
Para la construcción del plano 2D de la CDM no fue suficiente la vista lateral de la misma; es por esto que las figuras 11 y 12 se observa este sistema de desalinización en vistas frontales. En estas se encuentran las zonas E y A, es decir, corresponden a las zonas de captura de agua salobre (entrada) y salida de agua desalinizada.

Figura 11. Vista frontal de la CDM (zona E).



Fuente. Elaboración propia.

Figura 12. Vista frontal de la CDM (zona A).

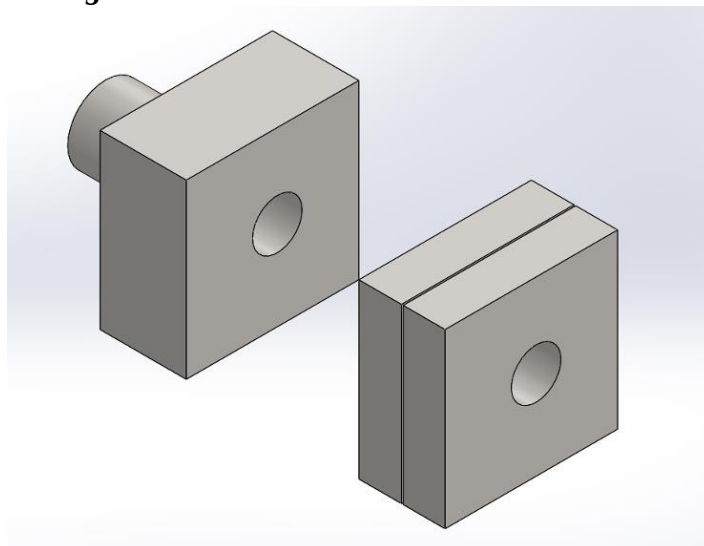


Fuente. Elaboración propia.

15.3.3) Diseño 3D de la CDM

Con los resultados obtenidos anteriormente, fue posible hacer un diseño 3D de la CDM. A continuación se presenta este.

Figura 13. Placas de membrana de la CDM.



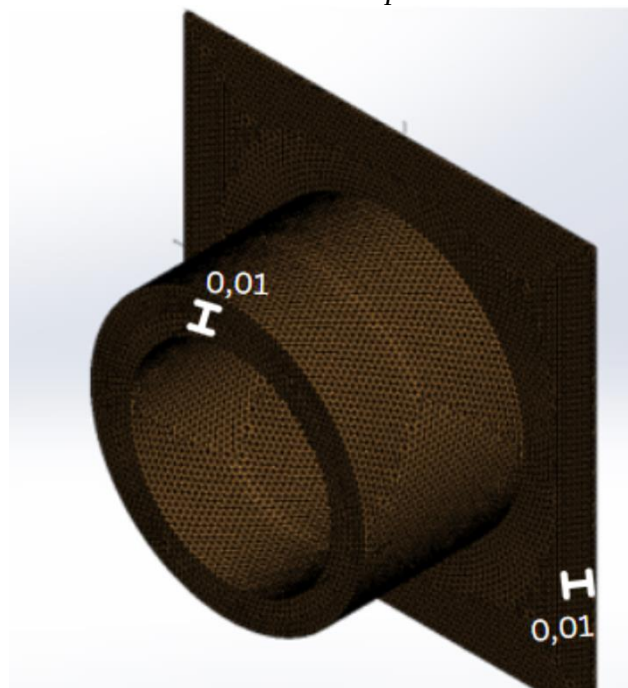
Fuente. Elaboración propia.

En el diseño de la celda de desalinización, las placas de membrana juegan un papel crucial en el proceso de separación de iones de sal del agua salobre, estas membranas, con un espesor de 10 milímetros, están fabricadas con poliamida, un material que permite el paso del agua mientras retiene las sales y otros contaminantes que posiblemente pueda tener el agua de pozo, como se menciona en las entrevistas a veces es contaminado por estiércol de animales que se encuentran en las comunidades o por uso recreativo del mismo.

Con dimensiones de 1 metro de ancho y 1 metro de largo, estas placas proporcionan un área total de 1 metro cuadrado, lo que asegura una superficie de contacto adecuada para la desalinización, la permeabilidad de las membranas, calculada es $10\text{-}12\text{m}^2/\text{s}$, es esencial para determinar la cantidad de agua que puede fluir a través de las placas por unidad de tiempo. Este valor se selecciona ya que membranas de poliamida comúnmente utilizadas en tecnologías de ósmosis inversa tienen permeabilidades típicas que están en el rango de $10\text{-}14\text{m}^2/\text{s}$ y $10\text{-}12\text{m}^2/\text{s}$ para garantizar un proceso de desalinización eficiente (Sotto Díaz, A, 2008).

Estos valores pueden variar según el fabricante y el tipo específico de membrana de poliamida utilizada en el proceso de desalinización. Además, la disposición de dos placas, una en cada lado de la celda, asegura un flujo continuo y uniforme del agua de pozo a través del sistema. Estas características, combinadas con la tecnología de membrana de poliamida, son fundamentales para el éxito del proceso de desalinización, permitiendo que el agua salobre fluya hacia el sistema de recolección y, finalmente, se convierta en una fuente de agua potable segura para las comunidades rurales de Riohacha.

Figura 14. Permeabilidad de las placas de membrana.

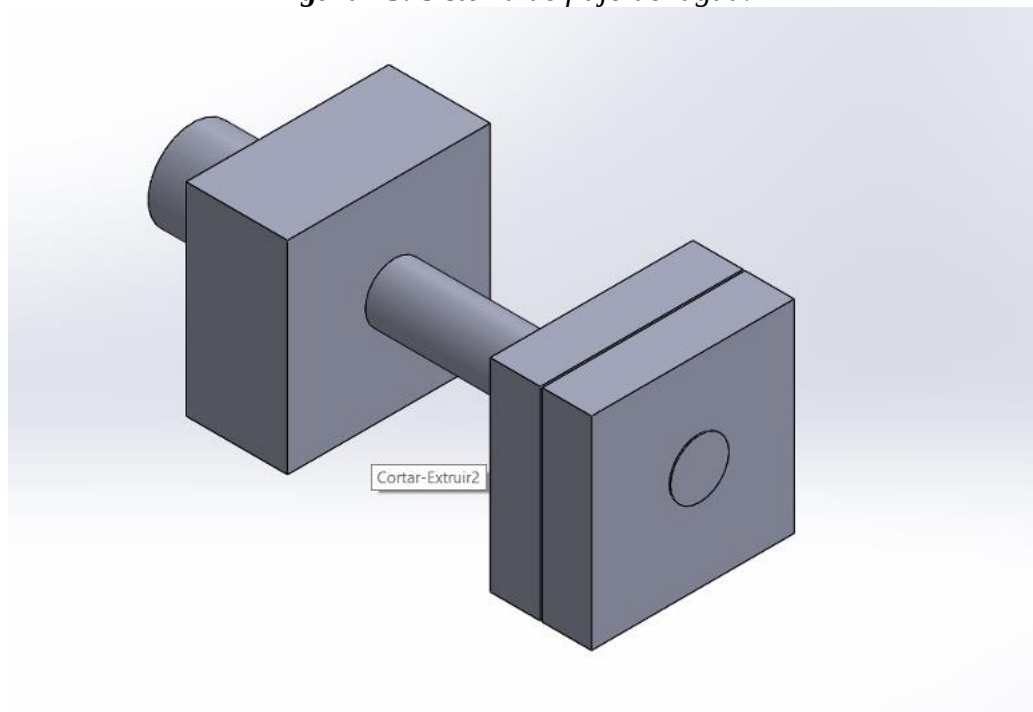


Fuente. Elaboración propia.

En el diseño de la Celda de Desalinización Microbiana la permeabilidad, medida en unidades de $10\text{-}12\text{m}^2/\text{s}$, representa la capacidad del material de la membrana para permitir el flujo de agua a través de él, para asegurar una desalinización efectiva, se seleccionan membranas con permeabilidades específicas que se alinean con las necesidades del proceso, en este contexto, es

importante elegir materiales con permeabilidades óptimas que faciliten un flujo de agua adecuado. Estos valores varían según el tipo y la calidad de la membrana. La correcta selección y comprensión de la permeabilidad son esenciales para maximizar la eficiencia del proceso de desalinización, garantizando así la producción de agua potable de alta calidad en comunidades rurales de Riohacha, La Guajira.

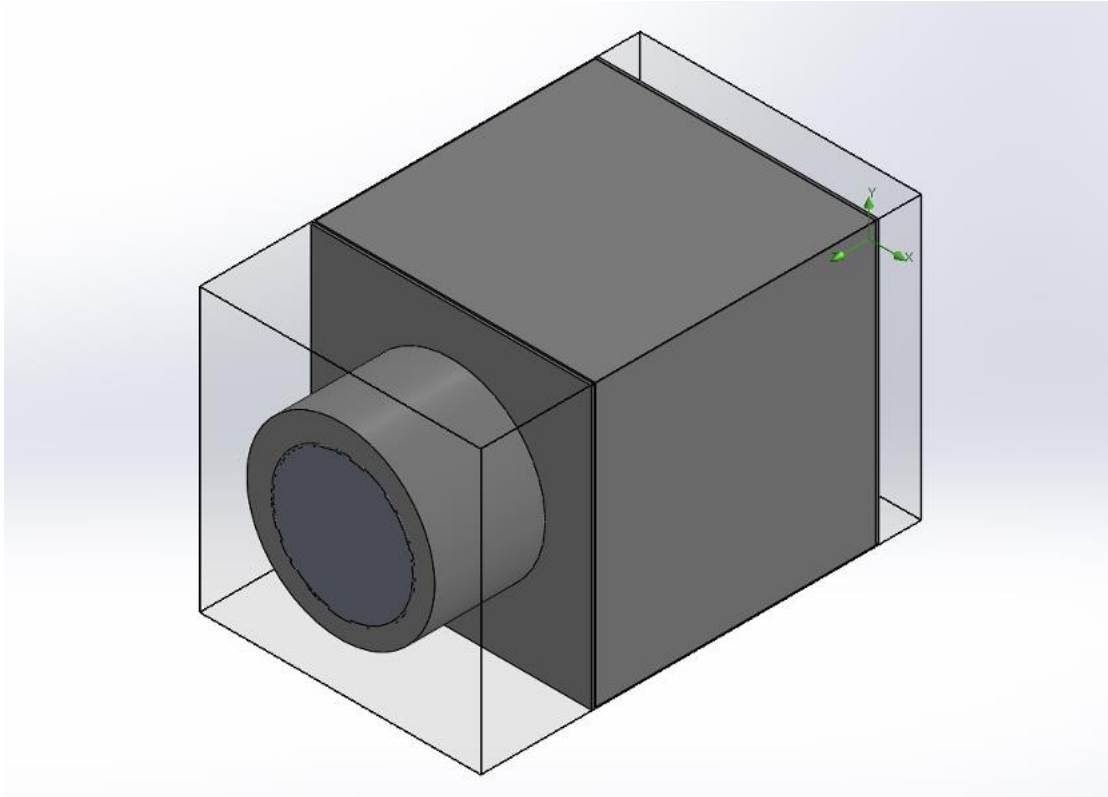
Figura 15. Sistema de flujo del agua.



Fuente. Elaboración propia.

El flujo de agua de pozo a través de las membranas se controla para asegurar una desalinización efectiva. Un flujo adecuado, calculado en función de la velocidad y la presión, es fundamental para maximizar la interacción entre el agua de pozo y microorganismos presentes en las membranas, este flujo constante y controlado permite que los microorganismos realicen su trabajo de desalinización de manera efectiva, eliminando las sales del agua, la distribución uniforme del flujo en toda la superficie de la membrana es esencial para evitar áreas de acumulación y garantizar que cada parte de la membrana contribuya al proceso de desalinización. Por otra parte, un diseño eficaz del sistema de flujo minimiza la posibilidad de obstrucciones y garantiza un rendimiento constante a lo largo del tiempo.

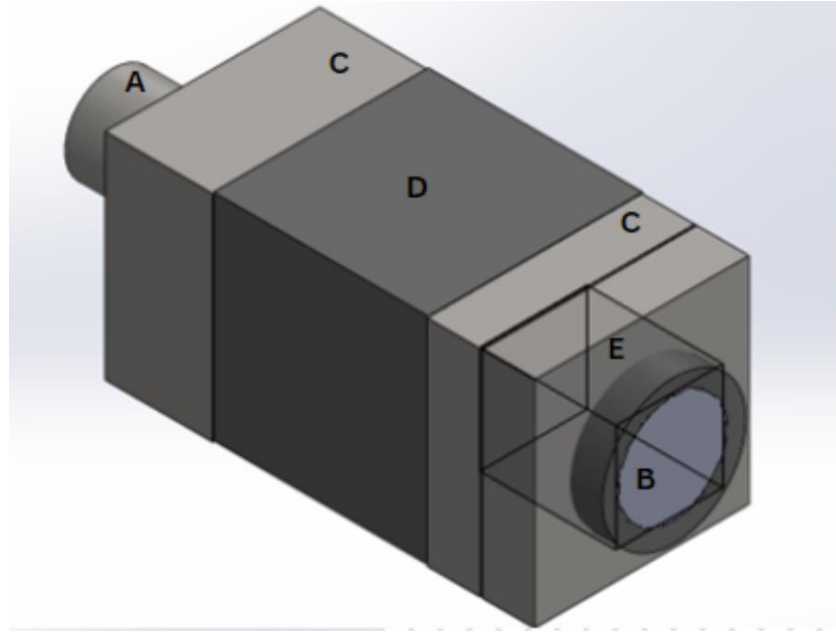
Figura 16. Cámara de desalinización de la CDM.



Fuente. Elaboración propia.

La cámara de desalinización microbiana representa el núcleo del proceso en el diseño de la celda de desalinización microbiana, en esta cámara, ocurre la interacción entre el agua y las membranas de poliamida, donde los microorganismos específicos realizan su función desalinizadora, la geometría y el tamaño de esta cámara son críticos para garantizar un flujo uniforme y una distribución homogénea del agua salobre sobre las membranas. La eficacia de esta cámara determina en gran medida la tasa de desalinización y, por ende, la calidad del agua potable producida.

Figura 17. Celda de Desalinización Microbiana con sistemas de flujo de agua.

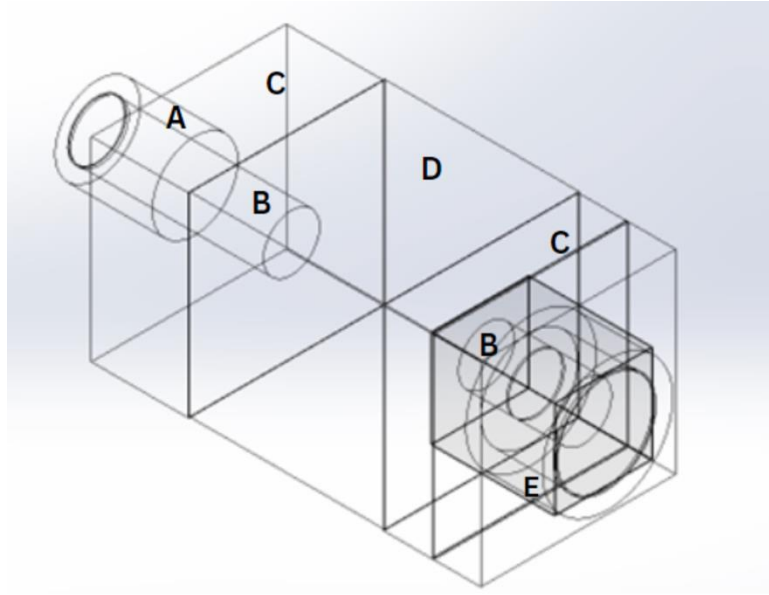


Fuente. Elaboración propia.

La incorporación de sistemas de flujo de agua en la Celda de Desalinización Microbiana agrega una capa adicional de complejidad y eficiencia al proceso, estos sistemas de flujo son responsables de dirigir el agua salobre hacia las membranas de poliamida de manera uniforme y controlada. En este contexto, la CDM actúa como una unidad donde el agua fluye a través de canales especialmente diseñados, permitiendo la interacción efectiva entre las membranas y los microorganismos canalizándola hacia un sistema separado para su posterior tratamiento y almacenamiento.

La optimización de estos sistemas de flujo no solo implica consideraciones técnicas, como la velocidad y la presión del agua, sino también aspectos prácticos, como la resistencia al desgaste y la durabilidad de los componentes, además, se deben incorporar medidas para prevenir la acumulación de sedimentos y bioincrustaciones en los canales de flujo, lo que podría obstruir el proceso de desalinización.

Figura 18. Interior de la CDM.

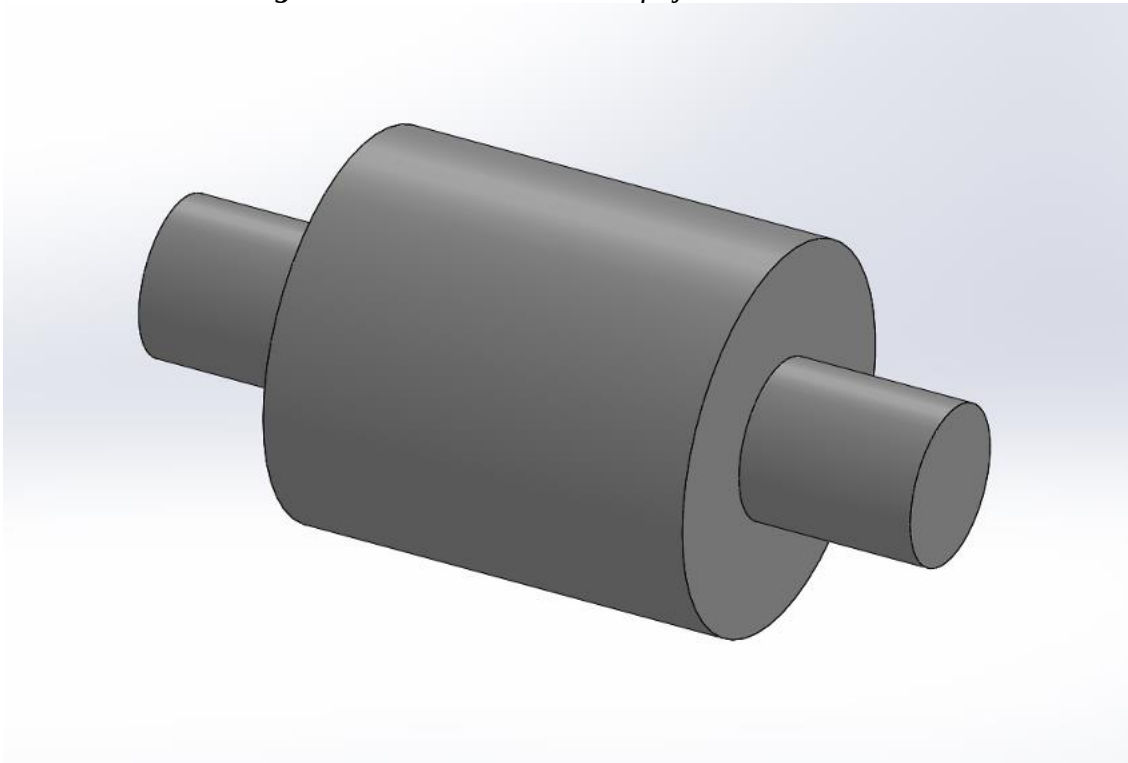


Fuente. Elaboración propia.

El interior de la Celda de Desalinización Microbiana (CDM) es un espacio altamente especializado donde ocurren procesos fundamentales para la purificación del agua, en este espacio confinado, las placas de membrana de poliamida se encuentran estratégicamente ubicadas para permitir el flujo continuo del agua, las membranas actúan como barreras semipermeables, restringiendo el paso de iones de sal mientras permiten el flujo de agua pozo desalinizada.

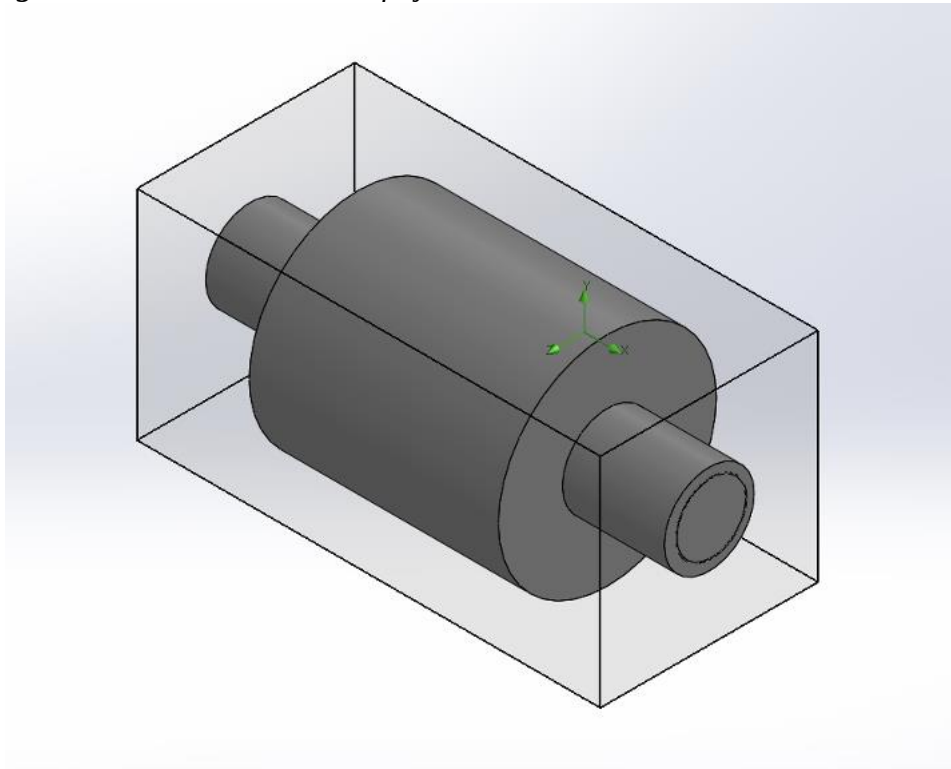
Dentro de la CDM, los microorganismos específicamente seleccionados prosperan en un ambiente biológicamente activo, estos microorganismos, impulsados por la fuente de energía proporcionada, trabajan en conjunto con las membranas para eliminar los iones de sal, además es esencial mantener un equilibrio adecuado de microorganismos y proporcionar una adecuada aireación para garantizar un proceso biológico óptimo.

Figura 19. Sistema interno de flujo de la CDM.



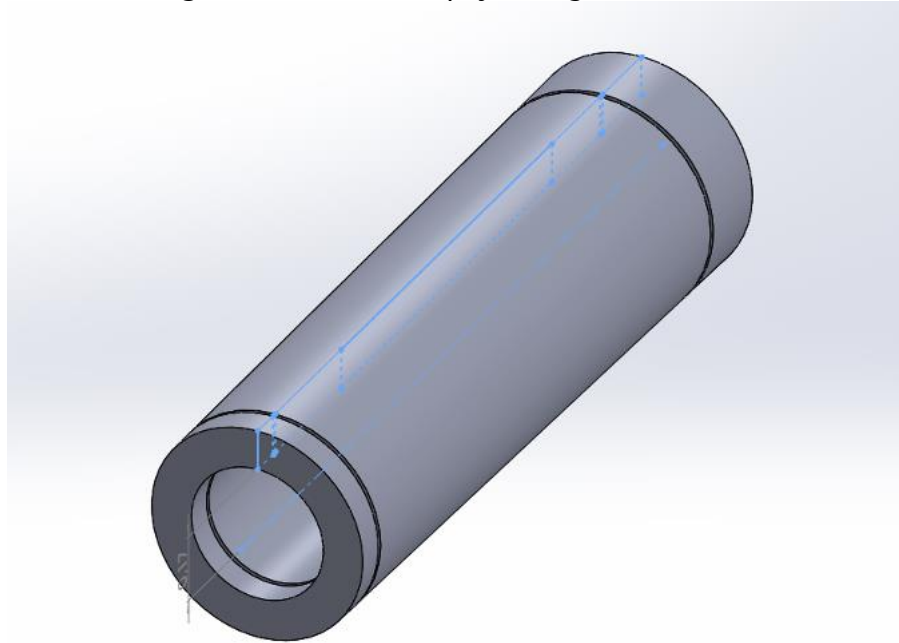
Fuente. Elaboración propia.

Figura 20. Sistema interno de flujo de la celda con la cubierta de la celda.



Fuente. Elaboración propia.

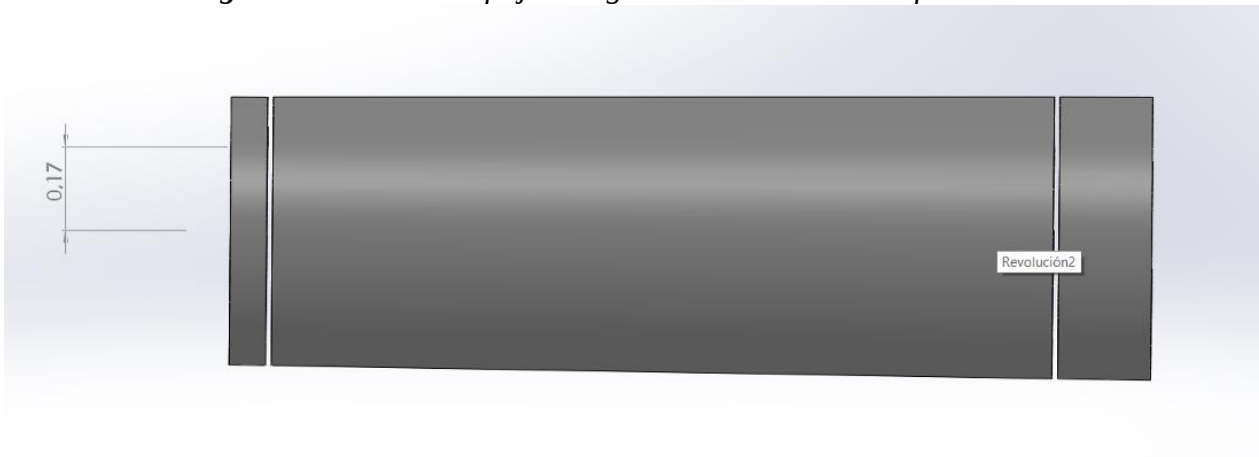
Figura 21. Sistema de flujo de agua salobre.



Fuente. Elaboración propia.

Este sistema está diseñado para garantizar un suministro constante y uniforme de agua de a través de las placas de membrana. La entrada del agua salobre para mantener un flujo constante de $0,0417 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que permite una interacción efectiva entre las membranas y los microorganismos.

Figura 22. Sistema de flujo de agua salobre desde vista frontal.



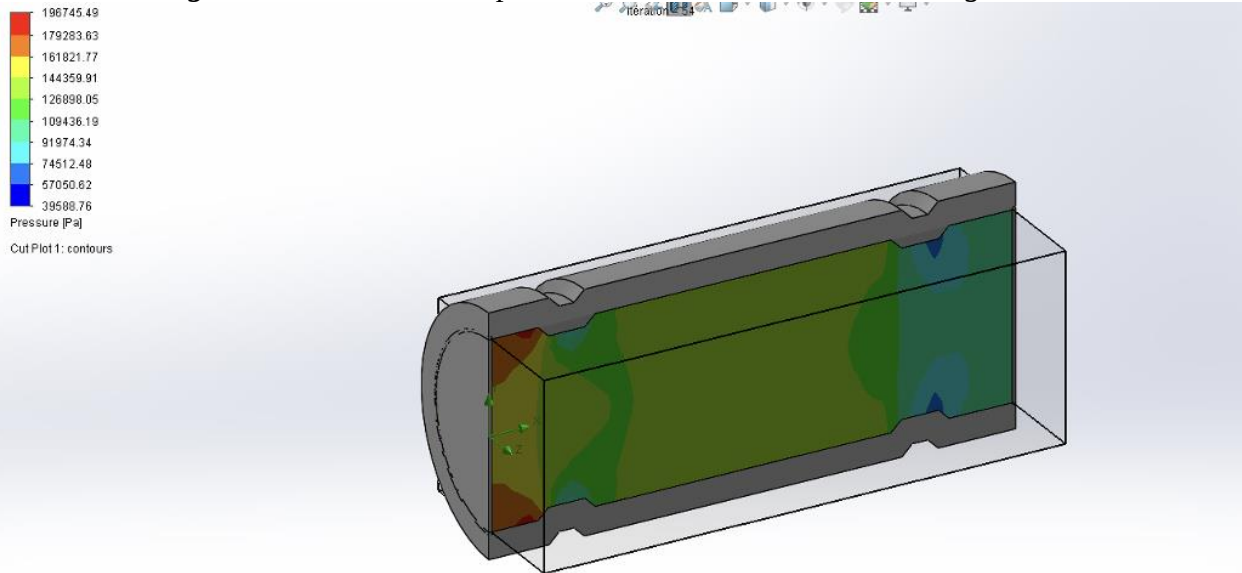
Fuente. Elaboración propia.

La importancia de un diseño tridimensional (3D) de una Celda de Desalinización Microbiana (CDM) y un sistema de flujo es fundamental para la eficiencia y funcionalidad del proceso, el diseño 3D permite visualizar y analizar cada componente de la CDM antes de la construcción física, lo que ayuda a identificar posibles problemas, optimizar la disposición de los elementos y garantizar un montaje, además, proporciona una representación visual del sistema, facilitando la comprensión, lo que es decisivo en proyectos colaborativos y de investigación.

Por otro lado, un sistema de flujo bien diseñado asegura la distribución uniforme del agua salobre y la disposición eficiente de los microorganismos responsables de la desalinización, un flujo adecuado garantiza un contacto efectivo entre los microorganismos y el agua salada, mejorando así la eficiencia del proceso de desalinización (Collana, M., & Taumaturgo, J, 2009).

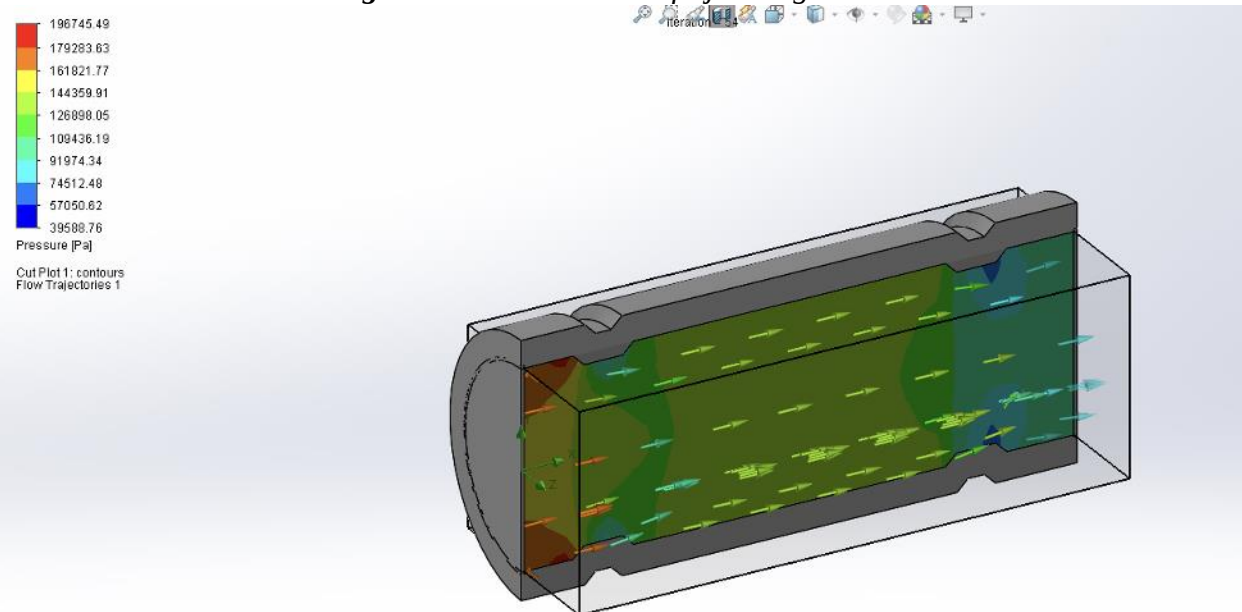
15.3.4) Simulación de funcionamiento de la CDM

Figura 23. Simulación de presión en la celda con entrada de agua.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 24. Simulación de flujo de agua.

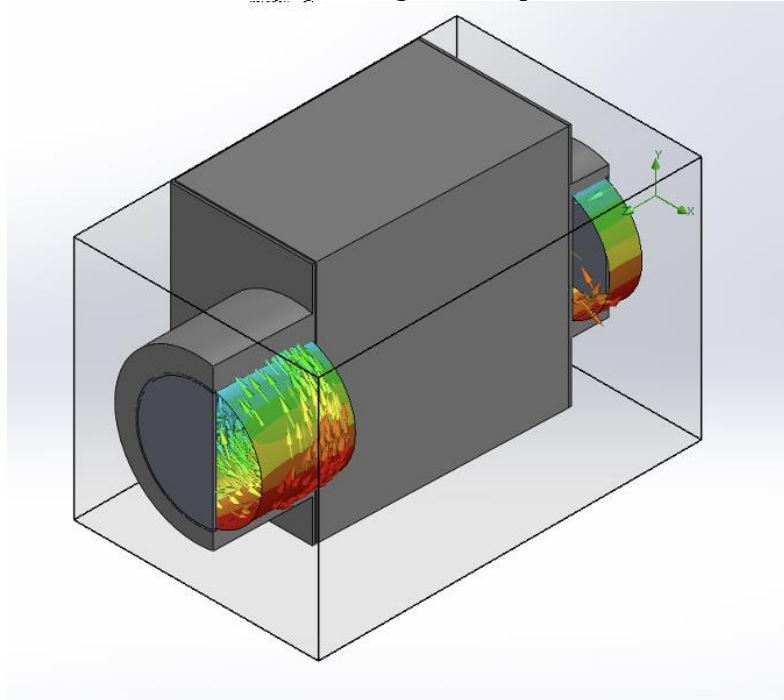


Fuente. Elaboración propia.

La simulación del flujo de agua en la Celda de Desalinización Microbiana es una herramienta esencial para comprender y optimizar el proceso de desalinización, a través de modelos computacionales avanzados, se analiza detalladamente cómo el agua de pozo fluye a través de las placas de membrana y las cámaras de desalinización, esta simulación permite visualizar el comportamiento del flujo, identificar posibles puntos de congestión y evaluar la eficiencia del sistema en diferentes condiciones operativas.

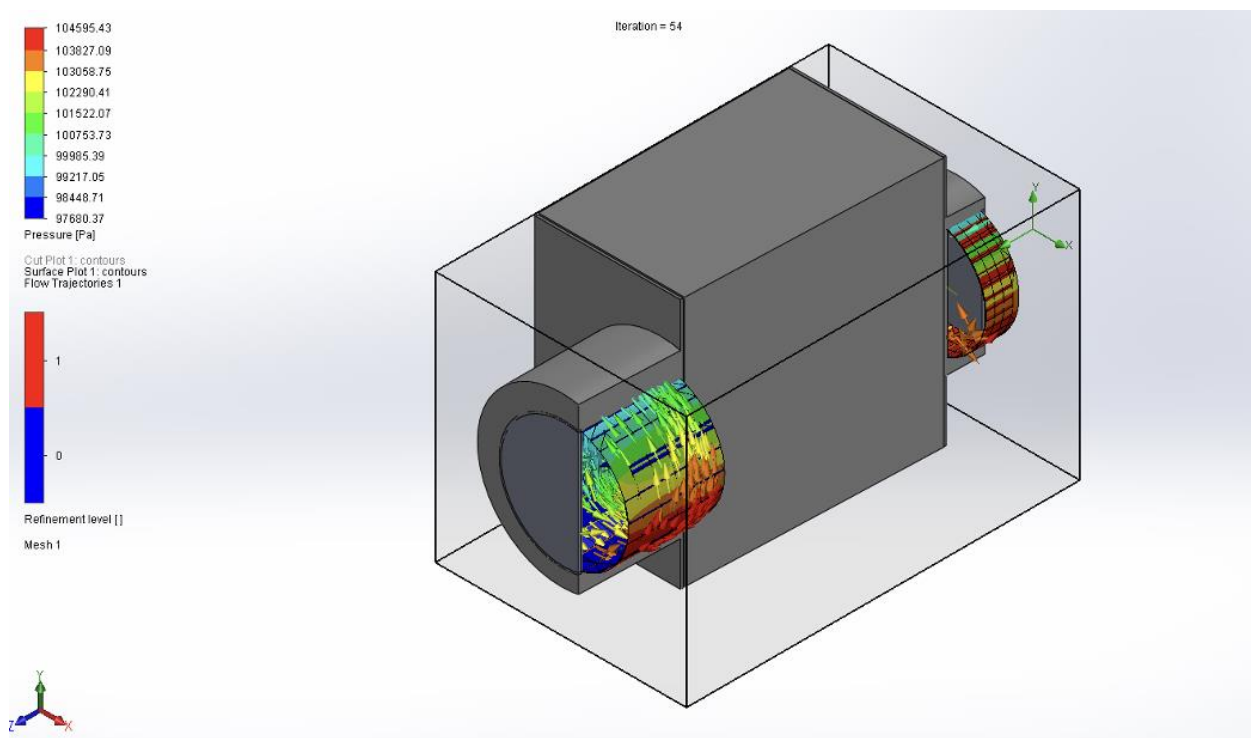
Durante la simulación, se tiene en cuenta el caudal establecido de $0.0417 \text{ m}^3/\text{s}$ y se analiza cómo el agua se distribuye de manera uniforme sobre las membranas, los modelos computacionales también consideran la velocidad del flujo en diferentes secciones de la celda, permitiendo ajustes precisos para evitar la acumulación de salmuera y maximizar la remoción de sal.

Figura 25. Simulación de flujo de agua en el proceso de desalinización.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 26. Simulación de presión, flujo de agua y contornos de la superficie de la celda.



Fuente. Elaboración propia.

La simulación del flujo de agua y la presión en la celda de desalinización es fundamental para entender y optimizar el proceso de desalinización microbiana, esta simulación permite visualizar cómo el agua fluye a través de la celda y cómo varía la presión en diferentes puntos del sistema, al analizar el flujo, los ingenieros pueden identificar posibles áreas de estancamiento o turbulencias que podrían afectar la eficiencia del proceso, además, al estudiar la presión, se pueden determinar las condiciones ideales para garantizar un flujo constante y uniforme, lo que es crucial para el funcionamiento eficiente de las membranas y, por ende, para la remoción efectiva de sal.

La simulación también facilita la identificación de posibles puntos de estrés en el sistema, lo que ayuda a prevenir fallas y a diseñar una celda de desalinización microbiana que sea confiable en entornos de desalinización a gran escala (Cortes Posada, L. L., & Lesmes Ayala, L. L, 2014).

Tabla 12. Inocuos que se pueden implementar en la celda.

Microorganismo	Tipo	Capacidad de remoción de aal	Aspectos importantes	Autor
<i>Desulfovibrio spp.</i>	Bacterias	Variable, principalmente implicado en la reducción de sulfatos	Resistentes a condiciones anaeróbicas, ciclo del azufre.	Hagiya, H., Kimura, K., Nishi, I., Yamamoto, N., Yoshida, H.,

				Akeda, Y. y Tomono, K. (2018).
<i>Shewanella spp.</i>	Bacterias	Variable, puede contribuir a la reducción de metales.	Electroactividad, adaptación a ambientes extremos.	Martín-Rodríguez, A. J., Martín-Pujol, O., Artiles-Campelo, F., Bolaños-Rivero, M., & Römling, U. (2017).
<i>Haloquadratum walsbyi</i>	Arqueas	Variable, adaptado a ambientes de alta salinidad.	Halófilos extremos, fotosíntesis anaeróbica.	Chen, Y., Zhou, F., Li, G., & Xu, Y. (2009).
<i>Dunaliella salina</i>	Alga	Acumulación de sales en vacuolas, variable según condiciones.	Tolerancia a salinidad elevada, acumulación de β -carotenos.	Mishra, A., & Jha, B. (2009).
<i>Pseudomonas spp.</i>	Bacterias	Implicado en procesos de degradación de contaminantes y puede afectar la salinidad	Versatilidad metabólica, adaptación a diferentes sustratos.	Leyton, Y. E., Letelier, A. S., Mata, M. T., & Riquelme, C. E. (2017).

Fuente. Elaboración propia.

La elección de la mejor cepa para utilizar en celdas de desalinización dependerá de varios factores, como las condiciones específicas del entorno, el diseño del sistema y los objetivos del proceso. No hay una única "mejor cepa" ya que la eficacia puede variar según las circunstancias. La investigación continua en este campo está descubriendo nuevas cepas y optimizando las existentes para mejorar la eficiencia de la desalinización microbiana. La selección de cepas específicas debería basarse en pruebas experimentales en condiciones relevantes para el proceso de desalinización deseado.

Sin embargo, *Haloquadratum walsbyi*, una arquea halófila extrema, se destaca por su adaptación a entornos de alta salinidad, posicionándolo como un candidato potencialmente valioso para la desalinización. Su característica halófila extrema le confiere la capacidad de prosperar en ambientes salinos, lo cual podría ser beneficioso en regiones como La Guajira, caracterizada por condiciones áridas y salinas. La halotolerancia única de este microorganismo se traduce en una capacidad inherente para enfrentar niveles de salinidad significativamente altos, ofreciendo una adaptación natural a los desafíos asociados con la desalinización en tales entornos.

En el contexto de La Guajira, la implementación de *Haloquadratum walsbyi* en celdas de desalinización podría aprovechar su capacidad de aclimatización, un proceso mediante el cual los microorganismos ajustan sus estructuras y metabolismos para hacer frente a variaciones en la concentración de sal. Esta fase de aclimatización permite a los halófilos mantener un equilibrio

osmótico efectivo, mejorando la eficiencia en los procesos de desalinización y contribuyendo a la adaptabilidad de los sistemas a las condiciones cambiantes del entorno. La investigación continua en este campo puede ofrecer nuevas perspectivas sobre cómo aprovechar al máximo las características halófilas de microorganismos como *Haloquadratum walsbyi* para mejorar la eficiencia de la desalinización en entornos salinos específicos. Mishra, A., & Jha, B. (2009).

Otro aspecto importante a considerar es el puente de energía en la Celda de Desalinización Microbiana (CDM) es fundamental para su funcionamiento, aprovechando la interacción entre el ánodo y el cátodo, donde los microorganismos actúan como catalizadores. En el ánodo, se produce la oxidación de materia orgánica, liberando electrones que fluyen a través de un circuito externo hacia el cátodo. Esta transferencia de electrones genera una corriente eléctrica, convirtiendo la CDM en una fuente de energía aprovechable. La eficiencia de la generación de energía está vinculada a la capacidad de los microorganismos para catalizar eficazmente las reacciones redox. Los electrodos desempeñan un papel crucial en facilitar la conducción electrónica, La aplicabilidad de este sistema se destaca en la generación de energía renovable, especialmente en entornos costeros donde hay disponibilidad de agua salobre, a pesar de sus prometedoras aplicaciones, desafíos como la optimización de microorganismos y la gestión de subproductos requieren investigación continua para mejorar la eficiencia de la CDM en la generación de energía y su viabilidad como solución sostenible. Buitrón, G., & Pérez, J. (2011).

La Celda de Desalinización Microbiana (CDM) opera a través de un proceso integrado que combina la ósmosis inversa y la actividad microbiana, utilizando electrodos y un sistema de flujo para desalinizar agua salobre. Inicialmente, el agua salobre se introduce en la celda, donde la ósmosis inversa inicia el proceso al aplicar presión para forzar el paso del agua a través de membranas semipermeables, separando las sales del agua, simultáneamente, microorganismos exo electrógenos en este caso halotolerantes presentes en el ánodo metabolizan materia orgánica, liberando electrones, estos electrones viajan a través de un circuito externo hacia el cátodo, donde se produce la reducción de iones presentes en el agua, generando así electricidad. Navarro Chao, M. (2017). Los electrodos facilitan la transferencia de electrones y contribuyen a la eficiencia del proceso, un sistema de flujo controla el movimiento del agua a través de la celda, asegurando un contacto efectivo entre el agua y los microorganismos, por otro lado la presión en la ósmosis inversa es fundamental, según estudios, se recomienda una presión osmótica óptima para mejorar la eficiencia del proceso y maximizar la desalinización para proporcionar una orientación general, en sistemas de ósmosis inversa, la presión puede variar típicamente en el rango de 50 a 80 bar (aproximadamente 725 a 1,160 psi). Sin embargo, es esencial ajustar estas cifras según las características específicas de la celda de desalinización y las condiciones locales. La sinergia de estos componentes permite un proceso sostenible de desalinización que integra la generación de energía, ofreciendo una solución innovadora para abordar la escasez de agua en entornos costeros. Ortiz Ortiz, D. I. (2019).

Por otra parte, podemos observar algunos agentes causantes, síntomas y efectos que podemos encontrar en las comunidades, debido a esto la importancia de diseñar la celda como solución a esta problemática que se está dando en la región.

Tabla 13. *Tabla de enfermedades asociadas al consumo de agua no potable en La Guajira: Agentes causantes, síntomas y efectos.*

Enfermedad	Agente Causante	Síntomas y Efectos	Autor
------------	-----------------	--------------------	-------

Cólera	Bacteria <i>Vibrio cholerae</i>	Diarrea acuosa, deshidratación severa.	Doria Arugemdo, C., López Torres, A., & Deluquez Viloria, H. (2018).
Hepatitis A	Virus de la Hepatitis A (HAV)	Fatiga, fiebre, ictericia, dolor abdominal.	Doria Arugemdo, C., López Torres, A., & Deluquez Viloria, H. (2018).
Amebiasis	Ameba <i>Entamoeba histolytica</i>	Diarrea, dolor abdominal, pérdida de peso.	Araoz Rojas, J. A. (2018).
Giardiasis	Parásito <i>Giardia lamblia</i>	Diarrea, dolor abdominal, flatulencia.	Monsalve, M. M. (2016).
Enfermedad Diarreica Aguda	Diversos agentes (virus, bacterias)	Diarrea, vómito, deshidratación.	Doria Arugemdo, C., López Torres, A., & Deluquez Viloria, H. (2018).
Esquistosomiasis	Gusano <i>Schistosoma</i>	Fiebre, dolor abdominal, daño a órganos internos.	Torres Campos, R. E. (2021).

Fuente. Elaboración propia

La Guajira enfrenta desafíos significativos en términos de acceso a agua potable, lo que aumenta el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. Las condiciones de salinidad y la falta de tratamiento adecuado pueden contribuir a la proliferación de patógenos en el suministro de agua, dando lugar a enfermedades como el cólera, hepatitis A, amebiasis y giardiasis, la enfermedad diarreica aguda es un riesgo constante, y la esquistosomiasis podría surgir en áreas con exposición a cuerpos de agua contaminados. Este análisis resalta la importancia crítica de abordar las condiciones del suministro de agua en La Guajira para prevenir la propagación de enfermedades transmitidas por el agua. La implementación de tecnologías de desalinización seguras y accesibles, como las celdas de desalinización microbiana, puede ser esencial para mejorar la calidad del agua y reducir la incidencia de estas enfermedades, contribuyendo así a la salud pública y al bienestar de la población.

La situación de acceso limitado a agua potable en La Guajira plantea un riesgo significativo de enfermedades transmitidas por el agua debido a la presencia de patógenos en el suministro no tratado. La incidencia de enfermedades y la urgencia de abordar la calidad del agua. La implementación de tecnologías de desalinización seguras, como las celdas de desalinización microbiana, emerge como una estrategia prometedora para mejorar la calidad del agua en la región. Al reducir la carga de patógenos y salobridad, además de mejorar la potabilidad del agua, estas tecnologías pueden desempeñar un papel crucial en la mitigación de riesgos para la salud asociados con el consumo de agua no potable en La Guajira, fortaleciendo así la salud pública y el bienestar de la comunidad.

Este diseño asegura que el proceso de desalinización microbiana propuesto sea capaz de producir 1000 litros/día de agua potable diariamente, con solo 40-60 litros de rechazo siendo este el agua que sale con mayor carga de sal y es redirigido otra vez a un sistema de almacenamiento de salmuera o la fuente de abastecimiento, esto se sustenta basado en investigaciones ya realizadas. Martinez, M. S. L. (2014); la combinación de dimensiones adecuadas, selección de materiales apropiados y simulación detallada garantiza la eficiencia y viabilidad de este sistema de la Guajira que carecen de acceso a agua potable segura, este diseño representa un paso importante hacia la mitigación de la escasez de agua potable en muchas regiones de la Guajira y Colombia, abordando así un problema global urgente desde una perspectiva ingenieril y ambientalmente sostenible.

Es importante destacar que, para llevar a cabo este proyecto, se deben tener en cuenta las normativas legales y los estándares éticos relacionados con el tratamiento del agua y la protección ambiental, la implementación de este sistema requeriría la supervisión constante para asegurar su funcionamiento adecuado en caso de llegar a ser implementado y cumplir con todas las regulaciones establecidas por las autoridades pertinentes, en última instancia, este proyecto representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones sostenibles para el acceso global al agua potable que guían la ingeniería ambiental moderna.

Para finalizar con el diseño y viabilidad de la CDM se tiene como resultado la tabla 12 donde se proporciona una estimación del costo aproximado en pesos colombianos para los materiales necesarios en la construcción de la celda de desalinización microbiana. Cabe mencionar que estos precios son aproximados y pueden variar según la ubicación, la disponibilidad local y las fluctuaciones del mercado.

Tabla 14. *Materiales y costos de la CDM.*

Componente	Material	Precio Aproximado (COP)
Membranas de Poliamida	Poliamida	500,000 - 2,000,000
Cámara de Desalinización	Acero Inoxidable	1,000,000 - 5,000,000
Sistema de Flujo	PVC, Acero Inoxidable	300,000 - 1,500,000
Sistema de Aireación	Polímeros, Acero	200,000 - 1,000,000
Sistema de Recolección	PVC, Acero Inoxidable	400,000 - 2,000,000
Bomba de Agua	Acero, Plástico (Bomba sumergible)	150,000 - 800,000
Mediciones y Sensores	Sensores Electrónicos (nivel y caudal)	500,000 - 2,500,000
Conexiones y Tuberías	PVC, Acero Inoxidable	100,000 - 500,000

Material de Sellado	Caucho, Silicona	50,000 - 200,000
Filtros	Filtros de malla y carbón	100,000 - 500,000
Electrodos (Ánodo y Cátodo)	Grafito, Titanio	200,000 - 1,000,000
Almacenamiento de Energía	Baterías, Capacitores	1,000,000 - 5,000,000
Total		3,500,000 - 21,500,000

***Fuente.** Elaboración propia.*

El diseño de la celda de desalinización propuesto para la comunidad rural de La Guajira se basa en la selección de materiales que combinan eficacia y bajo costo, las membranas de poliamida, fundamentales para el proceso de desalinización, ofrecen una solución efectiva para separar los iones del agua salobre, la cámara de desalinización, fabricada en acero inoxidable, garantiza durabilidad y resistencia a la corrosión dadas las condiciones del agua salina. Además, el sistema de flujo, construido en PVC, asegura una distribución eficiente del agua a lo largo del proceso, los tubos de silicona en el sistema de aireación permiten una oxigenación adecuada para los microorganismos, facilitando la eliminación de la sal, la recolección del agua desalada se lleva a cabo mediante un sistema de PVC, mientras que la bomba sumergible, junto con medidores y sensores de nivel y caudal, se integran para facilitar el proceso de extracción del agua del pozo existente, las conexiones de PVC y el material de sellado de silicona aseguran el sistema, evitando pérdidas innecesarias, además, se han implementado filtros de malla y carbón para mejorar aún más la calidad del agua tratada.

16. Análisis y discusión de resultados

16.1. Objetivo 1: Comparar la eficiencia de diferentes técnicas de desalinización, con el propósito de determinar la alternativa que logró el mayor grado de desalinización y producción de agua potable.

El método de ósmosis inversa para el proceso de desalinización microbiana, donde ha demostrado ser altamente eficiente en la eliminación de la sal del agua de pozo profundo, debido a su capacidad de remoción de sal en el agua por medio de membranas semipermeables que solo dejan pasar las moléculas de agua que contiene sales y demás sustancias (Cath, T. Y., Childress, A. E., & Elimelech, M, 2006), con el fin de eliminar los iones de cloro y sulfato del agua de pozo profundo, convirtiéndola en agua con bajo contenido de sales disueltas o comúnmente llamada agua dulce (Cath, T. Y., Childress, A. E., & Elimelech, M, 2006). Además, debido a que permite un control preciso del proceso y es compatible con otras tecnologías, la ósmosis inversa es apropiada para aplicaciones tecnológicas emergentes como las Celdas de Desalinización Microbiana.

Con la elección de la ósmosis inversa como técnica de desalinización en la CDM, es posible adaptar la tecnología a las comunidades rurales de Riohacha que sufren de diferentes problemáticas a la hora de acceder a agua potable y donde los recursos económicos y sociales son una limitante a la hora de proponer una tecnología nueva, como la CDM, al comparar la eficiencia de diferentes técnicas se tuvo en cuenta el artículo Determinación de la viabilidad de un modelo de desalinización de agua de pozo profundo acoplado a una Celda Microbiana de Desalinización para comunidades vulnerables en Riohacha Guajira (Daza González & Rodríguez Mancipe, 2021) donde el acceso al agua potable es esencial y, lamentablemente, escaso en muchas comunidades vulnerables, la búsqueda de tecnologías efectivas de desalinización es crucial, entre las distintas técnicas disponibles, la ósmosis inversa emerge como la opción más prometedora y confiable para abordar esta creciente necesidad, como se evidencia en diversos estudios científicos, al considerar el contexto específico de Riohacha Guajira, una comunidad que enfrenta desafíos significativos en cuanto a la calidad y accesibilidad del agua, la integración de un modelo de desalinización de agua de pozo profundo acoplado a una Celda Microbiana de Desalinización es una estrategia viable y potente, este enfoque innovador aprovecha la ósmosis inversa para purificar el agua de pozo profundo, una técnica que ha demostrado su eficacia y eficiencia en varios estudios científicos. Por otro lado la ósmosis inversa se presenta como una opción superior debido a su principio fundamental, el proceso implica forzar el agua de pozo profundo a pasar a través de una membrana semipermeable, eliminando así las impurezas, las sales y otros contaminantes presentes en el agua de pozo profundo, esto asegura que el agua desalinizada sea segura para el consumo humano y cumple con los estándares de calidad requeridos, además, la tecnología de ósmosis inversa ha avanzado significativamente en los últimos años, lo que ha llevado a mejoras en la eficiencia energética y la reducción de costos, lo que la hace más accesible para las comunidades vulnerables.

Los avances en tecnologías de desalinización son esenciales para garantizar un futuro sostenible y seguro para las comunidades vulnerables que enfrentan la escasez de agua potable. La ósmosis inversa, con su capacidad probada para proporcionar agua de alta calidad de manera eficiente y asequible, se presenta como la opción más viable y efectiva en la lucha por mejorar el acceso al agua potable en regiones como Riohacha La Guajira. Su aplicación en el modelo de desalinización acoplado a una Celda Microbiana de Desalinización no solo es prometedora, sino

que también ofrece una solución concreta y esperanzadora para comunidades que merecen un acceso ininterrumpido a una fuente de agua potable segura y confiable

16.2. Objetivo 2. Evaluar los criterios económicos, sociales y ambientales de la tecnología de CDM valorada a fin de conocer su viabilidad en las comunidades rurales del municipio de Riohacha.

En las comunidades rurales de Riohacha, La Guajira, el acceso al agua potable se ha convertido en una lucha cotidiana, marcada por la escasez y la contaminación, estas áreas, ubicadas en un entorno árido y desértico, enfrentan problemas críticos en términos de suministro de agua segura y confiable, las fuentes tradicionales, como pozos y jagüeyes, que alguna vez fueron los pilares de estas comunidades, se han vuelto cada vez más insuficientes y contaminadas, esta situación se agrava aún más en las comunidades indígenas, donde el acceso al agua potable es intermitente y, a menudo, insalubre, la falta de acceso regular al agua potable ha llevado a problemas graves de salud, especialmente entre los niños, y ha contribuido a altas tasas de desnutrición e infecciones, en estas condiciones, las personas se han visto obligadas a almacenar agua en albercas subterráneas y jagüeyes, enfrentando no solo la escasez, sino también la contaminación. Además, los problemas de acceso al agua han llevado a una baja ingesta diaria de agua por parte de la población, con algunos individuos consumiendo tan solo 5 litros de agua al día.

En medio de estas dificultades, surge la esperanza en forma de tecnología: la desalinización microbiana. Este enfoque ofrece una solución prometedora para las comunidades que han estado luchando con la falta de agua potable, la tecnología de celda de desalinización microbiana (CDM) se presenta como una vía para convertir agua salada en agua potable utilizando microorganismos específicos para evaluar la viabilidad de esta tecnología en las comunidades vulnerables de Riohacha, se llevarán a cabo entrevistas exhaustivas con diversos miembros de estas comunidades, estas entrevistas arrojaron información crítica sobre la magnitud del problema y resaltaron la urgencia de encontrar soluciones prácticas y sostenibles para la elaboración de la CDM. La discusión de los resultados esperados de un proyecto de desalinización microbiana en las comunidades rurales de Riohacha, La Guajira, se presenta como un análisis detallado de las potenciales mejoras que esta tecnología podría ofrecer a estas comunidades. Al considerar los desafíos actuales relacionados con el acceso limitado y la calidad insuficiente del agua potable, el proyecto de desalinización microbiana representa una vía prometedora hacia la transformación de esta situación precaria.

Uno de los resultados esperados se refiere directamente a la mejora en el acceso al agua potable, se anticipa que la implementación de la tecnología de desalinización microbiana proporcionará una fuente confiable de agua potable para las comunidades rurales, este acceso ininterrumpido al agua potable no solo cubrirá las necesidades básicas de las personas, sino que también tiene el potencial de transformar la vida diaria de las comunidades, con un suministro estable de agua potable, las familias podrán llevar a cabo sus actividades diarias de manera más efectiva y saludable, aliviando así la carga diaria que enfrentan debido a la escasez de agua, además del aumento en el acceso al agua potable, se esperan mejoras significativas en la salud y el bienestar de las personas en estas comunidades, la falta de acceso regular a agua potable segura ha llevado a numerosos problemas de salud, incluyendo infecciones gastrointestinales, desnutrición e incluso la muerte, especialmente en niños, con la introducción de agua potable de alta calidad a través de la desalinización microbiana, se espera una disminución drástica en las enfermedades relacionadas con el agua, esto, a su vez, conducirá a una mejora en la calidad de vida y en la

productividad de las personas, ya que estarán menos enfermas y podrán participar más plenamente en actividades educativas y económicas.

Además de los beneficios directos para la salud, la disponibilidad de agua potable mejorada también tendrá un impacto positivo en la higiene y el saneamiento en estas comunidades, las personas podrán mantener estándares de higiene personal más altos y las instalaciones de saneamiento podrán funcionar de manera más eficiente, mejorando así las condiciones generales de salud y bienestar, otro resultado esperado es el empoderamiento de las comunidades a través de la educación, la implementación de la tecnología de desalinización microbiana implica no solo diseño de sistemas de purificación de agua, sino también la recolección de información a través de entrevistas para evidenciar desafíos potenciales como la capacitación de miembros de la comunidad en el mantenimiento y funcionamiento de estos sistemas, sino que también proporcionará conocimientos y habilidades valiosas a las personas, lo que les permitirá ser autosuficientes en el mantenimiento de su suministro de agua potable, la educación también jugará un papel crucial en la promoción de prácticas de higiene seguras y en la concientización sobre la importancia del agua potable para la salud y el desarrollo general de la comunidad, además, se espera que la implementación de la tecnología de desalinización microbiana tenga un impacto positivo en el medio ambiente local al reducir la dependencia de las fuentes de agua contaminadas, se puede esperar una disminución en la contaminación de los cuerpos de agua cercanos.

16.3.Objetivo 3. Diseñar una Celda de Desalinización Microbiana evaluando la viabilidad de aplicación en una comunidad vulnerable del municipio de Riohacha.

En las comunidades rurales de Riohacha, La Guajira, el acceso al agua potable se ha convertido en una lucha cotidiana, marcada por la escasez y la contaminación, estas áreas, ubicadas en un entorno árido y desértico, enfrentan problemas críticos en términos de suministro de agua segura y confiable, las fuentes tradicionales, como pozos y jagüeyes, que alguna vez fueron los pilares de estas comunidades, se han vuelto cada vez más insuficientes y contaminadas, esta situación se agrava aún más en las comunidades indígenas, donde el acceso al agua potable es intermitente y, a menudo, insalubre, la falta de acceso regular al agua potable ha llevado a problemas graves de salud, especialmente entre los niños, y ha contribuido a altas tasas de desnutrición e infecciones, en estas condiciones, las personas se han visto obligadas a almacenar agua en albercas subterráneas y jagüeyes, enfrentando no solo la escasez, sino también la contaminación. Además, los problemas de acceso al agua han llevado a una baja ingesta diaria de agua por parte de la población, con algunos individuos consumiendo tan solo 5 litros de agua al día.

En medio de estas dificultades, surge la esperanza en forma de tecnología: la desalinización microbiana. Este enfoque ofrece una solución prometedora para las comunidades que han estado luchando con la falta de agua potable, la tecnología de celda de desalinización microbiana (CDM) se presenta como una vía para convertir agua salada en agua potable utilizando microorganismos específicos para evaluar la viabilidad de esta tecnología en las comunidades vulnerables de Riohacha, se llevarán a cabo entrevistas exhaustivas con diversos miembros de estas comunidades, estas entrevistas arrojaron información crítica sobre la magnitud del problema y resaltaron la urgencia de encontrar soluciones prácticas y sostenibles para la elaboración de la CDM. La discusión de los resultados esperados de un proyecto de desalinización microbiana en las comunidades rurales de Riohacha, La Guajira, se presenta como un análisis detallado de las potenciales mejoras que esta tecnología podría ofrecer a estas comunidades. Al considerar los desafíos actuales relacionados con el acceso limitado y la calidad

insuficiente del agua potable, el proyecto de desalinización microbiana representa una vía prometedora hacia la transformación de esta situación precaria.

En el marco de nuestro análisis sobre la calidad del agua en la comunidad, se ha realizado un estudio basado en entrevistas directas con miembros de la zona. Se tomó como referencia un promedio de consumo de agua de 5 litros por persona, obtenido de las respuestas recopiladas durante estas entrevistas. Cabe destacar que este valor se ajusta a los hábitos y patrones de consumo específicos de la comunidad. Es importante señalar que, aunque este promedio de consumo se encuentra por debajo de los estándares mínimos recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), hemos identificado que el agua suministrada cumple con los parámetros de calidad, a pesar de no alcanzar la cantidad mínima recomendada por la OMS, el agua de la comunidad satisface los criterios establecidos para ser considerada potable según los estándares locales, es decir que las variaciones en el consumo de agua y la calidad del suministro cumple con los requisitos esenciales para el consumo humano.

Uno de los resultados esperados se refiere directamente a la mejora en el acceso al agua potable, se anticipa que la implementación de la tecnología de desalinización microbiana proporcionará una fuente confiable de agua potable para las comunidades rurales, este acceso ininterrumpido al agua potable no solo cubrirá las necesidades básicas de las personas, sino que también tiene el potencial de transformar la vida diaria de las comunidades, con un suministro estable de agua potable, las familias podrán llevar a cabo sus actividades diarias de manera más efectiva y saludable, aliviando así la carga diaria que enfrentan debido a la escasez de agua, además del aumento en el acceso al agua potable, se esperan mejoras significativas en la salud y el bienestar de las personas en estas comunidades, la falta de acceso regular a agua potable segura ha llevado a numerosos problemas de salud, incluyendo infecciones gastrointestinales, desnutrición e incluso la muerte, especialmente en niños, con la introducción de agua potable de alta calidad a través de la desalinización microbiana, se espera una disminución drástica en las enfermedades relacionadas con el agua, esto, a su vez, conducirá a una mejora en la calidad de vida y en la productividad de las personas, ya que estarán menos enfermas y podrán participar más plenamente en actividades educativas y económicas.

El diseño de la celda de desalinización con dimensiones compactas, específicamente de un metro de largo, ancho y alto, es una estrategia clave para abordar las limitaciones de transporte en áreas rurales y limitaciones económicas. Esta elección se alinea con la necesidad de facilidad de transporte, instalación y operación en entornos donde la infraestructura puede ser limitada. A continuación, se presenta un análisis destacando los beneficios de estas dimensiones:

Tabla 15. Beneficios de un diseño compacto

Transporte y accesibilidad	Las dimensiones compactas de la celda facilitan su transporte en áreas rurales, donde la logística puede ser un desafío. Al ser de un metro de largo, ancho y alto, la celda puede ser transportada con relativa facilidad incluso en condiciones de acceso limitado, como caminos rurales o áreas remotas
Eficiencia espacial	La celda compacta maximiza la eficiencia del espacio disponible. En entornos rurales,

	donde el espacio puede ser un recurso limitado, un diseño compacto permite la instalación en ubicaciones estratégicas sin ocupar grandes extensiones de terreno.
Adaptabilidad a diferentes escenarios	La versatilidad de un diseño de celda de dimensiones compactas facilita su implementación en diversas situaciones. Puede ser utilizada tanto en hogares individuales como en comunidades más grandes, adaptándose a las necesidades específicas de cada ubicación.
Simplificación del proceso de implementación	Al reducir las dimensiones de la celda, se simplifica el proceso de instalación y puesta en marcha. Esto es especialmente importante en áreas rurales donde la disponibilidad de mano de obra capacitada puede ser limitada. Un diseño más simple facilita la capacitación y operación por parte de la comunidad local.
Sostenibilidad y menor huella ambiental	Las dimensiones compactas también pueden traducirse en un menor uso de materiales y energía en la construcción de la celda. Esto contribuye a una menor huella ambiental y puede ser fundamental en entornos rurales donde los recursos son limitados y la sostenibilidad es un aspecto crucial
Reducción de costos de transporte	Las dimensiones compactas de la celda significan que los costos de transporte se reducen considerablemente. Equipos más pequeños son más fáciles y económicos de transportar, especialmente en áreas rurales donde la infraestructura de transporte puede ser limitada. Esto contribuye a una disminución significativa en los gastos logísticos.
Instalación y mantenimiento más económicos	La simplicidad del diseño compacto no solo facilita la instalación, sino que también reduce los costos asociados con la capacitación y mantenimiento. Equipos más pequeños y simples tienden a requerir menos atención y son más asequibles de mantener a lo largo del tiempo.
Accesibilidad financiera para comunidades Rurales	La asequibilidad asociada con un diseño más pequeño hace que la tecnología de

	desalinización sea más accesible para comunidades rurales con presupuestos limitados. Esto amplía la viabilidad financiera y la capacidad de implementación en contextos donde los recursos económicos son escasos.
--	---

Fuente. Elaboración propia.

Además de los beneficios directos para la salud, la disponibilidad de agua potable mejorada también tendrá un impacto positivo en la higiene y el saneamiento en estas comunidades, las personas podrán mantener estándares de higiene personal más altos y las instalaciones de saneamiento podrán funcionar de manera más eficiente, mejorando así las condiciones generales de salud y bienestar, otro resultado esperado es el empoderamiento de las comunidades a través de la educación, la implementación de la tecnología de desalinización microbiana implica no solo diseño de sistemas de purificación de agua, sino también la recolección de información a través de entrevistas para evidenciar desafíos potenciales como la capacitación de miembros de la comunidad en el mantenimiento y funcionamiento de estos sistemas, sino que también proporcionará conocimientos y habilidades valiosas a las personas, lo que les permitirá ser autosuficientes en el mantenimiento de su suministro de agua potable, la educación también jugará un papel crucial en la promoción de prácticas de higiene seguras y en la concientización sobre la importancia del agua potable para la salud y el desarrollo general de la comunidad, además, se espera que la implementación de la tecnología de desalinización microbiana tenga un impacto positivo en el medio ambiente local al reducir la dependencia de las fuentes de agua contaminadas, se puede esperar una disminución en la contaminación de los cuerpos de agua cercanos.

El objetivo de diseñar una Celda de Desalinización Microbiana para evaluar su viabilidad de aplicación en una comunidad vulnerable del municipio de Riohacha representa un paso crucial hacia el acceso sostenible al agua potable en áreas con recursos limitados. La celda diseñada, con sus dimensiones específicas y componentes clave, se toma como una solución prometedora para abordar la crisis de agua en la región, primero se realiza el diseño de las placas de membrana es fundamental, estas membranas demuestran ser esenciales para la eficacia del proceso, la capacidad de estas membranas para permitir el flujo controlado de agua de pozo profundo mientras retiene las sales y otras impurezas es la base misma de la desalinización, la tecnología de membranas ha sido probada y confiable en múltiples aplicaciones, lo que asegura una sólida base científica para el diseño propuesto.

El sistema de flujo de agua de pozo profundo y el sistema de recolección de agua dulce también se revelan como componentes importantes en este diseño, el flujo de agua de pozo profundo debe ser uniforme y controlado para garantizar una distribución equitativa sobre las membranas, lo que optimiza la eficiencia del proceso de desalinización, por otro lado, el sistema de recolección de agua dulce debe ser eficaz para asegurar la disponibilidad constante de agua potable para la comunidad, este estará conectado a las bombas que tienen estas comunidades para extraer agua de los pozos en donde almacenan el recurso hídrico, la eficiencia y confiabilidad de estos sistemas son clave para el éxito a largo plazo de esta iniciativa. La introducción de un sistema de aireación es otro aspecto significativo del diseño, la provisión adecuada de oxígeno a las bacterias involucradas en el proceso de desalinización microbiana es esencial para mantener su actividad y, por ende, la eficacia del sistema. Esta consideración refleja una comprensión

profunda de los procesos biológicos involucrados y demuestra un enfoque integral para abordar los desafíos de la desalinización.

La simulación del flujo de agua y la concentración de sal a través del modelo 3D proporciona una ventaja adicional, esta capacidad de simulación permite una evaluación detallada de diferentes condiciones operativas, los resultados obtenidos de estas simulaciones pueden usarse para mejorar el diseño existentes, además, ofrecen una valiosa visión de cómo el sistema podría comportarse en diversas circunstancias, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas en futuras implementaciones, la simulación del flujo de agua en la celda permite probar diferentes configuraciones y condiciones sin necesidad de construir prototipos físicos, ahorrando tiempo y recursos, además, ayuda a identificar problemas potenciales y a realizar ajustes antes de la implementación práctica, mejorando la eficiencia y reduciendo costos. La simulación también facilita la optimización de variables clave, como la velocidad del flujo y las características de las membranas, para lograr una desalinización eficiente y económica. Además, al analizar fenómenos complejos, como la interacción de las moléculas de agua y sal con las membranas, estas simulaciones ayudan a mejorar la tecnología de desalinización. El diseño de esta Celda de Desalinización Microbiana representa un paso significativo hacia la mejora de la calidad de vida en la comunidad vulnerable de Riohacha, al abordar la escasez de agua potable de manera innovadora y científica, este proyecto tiene el potencial de servir como un modelo para otras comunidades en situaciones similares. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a pesar de los avances, aún existen desafíos que deben ser superados, como el mantenimiento a largo plazo y la capacitación comunitaria para el manejo adecuado de la tecnología. Estos desafíos, junto con los logros obtenidos, proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la desalinización microbiana, marcando un camino donde el acceso al agua potable sea una realidad para todas las comunidades, sin importar sus circunstancias económicas o geográficas.

En el estudio titulado "Determinación de la viabilidad de un modelo de desalinización de agua de pozo acoplado a una celda microbiana de desalinización para comunidades vulnerables en Riohacha, Guajira," Daza González y Rodríguez Mancipe (2021) investigaron la posibilidad de implementar un modelo innovador de desalinización para comunidades vulnerables en Riohacha, Guajira. El enfoque del estudio implicó la combinación de desalinización de agua de pozo con tecnología de celda microbiana, una estrategia prometedora para proporcionar acceso a agua potable en áreas con recursos limitados. En su investigación, los autores se centraron en la viabilidad de este modelo para comunidades específicas en Riohacha, considerando la vulnerabilidad de estas áreas y la necesidad urgente de soluciones sostenibles para el suministro de agua potable. La combinación de desalinización y tecnología microbiana presenta un enfoque multidisciplinario, aprovechando tanto los procesos químicos de desalinización como la actividad biológica de los microorganismos para purificar el agua de pozo, al comparar este estudio con el diseño previamente discutido para la celda de desalinización microbiana en Riohacha, se observan similitudes y diferencias clave. Ambos enfoques reconocen la importancia de la desalinización para convertir agua de pozo con condiciones salobres en agua potable, abordando así la escasez de agua en comunidades vulnerables. Sin embargo, el estudio de Daza González y Rodríguez Mancipe (2021) se enfoca específicamente en la integración de la tecnología de celda microbiana, lo que implica la participación activa de bacterias para eliminar las impurezas en el agua.

En el diseño previamente discutido, se menciona la necesidad de placas de membrana para la desalinización, un componente esencial en la mayoría de los procesos de desalinización. Sin

embargo, el estudio de Daza González y Rodríguez Mancipe (2021) no proporciona detalles específicos sobre las estructuras de membrana utilizadas en su modelo sería valioso explorar si estas membranas se basan en nanotecnología o materiales orgánicos como nanocelulosa, que se ha considerado prometedor en investigaciones previas, además, el estudio mencionado no detalla la simulación y optimización del proceso a través de un modelo 3D, como se discutió anteriormente, la simulación es esencial para comprender mejor el flujo de agua a través de la celda y la concentración de sal en el agua dulce producida, esta herramienta permite ajustar y perfeccionar el diseño del sistema para garantizar la máxima eficiencia en la producción de agua potable. Ambos enfoques apuntan a solucionar el problema crítico del acceso al agua potable en comunidades vulnerables en Riohacha, Guajira. Mientras que el diseño previamente discutido se basa en tecnologías establecidas de desalinización con membranas y utiliza simulaciones 3D para la optimización, el estudio de Daza González y Rodríguez Mancipe (2021) explora la integración de la tecnología microbiana como un componente crucial del proceso. Ambos enfoques ofrecen perspectivas valiosas, y sería beneficioso para futuras investigaciones considerar una combinación de estos métodos para desarrollar soluciones completas y efectivas para el suministro de agua potable en estas comunidades vulnerables.

Por otro lado el artículo titulado "Diseño conceptual de una planta desalinizadora alimentada con energía renovable en el Caribe colombiano," escrito por Visbal Navarro en 2013, se enfoca en proponer un diseño innovador para una planta desalinizadora en el Caribe colombiano, alimentada exclusivamente por energía renovable. La necesidad de soluciones sostenibles para combatir la escasez de agua potable en la región del Caribe colombiano es el motor detrás de esta investigación, el autor aborda la problemática del acceso limitado al agua potable en el Caribe colombiano, una preocupación compartida con las comunidades vulnerables en Riohacha, Guajira. Visbal Navarro se enfoca en la integración de tecnologías de desalinización con fuentes de energía renovable, lo cual es crucial para comunidades que a menudo carecen de acceso confiable a la red eléctrica tradicional, comparando este enfoque con los estudios previamente discutidos sobre desalinización microbiana y nanotecnología de membranas, se destacan similitudes y diferencias fundamentales, en el diseño de Visbal Navarro, el énfasis está en utilizar energía renovable para alimentar la planta desalinizadora. Esto implica la consideración de tecnologías como la energía solar, eólica u otras fuentes de energía limpia y abundante disponibles en la región del Caribe colombiano.

A diferencia de la propuesta de desalinización microbiana que se basa en la actividad bacteriana para purificar el agua de pozo, y de la tecnología de membranas de nanocelulosa que utiliza estructuras de membrana avanzadas para filtrar las impurezas, el enfoque de Visbal Navarro se centra en la fuente de energía que impulsa todo el proceso de desalinización. En esencia, es un enfoque híbrido que considera tanto la fuente de energía como las técnicas de desalinización, sin embargo, el artículo de Visbal Navarro no proporciona detalles específicos sobre las tecnologías de desalinización utilizadas en su planta conceptual, es importante conocer si este diseño se basa en tecnologías de membranas, como la ósmosis inversa, o si explora métodos innovadores, como la desalinización por destilación solar, que son especialmente adecuados para regiones con altos niveles de radiación solar, como el Caribe colombiano, además, la cuestión de la disponibilidad de recursos y la sostenibilidad a largo plazo no se profundiza en el artículo. ¿De dónde se obtendrían los materiales para construir la planta? ¿Cómo se manejarían los residuos producidos por el proceso de desalinización? Estas preguntas son esenciales para evaluar la viabilidad a largo plazo de cualquier proyecto de desalinización, especialmente en contextos donde los recursos son limitados, el artículo de Visbal Navarro destaca la importancia de combinar tecnologías de desalinización con fuentes de energía renovable para abordar la escasez de agua

potable en el Caribe colombiano. Aunque este enfoque ofrece una perspectiva valiosa, es crucial abordar preguntas específicas sobre las tecnologías de desalinización utilizadas, la disponibilidad de recursos y la gestión sostenible de los residuos para crear soluciones efectivas y sostenibles para las comunidades vulnerables en Riohacha, Guajira, y en otras regiones con desafíos similares.

Aunque su propuesta se basa en un enfoque híbrido que considera tanto la fuente de energía como las técnicas de desalinización, el artículo no proporciona detalles específicos sobre las tecnologías de desalinización utilizadas en su planta conceptual. Esto contrasta con nuestro proyecto de desalinización microbiana en comunidades rurales de Riohacha. En comparación con la tecnología de membranas de nanocelulosa, que utiliza estructuras de membrana avanzadas para filtrar las impurezas del agua, nuestro enfoque de desalinización microbiana se presenta como una alternativa innovadora. Mientras que las membranas de nanocelulosa se basan en materiales avanzados y procesos sofisticados, nuestra tecnología se centra en la actividad biológica de microorganismos para eliminar la sal del agua de pozo de una manera más sostenible y rentable para las comunidades rurales de Riohacha. Además, mientras que el artículo de Visbal Navarro no profundiza en tecnologías específicas como la ósmosis inversa o la desalinización por destilación solar, nuestro proyecto de desalinización microbiana ofrece una solución específica y detallada para abordar las necesidades de las comunidades rurales en Riohacha, Guajira.

Por último la selección de microorganismos para la celda de desalinización, como *Haloquadratum walsbyi* y otros mencionados, se basa en sus características adaptativas a entornos salinos y en sus capacidades metabólicas relevantes. Estos microorganismos han demostrado habilidades como halófilos extremos, lo que significa que han evolucionado para prosperar en condiciones de alta salinidad, una característica crítica para la eficacia en la desalinización.

Haloquadratum walsbyi, por ejemplo, es una arquea halófila extrema que se encuentra naturalmente en ambientes salinos, mostrando una afinidad innata por condiciones salinas elevadas. Además, su capacidad de fotosíntesis anaeróbica podría contribuir a procesos de desalinización. *Shewanella* spp es elegido por su electroactividad y capacidad para transferir electrones, lo que podría ser beneficioso en sistemas de celdas de desalinización. *Dunaliella* salina se destaca por su capacidad de acumular sales, y *Desulfovibrio* spp. por su implicación en la reducción de sulfatos. Estas características específicas hacen que estos microorganismos sean opciones potenciales para optimizar la eficiencia en la remoción de sal en celdas de desalinización.

Haloquadratum walsbyi emerge como una elección prometedora para la celda de desalinización en entornos como La Guajira debido a su adaptación única a condiciones de alta salinidad. Esta arquea halófila ha evolucionado naturalmente para prosperar en ambientes salinos extremos, lo cual alinea sus características con las condiciones específicas de la región. Su capacidad de fotosíntesis anaeróbica puede ser particularmente beneficiosa en procesos de desalinización, ofreciendo una perspectiva única en la conversión de energía eléctrica en actividades metabólicas. La afinidad innata de *Haloquadratum walsbyi* por ambientes salinos y su capacidad para aclimatare a cambios en la concentración de sal lo posicionan como un microorganismo altamente adaptado a los desafíos particulares de La Guajira, destacando su potencial para mejorar la eficiencia de la desalinización en esta región específica.

17. Conclusiones

Al realizar el análisis de las entrevistas realizadas nos acercamos a la realidad de las comunidades rurales de Riohacha, puede notar escasez de agua potable que afecta profundamente la calidad de vida de sus habitantes, las entrevistas detalladas con miembros de la comunidad y personas locales proporcionaron una visión clara y cruda de los desafíos diarios enfrentados, desde la falta de acceso regular al agua potable hasta la contaminación de las fuentes locales, la información recopilada la urgente necesidad de intervenciones sostenibles y equitativas, la innovadora tecnología de Celda de Desalinización Microbiana (CDM) emerge con su capacidad para transformar agua de pozo con condiciones salobres en agua potable, combinada con un diseño considerado a la participación activa de la comunidad, ofrece una solución prometedora, este enfoque integral, que fusiona conocimientos técnicos y comprensión profunda de las necesidades locales, representa un paso crucial hacia la mejora del acceso al agua potable en Riohacha. El diseño de la CDM no está exento de obstáculos significativos, las entrevistas revelaron desafíos como la falta de confianza debido a promesas incumplidas y la necesidad de educación continua, sin embargo, estas dificultades se ven contrarrestadas por la voluntad incansable de la comunidad de aprender y colaborar. La introducción de tecnologías innovadoras, como las membranas de nanocelulosa y los sistemas de desalinización, demuestra cómo la ciencia puede convertirse en un aliado contra la escasez de agua, además, la colaboración activa entre estudiantes, organizaciones gubernamentales y ONGs resalta la importancia de un enfoque interdisciplinario y colaborativo, este proyecto no solo representa una solución tecnológica, sino también un testimonio del poder transformador de la colaboración y la educación, brindando soluciones a comunidades que han enfrentado desafíos significativos durante demasiado tiempo.

La información detallada recopilada a través de entrevistas, análisis y simulaciones proporciona la base sólida para un cambio significativo, la construcción de una Celda de Desalinización Microbiana, diseñada y respaldada por datos concretos, se perfila como una solución para Riohacha. Además, la educación y la transparencia se destacan como pilares fundamentales para garantizar la aceptación y la sostenibilidad a largo plazo de estas soluciones innovadoras, la colaboración continua con la comunidad y el compromiso con la equidad son esenciales para transformar esta visión en una realidad no muy lejana del contexto de nuestro país, este proyecto no solo representa una respuesta a una crisis en la región, sino también una alternativa del potencial ilimitado cuando la ingeniería ambiental se combina con técnicas y el compromiso de mejorar sistemas y prototipos tecnológicos en donde los resultados de la simulación son consistentes con los resultados de experimentos reales.

Por otra parte los modelos de laboratorio de la Celda de Desalinización Microbiana (CDM) presentan varios limitantes que afectan su aplicabilidad a gran escala. En entornos de laboratorio, las condiciones controladas pueden no reflejar completamente las complejidades y variaciones del ambiente real. La optimización de microorganismos y condiciones operativas en modelos reducidos puede no representar con precisión las interacciones a largo plazo en entornos naturales. Además, la durabilidad y la eficiencia de los materiales de electrodos pueden variar en condiciones del mundo real, lo que plantea desafíos para la extrapolación de resultados. La escala de producción en modelos de laboratorio también puede no ser representativa de la demanda de agua a nivel comunitario. Por lo tanto, la transición de modelos de laboratorio a implementaciones a gran escala requiere consideraciones adicionales para abordar estos desafíos y garantizar la eficacia y sostenibilidad de la CDM en entornos prácticos.

18. Recomendaciones

Con el objetivo de desarrollar un modelo tridimensional de la Celda de Desalinización Microbiana (CDM) digital, es crucial considerar las dimensiones compactas propuestas de un metro, enfocándose en la optimización del rendimiento para la generación de agua potable a partir de agua salobre. Este enfoque, alineado con la búsqueda de opciones sustentables, asegura una mayor accesibilidad y aplicabilidad en comunidades rurales. La elección de un diseño tridimensional permite una visualización detallada y facilita la evaluación de la eficiencia del proceso en términos de desalinización y producción de agua potable.

La comparación de diversas técnicas de desalinización en la CDM constituye un paso esencial para determinar la alternativa que logre el mayor grado de desalinización y producción de agua potable. Este análisis permitirá seleccionar la técnica más eficiente y adaptable a las condiciones específicas de las comunidades rurales, maximizando así los beneficios del proyecto.

La evaluación de criterios económicos, sociales y ambientales es fundamental para comprender la viabilidad integral de la tecnología de CDM en las comunidades rurales de Riohacha. Este análisis proporcionará información valiosa sobre la sostenibilidad financiera, el impacto social y las consideraciones ambientales, asegurando que la implementación de la tecnología no solo sea eficiente, sino también ética y socialmente responsable.

Finalmente, el diseño del modelo 3D de la CDM debe incorporar estos hallazgos y consideraciones, evaluando la viabilidad de aplicación específica en una comunidad rural de Riohacha. La adaptabilidad y accesibilidad de la tecnología deben reflejarse en el diseño tridimensional, permitiendo una representación precisa de cómo la CDM puede integrarse de manera efectiva en entornos rurales, contribuyendo a la mejora de las condiciones de vida y la seguridad hídrica en estas comunidades.

Se recomienda realizar estudios detallados y pruebas piloto para determinar la presión óptima para un sistema particular, considerando la eficiencia y la vida útil de los componentes.

Para maximizar el potencial de producción de energía de la Celda de Desalinización Microbiana (CDM), es esencial comenzar con la optimización de microorganismos exoelectrogénicos. Se deben realizar investigaciones detalladas para identificar cepas eficientes que puedan potenciar la actividad redox, mejorando así la generación de energía de la celda.

Un aspecto crucial a explorar en estudios de laboratorio es la investigación de materiales para electrodos. Experimentar con diversos materiales permitirá identificar aquellos que facilitan la transferencia de electrones de manera más eficiente, optimizando la conductividad eléctrica y, por ende, la eficiencia de la celda.

La variación de parámetros operativos es otra recomendación importante. Realizar pruebas bajo diferentes condiciones, como variaciones en la salinidad del agua, la temperatura y el flujo, proporcionará información valiosa sobre cómo estos factores influyen en el rendimiento de la celda.

En estudios de laboratorio, es fundamental determinar experimentalmente la presión óptima para la ósmosis inversa. La variación de la concentración de salinidad y la evaluación de condiciones

específicas de la celda ayudarán a establecer las condiciones ideales para mejorar la eficiencia del proceso.

La eficiencia energética de la CDM debe ser objeto de un análisis detallado. Calcular la relación entre la energía producida y la energía consumida permitirá optimizar el rendimiento del sistema, identificando áreas de mejora y eficiencia.

Para obtener resultados más significativos, se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo durante los estudios de laboratorio. Esto permitirá registrar parámetros clave, como la producción de energía, la salinidad del agua y la actividad microbiana, facilitando ajustes en tiempo real y la recopilación de datos valiosos.

Se recomienda implementar un sistema de pretratamiento y postratamiento del agua en el proceso de desalinización mediante la Celda de Desalinización Microbiana (CDM). El pretratamiento debería abordar la eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica y contaminantes para proteger las membranas y optimizar la eficiencia de la ósmosis inversa. Por otro lado, el postratamiento debe centrarse en ajustar la salinidad final del agua desalinizada y garantizar la eliminación de cualquier residuo o subproducto indeseado. Integrar estos procesos complementarios contribuirá significativamente a mejorar la calidad del agua producida, asegurando su cumplimiento con los estándares de potabilidad y minimizando impactos ambientales adversos.

19. Referencias bibliográficas

- Alarcón Herazo, C. V., Amaya Gomez, L. J., & Díaz Monroy, O. J. (2015). *Análisis comparativo entre acuíferos costeros y plantas desalinizadoras como fuente de suministro para poblaciones con escasez de fuentes hídricas superficiales* [Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/1a6817cd-6700-4a6a-a011-006d4a4b70b5/content>
- Alonso, J. A., & Vergara, G. (2015). Wayúu: Pueblo, territorio y paisaje. Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- Anderson, J. (2021). *Environmental Engineering Principles*. McGraw-Hill Education.
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Cengage learning.
- Araoz Rojas, J. A. (2018). Elaboración de un Plan de Seguridad del Agua PSA, para el aprovechamiento de las fuentes hídricas que abastecen los municipios de Dibulla y Riohacha.
- Bonell Parada, H. D. (2015). Sistema De Desalinización De Agua Autosostenible Para Zonas No Interconectadas. Universidad de los Andes.
- Brown, A., & Green, B. (2018). Sustainable Engineering and Environmental Engineering: Creating Synergy. *Environmental Engineering Science*, 35
- Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 14(1), 5-11.
- Cao, X., Huang, X., Liang, P., Xiao, K., Zhou, Y., Zhang, X., & Logan, B. E. (2009). A new method for water desalination using microbial desalination cells. *Environmental Science and Technology*, 43(18), 7148–7152. <https://doi.org/10.1021/es901950j>
- Castillo, J. M. (2017). Crisis en La Guajira: Una Aproximación Bourdiana [Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/40495/u808492.pdf?sequence=1>
- Chaparro Diaz, L. K. (2020). *Celda De Desalinización Microbiana Con Biocátodo Fotosintético: Generación De Energía, Desalinización Y Reducción De Dqo*. 1–34. https://ebuah.uah.es/xmlui/bitstream/handle/10017/44051/TFM_Chaparro_Diaz_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chen, Y., Zhou, F., Li, G., & Xu, Y. (2009). MUST: a system for identification of miniature inverted-repeat transposable elements and applications to *Anabaena variabilis* and *Haloquadratum walsbyi*. *Gene*, 436(1-2), 1-7.
- Chilón Rivera, L. J., & Deza Ayasta, L. I. (2014). Estudio de factibilidad técnica y económica de la desalinización del agua de mar utilizando energía solar como energía renovable en Lambayeque, 2014.

Colomina Montava, J. (2016). *Diseño de un planta desalinizadora con sistema de osmosis inversa con producción de 20000 m3/día* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

Contreras, P., & Montecinos, E. (2019). Democracia y participación ciudadana: Tipología y mecanismos para la implementación. *Revista de Ciencias Sociales*, 25(2), 178-191.

Cohen, Y., & Cooley, H. (2019). Seawater Desalination. *Water Encyclopedia*. <https://www.waterencyclopedia.com/Re-St/Seawater-Desalination.html>

Corporación Autónoma Regional de La Guajira. (2021). Desierto de La Guajira: Un ecosistema valioso. <https://www.claguajira.gov.co/servicios/desiertodelaguajira/>

Correa Assmus, G. (2017). Acceso al agua, pobreza y desarrollo en Colombia. *Revista de la Universidad de La Salle*, (72), 27-46.

Daza González, D. F., & Rodriguez Mancipe, L. A. (2021). *Determinación de la viabilidad de un modelo de desalinización de agua de mar acoplado a una Celda Microbiana de Desalinización para comunidades vulnerables en Riohacha, Guajira* [Universidad El Bosque]. https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/6765/Tesis_Final_Daniel_Daza_Laura_Rodriguez.pdf?sequence=6&isAllowed=y

Decreto 1575 de 2007, (2007). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007>

Decreto 4728 de 2010, (2010). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=41009>

Decreto 2099 de 2016, (2016). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78858>

Decreto 1090 de 2018, (2018). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87181>

Decreto 2811 de 1974, (2021). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>

Decreto 1076 de 2015, (2023). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
FEJES, M. E., SANTOS, A., CALIL, M. R., FRANZOLIN, F., MORITA, E. M., & TOLENTINO-NETO, L. C. (2004). Implementación de proyectos de investigación en ciencias vía telemática. *Novedades Educativas: ideas y recursos*, Buenos Aires, 16(163), 04-09.

Doria Arugemdo, C., López Torres, A., & Deluquez Vilorio, H. (2018). Calidad del agua de las zonas rurales de la alta y media Guajira.

Equipo editorial de Indeed. (2023, 19 febrero). *Qué hace un ingeniero ambiental y su rol para el futuro*. Indeed. <https://mx.indeed.com/orientacion-profesional/como-encontrar-empleo/que-hace-ingeniero->

[ambiental#:~:text=Qué%20es%20la%20ingeniería%20ambiental,del%20suelo%20y%20la%20química.](#)

Fennix Agudelo, M. A., & Miranda Castro, W. P. (2015). Bacterias halófilas del Norte de Colombia.

Fernandez Contreras, M. (2012). Obtención de agua potable a partir de agua de mar por congelación - fusión.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18378/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Fernando, F., Sarmiento, G., Camilo, R., Bohórquez, C., Andrés, C., & Olivella, P. (2015). *Escasez de agua en el departamento de La Guajira, Colombia*.
<https://revia.areandina.edu.co/index.php/Cc/article/view/1965/1884>

Garcia, J. C. (2016). *Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de osmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de energía* (Doctoral dissertation, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea).

García Martínez, C. (2017). Análisis termodinámico de procesos de desalación de agua de mar basados en ósmosis directa.

Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2021). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 500, 114849.

Girón, D. (2009). Evaluación y mapeo de la calidad de agua y nivel freático en pozos artesanales para abastecimiento humano y su posible relación con la red hidrológica en el casco urbano de la ciudad de Chiquimula, 2009. *Universidad de San Carlos de Guatemala, Chiquimula*.

Gómez Duque, Á. M. (2021). El departamento de la Guajira, Colombia.

Gómez García, A.N. (2011). Hacia una arqueología del paisaje en Colombia: reflexiones necesarias. *Boletín de Antropología Universidad de Antioquia*, 25(42), 231-254.[fecha de consulta 8 de Octubre de 2022]. ISSN: 0120-2510. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55722568009>

Gobierno de La Guajira. (2021). La Guajira: La esquina extrema de América.
<http://www.laguajira.gov.co/index.shtml>

Guzmán Pérez, A. (2019). *Evaluación de métodos de obtención de agua para su uso en agricultura alternativa en el corregimiento de Camarones, La Guajira* [Universidad El Bosque].
https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/8490/Guzmán_Pérez_Alejandro_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hagiya, H., Kimura, K., Nishi, I., Yamamoto, N., Yoshida, H., Akeda, Y. y Tomono, K. (2018). Bacteriemia por *Desulfovibrio desulfuricans*: reporte de un caso y revisión de la literatura. *Anaerobio*.

Hernández Sampieri, R. (2014). Metodología De La Investigación (R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, & M. del P. Baptista Lucio (eds.); 6th ed.). McGRAW-HIL. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>

Herrera, A., Vela, L., Morales, G., & Castro, I. (2016). Implementación de ósmosis directa y nanoaditivos magnéticos para desalinización de agua. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 19(1), 199-206.

Hossain, M. A., et al. (2019). Desalination of seawater and brackish water by forward osmosis technique: A review. *Desalination*, 456, 19-43.

Imitola González, A. A., Ramírez Gutiérrez, J. A., & López Ortega, A. D. (2019). Diseño de una planta desalinizadora de agua de mar en la zona de la media-alta Guajira.

Kim, D. J., Kim, T. H., & El-Din, M. G. (2021). A review of fouling in pressure-driven membrane processes for water reclamation. *Separation and Purification Technology*, 271, 118875.

Ley 9 de 1979, (1979).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1177>

Ley 99 de 1993, (2023).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>

Leyton, Y. E., Letelier, A. S., Mata, M. T., & Riquelme, C. E. (2017). *Bacillus pumilus* marinos inhibidores de la fijación de microalgas a sustratos artificiales. *Información tecnológica*, 28(2), 181-190.

Navarro Chao, M. (2017). Incorporación de celdas de desalación microbianas a pequeños sistemas de desalación con energías renovables.

Macías Gállego, C. (2016). Aerogeles de carbono y compuestos funcionales híbridos con propiedades adecuadas para electrodos en desionización capacitiva.

Majarres F, G. (1964). *Geohidrología de La Guajira*.
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B20/32002010001460/documento/pdf/0101014601101000.pdf>

Matthews, E. J., Kruhlak, N. L., Cimino, M. C., Daniel Benz, R., & Contrera, J. F. (2006). An analysis of genetic toxicity, reproductive and developmental toxicity, and carcinogenicity data: I. Identification of carcinogens using surrogate endpoints. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 44, 85–86. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2005.11.003>

Martín-Rodríguez, A. J., Martín-Pujol, O., Artiles-Campelo, F., Bolaños-Rivero, M., & Römling, U. (2017). *Shewanella* spp. infections in Gran Canaria, Spain: retrospective analysis of 31 cases and a literature review. *JMM Case Reports*, 4(12).

Martinez, M. S. L. (2014). Estudio de tratamiento de aireación prolongada para aguas residuales utilizando como matriz agua de mar. *CENTRO*.

Mendoza Montalvo, J. (2016). Identificación y control multivariable de una planta piloto de desalinización por osmosis Inversa

Milne, S. (24 de Agosto de 2021). Cómo la escasez de agua está provocando cada vez más guerras en el mundo (y dónde serán los próximos conflictos). *BBC News Mundo*. Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/vert-fut-58259908>

Mishra, A., & Jha, B. (2009). Isolation and characterization of extracellular polymeric substances from micro-algae *Dunaliella salina* under salt stress. *Bioresource technology*, 100(13), 3382-3386.

Monsalve, M. M. (2016). Habitantes microscópicos de la comunidad Wiwa. *Universitas Científica*, 19(2), 28-33.

Ortiz, G. (2015). La entrevista cualitativa. *Técnicas de Investigación Cuantitativas y Cualitativas*.

Ortiz, J., Miranda, J., Ortiz, L., Navarro, Y., & Mattar, S. (2015). Seroprevalencia de *Rickettsia* sp. en indígenas Wayuü de la Guajira y Kankuamos del Cesar, Colombia. *Infectio*, 19(1), 18-23.

Ortiz Ortiz, D. I. (2019). *Determinación del efecto del tipo de membrana sobre las características de funcionamiento de una celda de combustible microbiana para la producción de energía eléctrica* (Bachelor's thesis).

Patel, M., Patel, S. S., Kumar, P., Mondal, D. P., Singh, B., Khan, M. A., & Singh, S. (2021). Advancements in spontaneous microbial desalination technology for sustainable water purification and simultaneous power generation: A review. *Journal of Environmental Management*, 297(June), 113374. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113374>

Ramírez-Moreno, M., Ródenas, P., Aliaguilla, M., Bosch-Jiménez, P., Borrás, E., Zamora, P., ... & Esteve-Núñez, A. (2021). Celdas de desalinización microbiana: producción de agua potable con bajo coste energético.

Ramos Nemocon, J. S., & Ramos Quintero, J. F. (2017). Identificación de puntos de extracción de agua subterránea en la media Guajira a partir de parámetros geoelectricos.

Resolución 2115 de 2007, (2007).
https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minproteccion_2115_2007.htm

Resolución 0844 de 2018, 24 ETG 5 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.eeh.2020.101342>

Resolución 955 de 2021, (2021).

https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_cra_0955_2021.htm

Resolución 963 de 2022, (2022).

https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_cra_0963_2022.htm

Salas Valverde-Fredet, J. (2016). Uso de sistemas de desalación para cultivos de microalgas u otros microorganismos en regiones en vías de desarrollo.

Secretaría de Educación de La Guajira. (2021). Educación en La Guajira.

<https://www.laguajira.gov.co/web/secretaria-de-educacion>

Sevda, S., Yuan, H., He, Z., & Abu-Reesh, I. M. (2015). Microbial desalination cells as a versatile technology: Functions, optimization and prospective. *Desalination*, 371, 9–17.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.05.021>

Shahzad, M. W., Haider, H., Kim, I. S., & Rana, S. (2019). Desalination technologies for water treatment: An overview. *Water*, 11(1), 15.

Sharma, A., et al. (2021). A review on solar energy-driven desalination technologies. *Energy Reports*, 7, 309-330.

Sistema Estadístico Nacional. (2020). La Información Del DANE En La Toma De Decisiones De Los Departamentos, La Guajira.

Soto Álvarez, G., & Soto Benavides, C. (2013). Desalación de agua de mar mediante sistema Osmosis Inversa y Energía Fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, Región de Coquimbo.

Tamir, A., & Ruiz Beviá, F. (2005). Ley de conservación de la materia.

Torres Campos, R. E. (2021). Análisis de la gobernanza del agua en la comunidad indígena wayuu Spatou, ubicada en zona rural del municipio de Uribia, La Guajira.

Ulloa, A., Schoute, H. R., & Gómez, E. (1988). *Abastecimiento de agua potable en algunas poblaciones de los departamentos de los departamentos de Atlántico, Bolívar, Córdoba y Sucre*. <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/download/212/178/192> pag 62

UNESCO, ONU-Agua, 2020: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático, París, UNESCO

Universidad de La Guajira. (2021). Universidad de La Guajira. <https://www.uniguajira.edu.co/>

Visbal Navarro, J. R. (2013). Diseño conceptual de una planta desalinizadora alimentada con energía renovable en el Caribe colombiano.

Wang, J., & Wang, Q. (2019). Intelligent explicit model predictive control based on machine learning for microbial desalination cells. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 233(7), 751–763.
<https://doi.org/10.1177/095965181881684>

Warsinger, D. M., Chakraborty, S., Tow, E. W., Plumlee, M. H., Bellona, C., Loutatidou, S., ... & Mikelonis, A. M. (2020). A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. *Progress in Polymer Science*, 109, 101290.

World Resources Institute. (n.d.). Asociación de Agua, Paz y Seguridad |. Retrieved May 20, 2021, from <https://www.wri.org/initiatives/water-peace-security-partner>

20. Anexos

Anexo 1. Metodología para el desarrollo del proyecto de investigación.

Objetivo general	Objetivos específicos	Actividades	Enfoque	Alcance	Método	Técnica
Construir un modelo tridimensional de Celda de Desalinización Microbiana estimando su rendimiento en la generación de agua potable a partir de agua de mar, con implicaciones directas en la búsqueda de opciones sustentables para comunidades vulnerables	Comparar la eficiencia y el rendimiento de diferentes técnicas de desalinización, con el fin de determinar cuál de ellas presenta un mayor grado de desalinización y producción de agua potable.	Revisión bibliográfica de técnicas de desalinización que puedan ser acopladas CDM	Mixto	Explicativo	Deductivo y analítico	Análisis de técnicas de desalinización haciendo uso del método de la biblioteca Juan Roa Vásquez
		Análisis de información				Análisis de técnica más apropiada para la CDM
		Elaboración de matriz de síntesis de información con parámetros clave para la investigación				
		Elección de técnica de desalinización más apropiada para la CDM teniendo en cuenta la matriz				
	Evaluar los criterios económicos, sociales y ambientales de la tecnología de CDM valorada a fin de conocer su viabilidad en las comunidades vulnerables del municipio de Riohacha.	Construcción de entrevistas y búsqueda de personas para aplicarla	Cualitativo	Correlacional	Deductivo y analítico	Convocatoria por diferentes medios de divulgación de información
		Aplicar entrevista y responder posibles dudas				Reconocimiento de la comunidad de estudio
		Evaluación de la viabilidad de la CDM en Riohacha, La Guajira				Entrevista
	Diseñar en un modelo 3D una Celda de Desalinización Microbiana evaluando la viabilidad de aplicación en una comunidad vulnerable del municipio de Riohacha	Estimación del rendimiento y funcionamiento de la CDM en la comunidad elegida	Cuantitativo	Descriptivo	Analítico	Análisis de la comunidad estudiada
		Adquisición de software indicados para el diseño 3D de la CDM				Variables pertinentes para la creación del diseño
		Diseño 3D de la CDM en diferentes vistas y con medidas pertinentes				Establecimiento del diseño técnico de la CDM
		Simulación 3D del funcionamiento de la CDM				Ejecución del diseño en el prototipo 3D de la CDM
						Simulación de funcionamiento de la CDM

Anexo 2. Formato de entrevistas semiestructuradas

Entrevista para Evaluación de la Viabilidad y Diseño de una Celda de Desalinización Microbiana en Riohacha

Información del entrevistado:

- ¿Cuál es su nombre completo? Kerwin Alberto Daza Duarte
- ¿A qué se dedica? tecnólogo en radiología
- ¿En qué lugar de Riohacha se encuentra viviendo? Barrancabermeja. En Riohacha, barrio Che Guevara y Pájara. Es una zona urbana.
- ¿Conoce algo acerca del tratamiento de agua? Papá ingeniero ambiental. Algo de idea por familiares.

Accesibilidad a agua potable:

Para comenzar nos gustaría saber cuáles son los desafíos actuales relacionados con el acceso de agua potable en la comunidad.

- ¿Su hogar cuenta con acceso a agua potable?
 - *En caso afirmativo*
 - ¿Cuál es el sistema de distribución de este recurso en su hogar?
Acueducto
 - ¿El servicio de agua es permanente o intermitente?
 - *Si es intermitente*
 - ¿Con qué frecuencia tiene disponibilidad de este servicio en su hogar? 5 a 7 días. Llega de madrugada sin saber a qué hora se podía acceder al recurso.
 - ¿Para cuántos días es suficiente?
 - *En caso negativo*
 - ¿Qué hace para abastecerse de agua potable?
 - ¿Cuánto tiempo se demora en llegar a su hogar con este recurso?
 - ¿Cuánto tiempo le dura?
- ¿Con cuántas personas vive usted?, ¿esta cifra es común en la comunidad? ¿Qué cantidad de personas viven en cada hogar? 4 personas
- ¿Cuánta cantidad de agua utiliza al día? 1 tanque de 300 o 400 L
- ¿Considera que utiliza cantidades de agua similares a la de sus vecinos? No es posible saberlo
- ¿Sabe si el agua con la que usted se abastece es apta para el consumo humano? No
- ¿Cuál es la principal fuente de agua para consumo para los miembros de su hogar? Agua proveniente del Río Ranchería. En Albania, cerca al Cerrejón el agua es muy mala, es la misma que va a Riohacha. Los gobiernos permiten que esta agua llegue a Riohacha. Calidad mala y abastecimiento intermitente de agua.

Viabilidad y factibilidad:

Explicar qué son las CDM

Para nuestro proyecto, realizaremos el diseño de una Celda de Desalinización Microbiana (CDM), esta es una técnica de tratamiento en la que se utilizan microorganismos como bacterias, para eliminar la sal del agua de mar o salobre, convirtiéndola en agua dulce. Funciona mediante un proceso llamado electrólisis microbiana, donde los microorganismos generan una corriente eléctrica al consumir materia orgánica y liberan iones, lo que ayuda a separar los iones de sal del agua, produciendo agua potable más pura de manera sostenible y eficiente.

Teniendo en cuenta esta información nos gustaría hacerle las siguientes preguntas

- ¿Qué opina sobre la idea de utilizar microorganismos para convertir agua de mar en agua dulce? Buena idea, el agua debe cumplir con la normativa colombiana
- ¿Cree usted que es posible tener una CDM en su comunidad? Es usada en las rancherías o zonas rurales. Si, ya que se solucionaría el problema de accesibilidad al agua.
- ¿Cuáles cree que serían los mayores inconvenientes para tener esta tecnología en su comunidad? El apoyo del Estado (departamental, municipal y nacional) es mínimo y negligente en el caso de recursos ambientales e hídricos.
- ¿Sabe si existe algún proyecto similar en la región o en comunidades similares? En Uribia y Manaure, tratan de desalinizar el agua pero no es apta para el consumo humano. No hay un sistema eficiente

A continuación se realizarán algunas preguntas que se tendrán en cuenta para realizar el diseño de la celda de desalinización microbiana.

Diseño y tecnología:

- ¿Le parece adecuado traer este tipo de tecnología a su comunidad?, ¿por qué?
 - ¿Conoce si existen fuentes de energía sostenible disponibles en la comunidad que podrían utilizarse para alimentar el proceso de desalinización? En la alta Guajira hay un parque eólico que es para el beneficio de la comunidad.
 - ¿Conoce un aproximado de las personas en la comunidad que se podrían beneficiar del proyecto? 15.000 a 20.000 personas teniendo en cuenta niños, sin comunidad indígena. Si es por resguardo 600 a 800 personas
- Para proseguir con la entrevista tenemos algunas preguntas relacionadas al beneficio que se le podría dar a la comunidad.

Impacto comunitario:

- ¿Cree que la implementación de esta tecnología podría beneficiar a la comunidad en términos de acceso al agua potable y mejora de la calidad de vida? Si, bastante ya que el agua es un líquido preciado y esta se usa desde que se levanta hasta acostarse.
- ¿Cuáles podrían ser los posibles desafíos sociales o culturales que surjan al introducir una nueva tecnología como esta en la comunidad? Que no exista discriminación para el acceso de agua.

Sostenibilidad y mantenimiento:

- ¿Cómo se podría garantizar la sostenibilidad financiera y operativa de este proyecto a lo largo del tiempo? Los habitantes de la comunidad se dejarían capacitar e ingresar la tecnología con el fin de hacerle el mantenimiento y capacitación adecuada para la CDM.

Financiamiento:

- ¿Conoce acerca de cuáles serían los costos estimados de implementación y mantenimiento a largo plazo de una Celda de Desalinización Microbiana en esta comunidad?
- ¿Conoce usted alguna fuente de financiamiento para este proyecto? ¿Cuáles considera viables? Por medio de ONG's internacionales que tengan como fin mejorar la calidad de vida de las comunidades indígenas

Participación comunitaria:

- ¿Cuáles pueden ser las principales preocupaciones o expectativas de la comunidad con respecto a este proyecto?
- ¿Le gustaría aprender más sobre cómo funciona este proceso y cómo podría ayudar a abordar la escasez de agua en la región?

Cierre:

- ¿Tiene alguna pregunta o inquietud específica acerca de la Celda de Desalinización Microbiana que le gustaría que respondamos?
- ¿Tiene alguna otra información o recomendación que desee compartir con respecto a este proyecto?

Interés alto en el proyecto debido al impacto y mejora en la calidad de vida de las personas

Gracias por su tiempo y sus respuestas. Sus aportes serán fundamentales para nuestra propuesta de diseño y viabilidad de la Celda de Desalinización Microbiana en Riohacha eso sería todo por ahora, espero tenga un buen día.

Anexo 3. Consentimiento informado.

DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Nombre del estudio:	Diseño y viabilidad de uso de una Celda de Desalinización Microbiana para comunidades vulnerables del área rural del municipio de Riohacha
Patrocinador del estudio:	Universidad El Bosque. Facultad de Ingeniería
Investigador encargado:	Ruby Dayanna Gutiérrez rgutierrez@unbosque.edu.co Juan Diego Gutiérrez jgutierrez@unbosque.edu.co
Institución:	Universidad El Bosque. Programa de Ingeniería ambiental.

El propósito de esta información es ayudarle a tomar la decisión de participar, -o no-, en la investigación “Diseño y viabilidad de uso de una Celda de Desalinización Microbiana para comunidades vulnerables del área rural del municipio de Riohacha”.

Este estudio es un estudio realizado por estudiantes de pregrado de la universidad El Bosque, liderado desde la facultad de ingeniería y avalado por el comité de trabajo de grado del programa de ingeniería ambiental.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Usted ha sido invitado/a a participar en este estudio porque hace parte la comunidad de habitantes de la ciudad de Riohacha. El propósito de este estudio es diseñar un dispositivo de desalinización de agua salobre, con el fin de proponer una alternativa viable para el acceso a agua segura en comunidades vulnerables de la región de Riohacha en el departamento de la Guajira.

PROCEDIMIENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Este estudio tiene diferentes fases de desarrollo, la de diagnóstico de las necesidades y la de diseño del dispositivo. Requerimos su participación en la fase de diagnóstico en la que se incluirán entrevistas no presenciales o remotas que serán registradas en grabaciones de audio y/o video.

Estas entrevistas serán realizadas a miembros de la comunidad, personal de

agencias gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, y líderes comunitarios, para identificar estrategias de gestión del agua que permitan diagnosticar las necesidades reales para el uso diseño de la tecnología propuesta.

BENEFICIOS

Con el desarrollo de esta propuesta, se evaluarán las necesidades reales de las comunidades respecto a la gestión de las fuentes de agua y los recursos para asegurar su calidad para el consumo humanos, con el fin de mejorar el acceso a agua segura en comunidades diversas.

COSTOS

Los procedimientos que se le practicarán en este estudio no tendrán costo. Ni usted, ni otra persona involucrada en el estudio, recibirá beneficios sociales, políticos, económicos o laborales, como pago por su participación.

CONFIDENCIALIDAD DE LA INFORMACIÓN

La información obtenida se mantendrá en forma confidencial, se le asignará un código para anonimizar la información y asimismo será etiquetada toda la información que sea recolectada (grabaciones de audio y/o video). Sólo el equipo investigador tendrá acceso a dicha información. Es posible que los resultados obtenidos sean presentados en revistas y conferencias, sin embargo, su nombre o datos de contacto no serán conocidos.

VOLUNTARIEDAD

Su participación en esta investigación es completamente voluntaria. Usted tiene el derecho a no aceptar participar o a retirar su consentimiento y retirarse de esta investigación en el momento que lo estime conveniente. Si usted retira su consentimiento, analizaremos los datos obtenidos hasta ese momento. Esto lo haremos asegurando su confidencialidad.

PREGUNTAS

Si tiene preguntas acerca de esta investigación puede contactar o llamar a la Dra. Jimena Roncancio al teléfono 6016489000 Ext: 1177 o al correo electrónico djroncancio@unbosque.edu.co o al comité de trabajos de grado del programa de ingeniería ambiental de la universidad El Bosque al correo electrónico trabajosdegrado.ambiental@unbosque.edu.co

DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO

- Se me ha leído completamente el consentimiento informado.
- Se me ha explicado el propósito de esta investigación, los procedimientos, los riesgos, los beneficios y los derechos que me asisten, y que me puedo retirar de ella en el momento que lo desee.
- Entiendo que no puedo firmar este documento dado que el encuentro se realiza de manera no presencial o remota y manifiesto mi aceptación verbal voluntariamente, sin ser forzado a hacerlo.
- No estoy renunciando a ningún derecho que me asista.
- Se me comunicará de toda nueva información relacionada con el estudio, que surja durante su desarrollo y que pueda tener importancia directa para mi condición de salud.
- Se me ha informado que tengo el derecho a reevaluar mi participación en esta investigación según mi parecer y en cualquier momento que lo desee.
- Conozco que se protegerán mis datos personales y no serán divulgados, según la ley estatutaria 1581 de 2012 reglamentada parcialmente por el decreto nacional 1377 de 2013

“por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales”.

- Se me hará llegar vía correo electrónico o WhatsApp una copia firmada de este

documento. DOY MI CONSENTIMIENTO PARA PARTICIPAR: Si __ No

Nombre de quien aplica
el consentimiento

Firma

Fecha

Anexo 4. Cronograma y presupuesto del proyecto.

Actividades/Tiempo	Febrero				Marzo					Abril				Mayo					Junio				Julio				Agosto					Septiembre				Octubre			
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4				
Reuniones con la docente directora del proyecto de grado																																							
Revisión bibliográfica de técnicas de desalinización																																							
Elaboración de matriz de análisis de técnicas																																							
Elección de técnica de desalinización																																							
Búsqueda de personas de Riohacha dispuestas a hacer la entrevista																																							
Aplicación y análisis de entrevistas																																							
Evaluación de la viabilidad de la CDM para comunidades rurales de Riohacha																																							
Identificar el diseño de la CDM más apropiado según las necesidades expresadas por los entrevistados																																							
Diseño 3D de la CDM																																							
Simulación de funcionamiento de la CDM																																							

Rubros	Desembolso Nuevo		Total Desembolso Nuevo	Desembolso en Especie		Total Desembolso en Especie	Total Proyecto
	Año 2022	Año 2023		Año 2022	Año 2023		
1. Personal				0	2.958.163	6.902.381	6.902.381
2. Equipos especializados		9.315.000	9.315.000	0	0	0	9.315.000
2.1. Equipos propios				9.315.000	0	9.315.000	9.315.000
3. Materiales y reactivos		0					
4. Salidas de campo	0	0	0	0	0	0	0
5. Refrigerios	0	0	0	0	0	0	0
6. Servicios técnicos	0	0	0	0	0	0	0
7. Capacitaciones	0	0	0	0	0	0	0
8. Adquisición o actualización de software	80.000	80.000	160.000	0	0	0	160.000
9. Evaluación	650.000		650.000	0	0	0	650.000
10. Otros	0	0	0	0	0	0	0
TOTALES	730.000	9.395.000	10.125.000	9.315.000	2.958.163	16.217.381	26.342.381

Anexo 5. Matriz de síntesis de información completa

Título	Autores	Año	Tipo de literatura	Técnica de desalinización	Descripción de técnica de desalinización	Tiempo que requiere para desalinizar	Capacidad	Porcentaje de eficiencia	Costo (COP/m3)
Determinación de la viabilidad de un modelo de desalinización de agua de mar acoplado a una Celda Microbiana de Desalinización para comunidades vulnerables en Riohacha Guajira	Daniel Fernando Daza González, Laura Alejandra Rodríguez Mancipe	2021	Tesis de grado	Ósmosis inversa	Se hace pasar el agua aplicando presión mayor a la osmótica mediante una membrana semipermeable logrando hacer pasar el agua pura y filtrando los iones de la sal	Día	22199,773 m3/día	97,577	8.439
Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments	Tzahi Y. Cath, Amy E. Childress, Menachem Elimelech	2006	Artículo científico	Ósmosis inversa	La ósmosis inversa es un proceso de filtración selectiva avanzada que elimina eficazmente las sales y otros contaminantes del agua de mar al forzarla a través de una membrana semipermeable, permitiendo que solo las moléculas de agua pura pasen a través de ella, resultando en agua dulce y potable.	Hora / Día	8 - 16 L/h	94% - 96%	
Low-capacity Reverse Osmosis Solar Desalination Plant	F. Muñoz y L. A. Becerril	2014	Artículo científico	Ósmosis inversa	México cuenta con múltiples plantas de desalinización de agua, estas funcionan mediante la ósmosis inversa. El agua al ser desalinizada, pasa por un proceso de pretratamiento con el fin de potabilizar el recurso y así poder ser consumida y usada.	Día	1,6 m3/día	99,4%	
Reverse osmosis for desalination of water from the Guarani Aquifer System to produce drinking water in southern Brazil	Vandré Barbosa Brião, Jonas Magoga, Marcelo Hemkemeier, Edesnei Barbosa Brião, Laís Girardelli, Luana Sbeghen, Danúbia Paula Cadore Favaretto	2014	Artículo científico	Ósmosis inversa	En Brasil, debido a la necesidad del país de abastecer a las zonas más secas del país de agua potable, se han implementado alrededor de 3000 plantas de desalinización. Dicho líquido aunque no es apto para el consumo, es usado para actividades agrícolas, mineras, entre otras.	Hora	100 L	97,0%	8.439
Enhancing desalination and wastewater treatment by coupling microbial desalination cells with forward osmosis	Heyang Yuan, Ibrahim M. Abu-Reesh, Zhen He	2015	Artículo científico	Ósmosis directa	Proceso de purificación que aprovecha la ósmosis natural, aprovechando que los solventes en el agua buscan la zona de concentración más alta de soluto. Es decir, se separan las moléculas de agua a través de la membrana valiéndose de las diferencias de presión osmótica. Este proceso se manifiesta en las células de los seres vivos y en la cual, el agua entra o sale a través de la membrana plasmática y esto permite tener un equilibrio con el medio	Día	105 L	94,0 %	
Determinación de la viabilidad de un modelo de desalinización de agua de mar acoplado a una Celda Microbiana de Desalinización para comunidades vulnerables en Riohacha Guajira	Daniel Fernando Daza González, Laura Alejandra Rodríguez Mancipe	2021	Tesis de grado	Destilación flash multietapa	Consiste en evaporar el agua de mar en cámaras o etapas a una presión menor de la presión de saturación correspondiente a la temperatura existente	Día	36292,882 m3/día	93,76%	16.878
A high-performance photo-microbial desalination cell	Yuxiang Liang, Huajun Feng, Dongsheng Shen, Na Li, Yuyang Long, Yuyang Zhou, Yuan Gu, Xianbin Ying, Qizhou Dai	2016	Artículo científico	Fotomicrobiana	Utiliza microorganismos fotosintéticos para producir electrones y protones que se utilizan para generar energía y reducir la salinidad del agua. La celda consta de dos compartimentos separados por una membrana de intercambio de protones. En el compartimento anódico, los microorganismos fotosintéticos oxidan los electrones y producen protones y dióxido de carbono. Los protones pasan a través de la membrana hacia el compartimento catódico, donde se combinan con los electrones para producir hidrógeno. El hidrógeno se utiliza para reducir la salinidad del agua.	Hora	10 ml en la cámara de desalinización	96%	25.317
Application of polypyrrole modified cathode in bio-electro-Fenton coupled with microbial desalination cell (MDC) for enhanced degradation of methylene blue	Gui Huang, Han Wang, Hui Zhao, Peng Wu, Qun Yan	2018	Bio-electro-Fenton	Bio-electro-Fenton	Es un proceso avanzado de oxidación electroquímica que se utiliza para tratar aguas residuales y contaminantes orgánicos. El proceso combina la oxidación electroquímica avanzada (AOP) con la biodegradación para mejorar la eficiencia del tratamiento. El proceso utiliza un electrodo de hierro como ánodo y un electrodo de carbono como cátodo. El hierro se oxida en el ánodo para producir iones de hierro (Fe ²⁺), que reaccionan con el peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) producido en el cátodo para formar radicales hidroxilo (OH•). Los radicales hidroxilo son altamente oxidantes y pueden degradar una amplia variedad de contaminantes orgánicos	Día	2 L	64,98 %	25.317