

## **MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

### **“SUMINISTRO ENERGÉTICO SOSTENIBLE PARA GENERADORES DE AGUA ATMOSFÉRICA EN LA COMUNIDAD DE LA GUAJIRA, COLOMBIA”**

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

#### **AUTORES G3**

Mayra Alejandra CÓRDOVA GILES

Leonardo Enrique DÍAZ SARMIENTO

Paula IGLESIAS RIBEIRO

Nixon VILLANUEVA DELGADO

#### **TUTORA:**

Maitane URRUTIA APARICIO

Noviembre

2024

## RESUMEN

Este Trabajo Final de Máster tiene como finalidad investigar los sistemas de generación de agua atmosférica y determinar el más adecuado para el abastecimiento de agua potable, utilizando suministro energético renovable, en la comunidad colombiana de La Guajira. Para lograr este objetivo, se establece una metodología que considera 5 aspectos clave, los cuales se explican a continuación:

En primer lugar, se determina el contexto de la comunidad de estudio, por lo que se analizan datos vinculados a lo demográfico, lo geográfico, las condiciones climáticas, lo económico, y lo legal-normativo. Como segundo aspecto, se identifican las tecnologías de generación de agua atmosférica existentes, considerando su funcionamiento, capacidad productiva y necesidades energéticas. En un tercer lugar, se estiman dos elementos: determinar la necesidad de agua potable para consumo humano en La Guajira y la necesidad energética para el funcionamiento del sistema de generación eléctrica a seleccionar; con estas dos estimaciones, se logra determinar la utilización de un suministro energético solar fotovoltaico y eólico. Como cuarto aspecto, basándonos en los resultados obtenidos en la estimación, se realiza el dimensionamiento de dicho suministro energético solar fotovoltaico y eólico para el sistema de generación de agua atmosférica. Y, por último, en quinto lugar, se realiza un estudio de viabilidad económica basado en una estimación de los costos para poner en marcha un sistema de generación de agua atmosférica (inversión, rentabilidad, simulaciones de escenarios económicos).

De esta manera, el proyecto busca proponer el uso de un sistema de generación de agua atmosférica, que utilice un sistema de generación de energía renovable híbrido (fotovoltaico y eólico), que considere variables como horas de trabajo, eficiencia, pérdidas de productividad y variaciones de componentes geográficos y climáticos. Con ello, se espera que este TFM se consolide como un proyecto de uso de energías renovables que sea replicable, sostenible y capaz de adaptarse a diferentes contextos técnicos, ambientales, económicos y sociales.

**Palabras clave:** sistemas de generación de agua atmosférica; energía solar fotovoltaica; energía eólica; sistema energético híbrido.

## **ABSTRACT**

*This Master's Final Project aims to investigate atmospheric water generation systems and determine the most suitable one for providing drinking water using renewable energy sources in the Colombian community called La Guajira. To achieve this objective, a methodology is established that considers 5 key aspects, which are explained below:*

*First, the context of the study community is determined, analyzing data related to demographics, geography, climatic conditions, economic factors, and legal-regulatory issues. Second, existing atmospheric water generation technologies are identified, considering their operation, productive capacity, and energy requirements. Third, two elements are estimated: the drinking water needs for human consumption in La Guajira and the energy requirements for the operation of the selected electric generation system. With these two estimates, the use of a solar photovoltaic and wind energy supply is determined. Fourth, based on the results obtained from the estimation, the sizing of the solar photovoltaic and wind energy supply for the atmospheric water generation system is carried out. And finally, an economic feasibility study is conducted based on the estimated costs to start up an atmospheric water generation system (investment, profitability, simulations of economic scenarios).*

*In this way, the project proposes using an atmospheric water generation system that uses a hybrid renewable energy generation system (photovoltaic and wind), which considers variables such as working hours, efficiency, productivity losses, and variations in geographical and climatic components. With this, it is expected that this Master's Final Project will be consolidated as a replicable, sustainable project in renewable energy capable of adapting to different technical, environmental, economic, and social contexts.*

**Keywords:** *atmospheric water generation systems; solar photovoltaic energy; wind energy; hybrid energy system.*

## CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.2 OBJETIVO DEL ESTUDIO .....	2
1.3 METODOLOGÍA / METHODOLOGY .....	3
CAPÍTULO II: COMUNIDAD DE ESTUDIO .....	5
2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	5
2.2. TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA .....	9
2.3. EVALUACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISPONIBLES .....	11
CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL ESTUDIO .....	18
3.1. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA .....	18
3.2. ESTIMACIÓN DE SUMINISTRO ENERGÉTICO NECESARIO.....	20
3.3. PRODUCCIÓN EÓLICA .....	22
3.4. PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA .....	24
CAPÍTULO IV: ESTUDIOS ECONÓMICOS.....	25
4.1. ANÁLISIS DE INVERSIÓN .....	25
4.2. ANÁLISIS DE COSTOS.....	26
4.3. ESTIMACIÓN DE VENTA.....	29
4.4. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD .....	31
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES / CONCLUSIONS .....	36
BIBLIOGRAFÍA .....	42

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de los departamentos de Colombia (Gobierno de Colombia, 2024)	5
Figura 2: Índice de aridez en Colombia (Bonet et al., 2017)	6
Figura 3: Población de La Guajira por sector rural en 2005 (Bonet et al., 2017)....	7
Figura 4: a) Medida de pobreza multidimensional municipal en la Guajira, 2018; b) Porcentaje de hogares con NBI en La Guajira, 2018; c) Servicio de acueductos en municipios de La Guajira, 2018 (DANE, 2020).....	8
Figura 5: Diagrama psicrométrico a temperaturas normales y presión barométrica de 760 mm de Hg al nivel del mar (Revista Mundo HVAC&R, 2016).....	10
Figura 6: Sistema de refrigeración activa con cámara de calefacción (Raveesh et al., 2021)	11
Figura 7: a) Ubicación de los municipios de Uribia (en rojo) y Manaure en La Guajira, Colombia. b) Ubicación acueducto Casa Azul (Elaboración propia a partir de mapa Wikipedia y Google Maps)	12
Figura 8: Carros cisterna ubicados en la parte exterior del acueducto Casa Azul esperando ser cargados (Google Maps, 2022)	12
Figura 9: Promedio mensual de humedad relativa en la zona de Riohacha, La Guajira, Colombia (IDEAM, 2024)	13
Figura 10: Área delimitada para estudio del recurso eólico (Global Wind Atlas, 2024)	14
Figura 11: Densidad media de potencia a 100 m de altura (Global Wind Atlas, 2024)	15
Figura 12: a) Velocidad media del viento a 100 de altura b) Rosa de frecuencia de los vientos a 100 m de altura (Global Wind Atlas, 2024)	15
Figura 13: Irradiación global, directa y difusa del área de estudio (Elaboración propia a partir de datos PVGIS)	17
Figura 14: Variación de la temperatura media de la zona Manaure-Uribia (Elaboración propia a partir de datos PVGIS.....	17
Figura 15: Producción de agua diaria de equipos AWG a condiciones de humedad y temperatura promedio mes - La Guajira (Elaboración propia).....	19
Figura 16: Ubicación parques eólicos en Colombia (González, D., 2023)	22
Figura 17: Curva de potencia del aerogenerador Vestas V136-3.25 (Wind-turbine-models, s.f.).....	23
Figura 18: Ubicación aerogenerador (Elaboración propia a partir de datos de Google Earth)	24
Figura 19: Precios de energía en bolsa Colombia 2023/2024 (Elaboración propia a partir de datos XM Administradores del mercado eléctrico, 2024)	31
Figura 20: Sensibilidad del proyecto a diferentes precios de energía en bolsa USD/MWh (Elaboración propia)	34

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Irradiación media mensual y temperatura de la zona de estudio (Elaboración propia a partir de datos PVGIS) .....	16
Tabla 2: Cálculos de demanda de agua Litros por año (Elaboración propia) .....	18
Tabla 3: Equipos de generación de agua atmosférica AWG (Elaboración propia) .....	18
Tabla 4: Cálculos de producción anual equipos AWG (Elaboración propia) .....	20
Tabla 5: Cálculo de necesidad energética kWh año tecnología AWG (Elaboración propia) .....	21
Tabla 6: Cálculo preliminar de necesidad potencias instaladas acorde a tecnologías AWG (Elaboración propia) .....	21
Tabla 7: Características Vestas V136-3.25 (Elaboración propia a partir de datos de Wind-turbine-models, s.f.) .....	23
Tabla 8: Resumen de inversión equipos planta de generación agua atmosférica (Elaboración propia) .....	25
Tabla 9: Resumen de inversión planta producción híbrida de energías renovables (Elaboración propia) .....	26
Tabla 10: Cálculos costos de mantenimiento y operación (Elaboración propia) ..	27
Tabla 11: Cálculos ratios costos de transporte (Elaboración propia) .....	27
Tabla 12: Cálculo ratios de suministro energético – mercado actual (Elaboración propia) .....	28
Tabla 13: Cálculo de costos de explotación propuesta de Energías Renovables (Elaboración propia) .....	29
Tabla 14: Cálculo ratios de suministro energético con energías renovables.....	29
Tabla 15: Propuesta de precios de venta de agua potable (Elaboración propia) .	30
Tabla 16: Cálculo de Ingresos por venta de sistema híbrido de energías renovables (Elaboración propia).....	31
Tabla 17: Cálculo de ingresos totales y periodo de recuperación planta AWG, consumo energético RED (Elaboración propia) .....	32
Tabla 18: Cálculo de ingresos totales y periodo de recuperación planta AWG, consumo energético RED a tarifa de 500 pesos colombianos (Elaboración propia) .....	32
Tabla 19: Cálculo de ingresos totales y periodo de recuperación planta AWG con uso de energías renovables (Elaboración propia) .....	33
Tabla 20: Análisis de Rentabilidad del Proyecto AWG con uso de Energías Renovables (Elaboración propia) .....	34
Tabla 21: Escenarios de producción de agua sistemas AWG a diferentes humedades y temperaturas (Elaboración propia a partir de datos <i>Climate Data</i> 2021 y Herramientas de ingeniería, 2024) .....	35
Tabla 22: Escenarios de ingresos y periodo de recupero a diferentes humedades y temperaturas promedio (Elaboración propia) .....	35

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

Acorde con los datos de la OMS al 2022, en el mundo un 38.8% de la población rural no cuenta con servicios de agua potable de forma segura, en Colombia esta cifra aumenta a un 59.8% (OMS Datos, 2024).

La Guajira, ubicada en el extremo norte de Colombia, es una región caracterizada por su aridez extrema y condiciones climáticas desafiantes. Con temperaturas que promedian los 30°C y precipitaciones anuales por debajo de los 500mm (IDEAM, 2023), la disponibilidad de agua potable es un problema crítico para sus habitantes. Estas condiciones han afectado significativamente la calidad de vida de las comunidades locales, especialmente las comunidades indígenas Wayuu, que dependen en gran medida de fuentes de agua escasas y no fiables.

La crisis hídrica en La Guajira ha sido un tema de preocupación nacional e internacional. Diversos informes y estudios han señalado la urgente necesidad de soluciones sostenibles para garantizar el acceso al agua potable (UNICEF, 2024; Ulloa A. et al., 2020). Tradicionalmente, las comunidades han dependido de pozos, represas y la recolección de agua de lluvia. Sin embargo, estos métodos son insuficientes y vulnerables a las variaciones climáticas extremas. Además, el crecimiento poblacional y la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos ha llevado a la degradación de los limitados acuíferos, exacerbando la escasez de agua potable.

En respuesta a esta problemática, han surgido diversas iniciativas para explorar tecnologías alternativas de obtención de agua. Una de las soluciones emergentes es la generación de agua a partir de la humedad del aire mediante sistemas de condensación del agua, tecnología que ha demostrado ser prometedora en regiones con características climáticas similares a las de La Guajira (Galindo Torres et al., 2018). No obstante, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos técnicos y económicos, especialmente en áreas rurales y de difícil acceso.

El presente trabajo fin de máster hace referencia a la evaluación técnica y económica para definir la viabilidad de implementación de un sistema de extracción de agua atmosférica por condensación en el área geográfica mencionada, aplicando los beneficios tecnológicos de las energías renovables, como son la fotovoltaica y eólica. Con este tipo de proyectos se pretende demostrar que, mediante la innovación y el uso responsable de los recursos naturales, es posible mejorar la calidad de vida de las comunidades afectadas por la escasez de agua.

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La comunidad de La Guajira, ubicada en la costa norte colombiana, posee un territorio de gran diversidad cultural y riquezas naturales (sol, mar, ríos, desierto). A pesar de ello, la comunidad, principalmente indígena, afronta una crisis social y económica, teniendo un índice de pobreza de 65.4% (DANE, 2022). Sumado a ello, uno de los grandes desafíos es el poco acceso a agua potable para cerca de un 50.2% de la población (Superservicios, 2022) teniendo consecuencias graves sobre la salud y bienestar de la población. Frente a este tipo de problemáticas, se ha planteado la exploración de tecnologías alternativas para la obtención de agua, una de estas soluciones es la producción de agua a partir de la captura de humedad del aire, sin embargo, muchos de estos sistemas requieren una fuente energética autónoma para su operación, especialmente en zonas alejadas donde no existen un suministro directo de red.

## **1.2 OBJETIVO DEL ESTUDIO**

El objetivo general del presente trabajo fin de máster es por tanto investigar sistemas de generación de agua atmosférica y determinar el suministro energético renovable más adecuado para el abastecimiento de agua potable en la comunidad colombiana de La Guajira.

Para ello, trataremos de conocer las características geográficas, demográficas, económicas, marco regulatorio de la comunidad en estudio, así también, evaluaremos los sistemas existentes de generación de agua atmosférica y seleccionaremos el más adecuado a la comunidad en estudio en función a criterios de capacidad y costos de operación. Asimismo, se buscará identificar los recursos energéticos renovables presentes en la comunidad de estudio y cuantificar la producción de energía que se podría obtener para suministro a los sistemas de generación de agua atmosférica.

Finalmente, con el objetivo de evaluar su viabilidad, se realizará una estimación de los costos e inversión total para este tipo de proyectos y analizarán diferentes



escenarios económicos en función a la variación de componentes geográficos como la humedad y temperatura.

### 1.3 METODOLOGÍA / METHODOLOGY

Para abordar el presente proyecto se seguirán las siguientes etapas:

1. **Contexto de la comunidad en estudio:** se mencionarán las características generales de la comunidad de la comunidad de estudio como geografía, población, condiciones climáticas, sistema económico y problemática de escasez de agua. Así también, se abordará un estudio de los recursos energéticos renovables con la radiación solar, velocidad y dirección del viento.
2. **Identificación de tecnologías de generación de agua atmosférica:** se hará una búsqueda de diferentes tecnologías desarrolladas y en investigación para la generación de agua atmosférica, identificando su funcionamiento, capacidad productiva y necesidades energéticas.
3. **Estimación de las necesidades de agua y energéticas:** en función a la demanda de agua de la comunidad y la evaluación de tecnologías de generación de agua atmosférica se seleccionará una tecnología y se realizará una estimación de producción de agua y necesidades energéticas.
4. **Propuesta de alternativas de suministro energético:** en base a los análisis previos, se realizará el dimensionamiento y producción de un suministro de energía solar fotovoltaica y eólica para el sistema de generación de agua atmosférica, tomando en cuenta horas de trabajo, eficiencias y pérdidas productivas.
5. **Estudio de la viabilidad económica:** Se realizará una estimación de costos de operación del sistema de generación de agua atmosférica seleccionado, inversión y rentabilidad del proyecto. Se incluirá una simulación de escenarios económicos en función a variación de componentes geográficas y climáticas.

To address this project, the following stages will be followed:

1. **Context of the Community Under Study:** *The general characteristics of the community will be described, including geography, population, climatic conditions, economic system, and water scarcity issues. Additionally, a study of renewable energy resources such as solar radiation, wind speed, and direction will be conducted.*
2. **Identification of Technologies for Generating Atmospheric Water:** *A search will be conducted for various technologies developed and under research for atmospheric water generation, identifying their operation, productive capacity, and energy requirements.*
3. **Estimation of Water and Energy Needs:** *Based on the community's water demand and the evaluation of atmospheric water generation technologies, a suitable technology will be selected, and an estimate of water production and energy needs will be made.*
4. **Proposal for Energy Supply Alternatives:** *Based on the previous analyses, the sizing and production of a solar photovoltaic and wind energy supply for the atmospheric water generation system will be carried out, considering work hours, efficiencies, and production losses.*
5. **Economic Feasibility Study:** *An estimate of the operating costs, investment, and profitability of the selected atmospheric water generation system will be conducted. A simulation of economic scenarios will be included based on the variation of geographical and climatic components.*

## **CAPÍTULO II: COMUNIDAD DE ESTUDIO**

### **2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES**

La Guajira, conocida como 'Wajiira' en el idioma wayú, es uno de los 32 departamentos de Colombia (figura 1) y está ubicada en el norte del país, formando parte de la Región Caribe colombiana. Este departamento se caracteriza por una geografía que incluye ecosistemas de desierto, selva seca y montaña húmeda. Su territorio está constituido por la península de La Guajira, que se divide en tres regiones: Alta, Media y Baja Guajira (Gobernación de La Guajira, 2024).



Figura 1: Mapa de los departamentos de Colombia (Gobierno de Colombia, 2024)

La Alta Guajira, situada al noroeste de la península y formada por los municipios de Manaure, Uribia y Maicao, es predominantemente semidesértica (figura 2), con suelos áridos y algunas serranías que no superan los 650 metros sobre el nivel del mar. La Media Guajira, que incluye la capital del departamento (Riohacha), está compuesta por una bajiplanicie y posee un clima menos árido, caracterizado por dunas y arenales. Por último, la Baja Guajira abarca las zonas de la Sierra Nevada de Santa Marta y los montes de Oca, siendo la región más húmeda y cultivable del departamento (Gobernación de La Guajira, 2024).

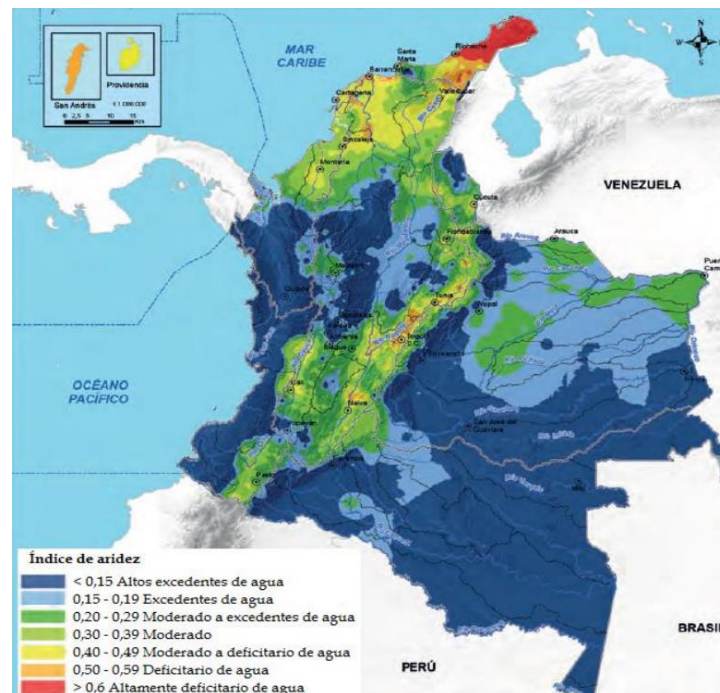


Figura 2: Índice de aridez en Colombia (Bonet et al., 2017)

La Guajira está compuesta por 15 municipios y, en 2023, contaba con una población de 1.015.909 habitantes, distribuidos principalmente en los municipios de Riohacha, Uribia, Maicao y Manaure (Gobernación de La Guajira, 2024). Entre su población se encuentran cinco comunidades indígenas (Wayúu, Kinkui, Ika, Kogui y Wiwa) y una significativa población musulmana, debido a la fuerte inmigración proveniente del Oriente Medio desde la década de 1970, que ha contribuido al crecimiento económico de la región, principalmente en el comercio. (Gobernación de La Guajira, 2024).

La población indígena Wayúu representa aproximadamente un 94% de la población indígena total de la Guajira y es predominante en la región de la Alta Guajira, en los municipios de Uribia, que en 2018 tenía una población indígena de aproximadamente 155 mil personas, siendo en su totalidad Wayúu; Manaure, con un porcentaje de 99,8% sobre un total de casi 70 mil personas; y Maicao, con un 98,9% de 67 mil personas (DANE, 2020). Esta comunidad enfrenta grandes desafíos debido a su ubicación en la zona desértica más extensa del país, con gran escasez de agua y alimentos, lo que acaba condicionando su desarrollo socioeconómico. Además, la implementación de políticas de agua potable y saneamiento básico es dificultada debido a la dispersión de las comunidades en la zona, con poblaciones de tan solo 100 habitantes (figura 3), lo que hace que la

población Wayúu sufra fuertemente las consecuencias del ciclo climático de lluvias y sequías (Bonet et al., 2017).

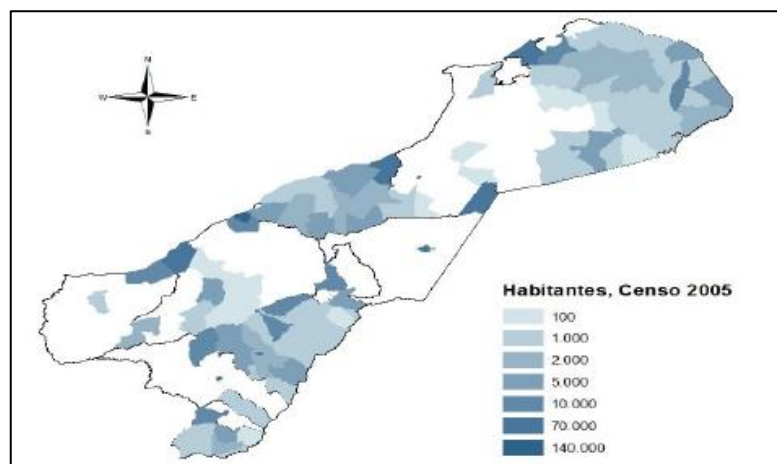
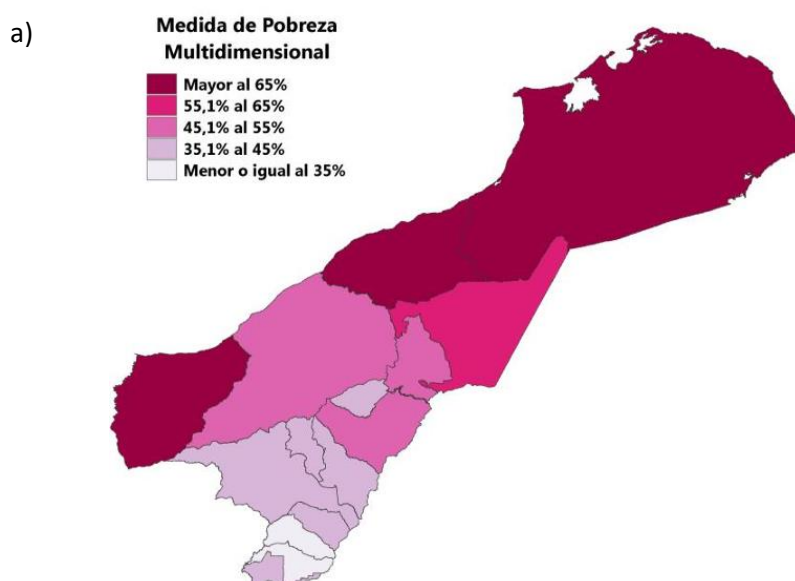


Figura 3: Población de La Guajira por sector rural en 2005 (Bonet et al., 2017)

Dentro de este contexto, se destacan los municipios de Uribia y Manaure por su situación socioeconómica crítica. Según el informe del DANE del Sistema Estadístico Nacional – SEN del Gobierno de Colombia, ambos municipios son los únicos en La Guajira con una medida de pobreza multidimensional superior al 75%. Además, ambos presentan el mayor porcentaje de hogares con necesidades básicas insatisfechas, que supera el 65%, siendo la falta de acceso a servicios básicos, como el agua potable, una de las problemáticas más significativas, ya que son los únicos municipios del departamento que cuentan con un servicio de acueducto inferior al 30 (figura 4) (DANE, 2020).





mismas condiciones convierten a la región en un potencial para las energías renovables. A pesar de aridez de la Alta Guajira, la humedad del aire es muy elevada, normalmente rondando el 80% y llegando a superar el 90% (Windy, 2024), lo que puede ser utilizado para soluciones que generen agua, como sistemas de condensación del aire.

Según la ONU, cada persona necesita de 50 litros a 100 litros de agua al día para cubrir necesidades básicas como beber, cocinar, higiene personal y limpieza (ONU, 2010), siendo de 2 a 4 litros de agua potable para consumo directo. Para ambos municipios, por lo tanto, se necesitaría un mínimo de 11.761.950 litros al día, siendo al menos 470.478 litros de agua potable.

## **2.2. TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA**

La generación de agua atmosférica, es decir, generación agua a partir de la humedad del aire, es una de las tecnologías emergentes para afrontar la problemática de escasez de agua en varias regiones del planeta. La misma, aún enfrenta desafíos asociados a el consumo energético, capacidad, costos operativos y economías de escala (Thermopedia, 2023).

Antes de hablar de esta tecnología, es importante entender la cantidad de agua presente en la atmósfera, en forma de niebla o vapor, para ello, haremos uso del diagrama psicrométrico (figura 5), herramienta que permite representar características del aire en función a diferentes variables como la humedad relativa, temperatura, presión y flujo del aire de la zona en estudio. Para mayor detalle de conceptos ver Anexo I del presente documento.



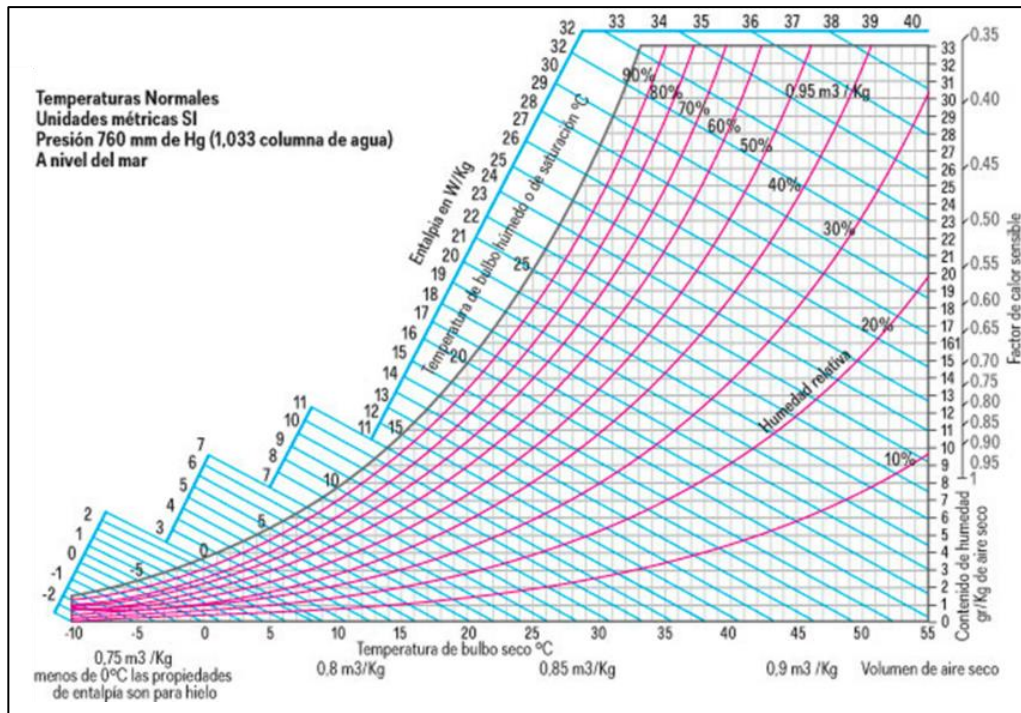


Figura 5: Diagrama psicrométrico a temperaturas normales y presión barométrica de 760 mm de Hg al nivel del mar (Revista Mundo HVAC&R, 2016)

En cuanto a las tecnologías para la extracción de agua presente en la atmósfera (AWG), tomando en cuenta el enfoque de G. Raveesh et al. (2021), las podemos clasificar en cuatro grandes grupos: refrigeración activa, refrigeración por compresión, concentración de vapor e híbridas. Para mayores detalles sobre las características de cada una de estas tecnologías consultar Anexo II.

Para el presente estudio, tomando en cuenta criterios de desarrollo de la tecnología a nivel comercial y características de la zona de estudio (alta humedad y alta temperatura), hemos seleccionado la tecnología de “refrigeración por compresión de vapor (figura 6)”, es un tipo de refrigeración basado en el principio de un refrigerador o aire acondicionado, en donde, el aire húmedo, a través de un ventilador controlado, ingresa al evaporador enfriándose por debajo de su punto de rocío, el aire frío se condensa sobre el serpentín del evaporador, el agua resultante se purifica y recolecta. Tiene mejor rendimiento para condiciones de aire húmedo y a alta temperatura, de lo contrario, se requeriría el acondicionamiento de una cámara climática para favorecer las condiciones climáticas. Dentro de las tecnologías comerciales, encontramos capacidades de hasta 10,000 litros por día. Para mayor detalle, consultar el listado de tecnologías comerciales Anexo III.



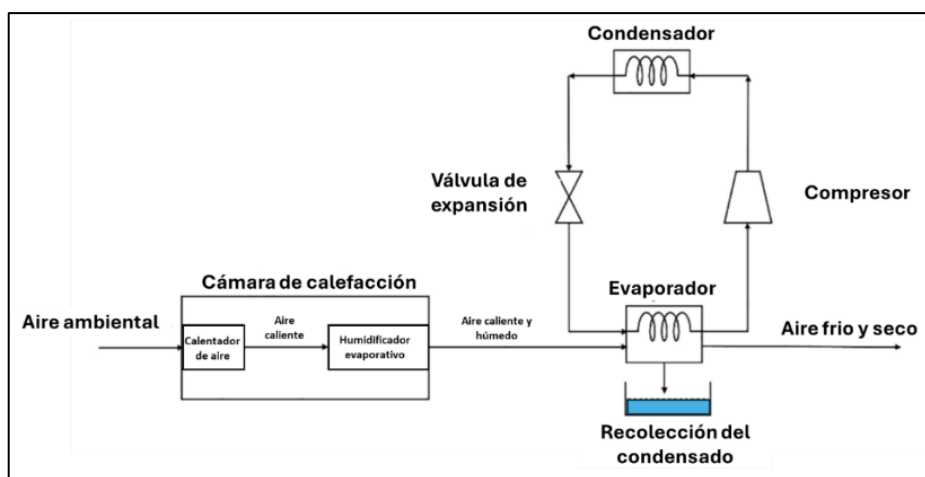


Figura 6: Sistema de refrigeración activa con cámara de calefacción (Raveesh et al., 2021)

### 2.3. EVALUACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISPONIBLES

La mayoría de las comunidades Wayuu viven en el norte de la península, formando pequeños asentamientos llamados rancherías (Duque, 2019), básicamente conjuntos de ranchos en los que habitan una o varias familias, y que están distribuidas de forma aleatoria por toda la región.

Estas comunidades normalmente se abastecen a través de reservorios (Gobernación de la Guajira, 2024) que acumulan agua durante las temporadas de lluvias, y en menor medida de pozos profundos artesanales, sin embargo, estos reservorios a menudo están contaminados ya que también son usados por animales de pastoreo.

El tamaño del territorio y la dispersión de las rancherías dificulta enormemente la distribución de agua de manera centralizada, en su lugar existen pequeños acueductos y micro acueductos, que se abastecen de acuíferos subterráneos, que filtran y tratan el agua mediante sistemas de osmosis inversa (Gobernación de la Guajira, 2024), una parte del agua se distribuye por tubería en las cabeceras municipales y el resto se despacha en carros cisterna hacia las comunidades.

Entre las poblaciones de Uribia y Manaure, en las coordenadas geográficas 11°44'34.6"N 72°21'43.8"W se encuentra ubicado el acueducto Casa Azul (figura 7), que serviría como punto de referencia inicial del proyecto, pensando en aprovechar sus instalaciones y su logística de distribución y transporte (figura 8), al

estar situado estratégicamente sobre la vía que une los dos municipios (Corpoguajira, 2017).

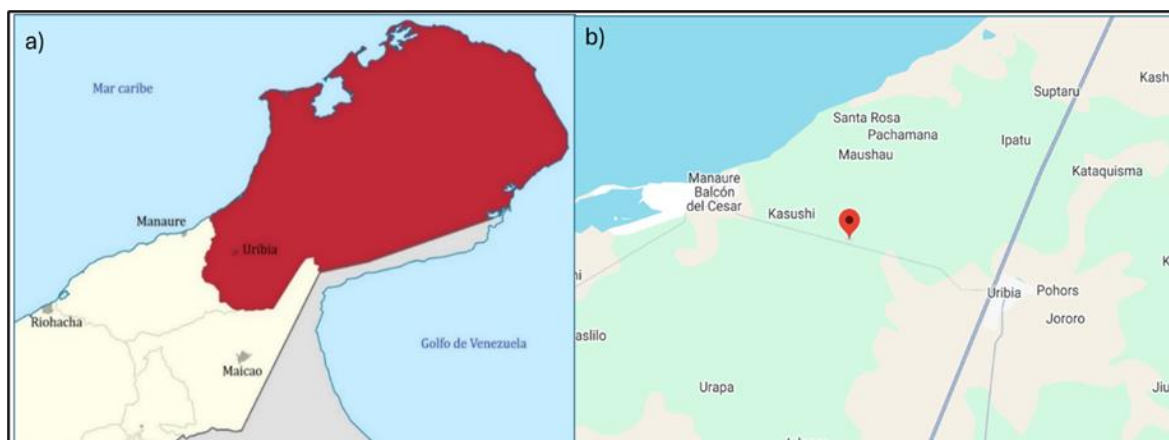


Figura 7: Figura 7: a) Ubicación de los municipios de Uribia (en rojo) y Manaure en La Guajira, Colombia. b) Ubicación acueducto Casa Azul (Elaboración propia a partir de mapa Wikipedia y Google Maps)



Figura 8: Carros cisterna ubicados en la parte exterior del acueducto Casa Azul esperando ser cargados (Google Maps, 2022)

Se estudiará la zona entre estos dos municipios, para determinar la viabilidad de establecer instalaciones fotovoltaicas y eólicas, para el suministro energético de los equipos del proyecto, la cercanía a estas poblaciones y a cientos de rancherías justifican la instalación de un piloto, que eventualmente podría ser escalado y replicado en otras zonas con características similares.

La humedad relativa es el factor más importante para la producción de agua a partir del aire atmosférico, en la guajira, se dan dos épocas de baja humedad, una

comprendida entre los meses de junio, julio y agosto y otra en enero y febrero con valores medios que oscilan entre el 65 y 70 %, mientras que los promedios más altos se registran en las temporadas de lluvia que también son dos, abril, mayo y especialmente octubre y noviembre con humedades por encima del 80%. (IDEAM, 2024).

En la figura 9 se muestra el comportamiento anual de la humedad relativa en la ciudad de Riohacha, cercana a los municipios de Manaure y Uribia. Esta varía inversamente en función de la temperatura (Windy, 2024), siendo mayor durante la noche, lo que facilita la condensación del vapor contenido en el aire, haciendo importante garantizar el suministro de energía durante las horas sin sol, para maximizar la producción de agua (LABOMAT, 2024).

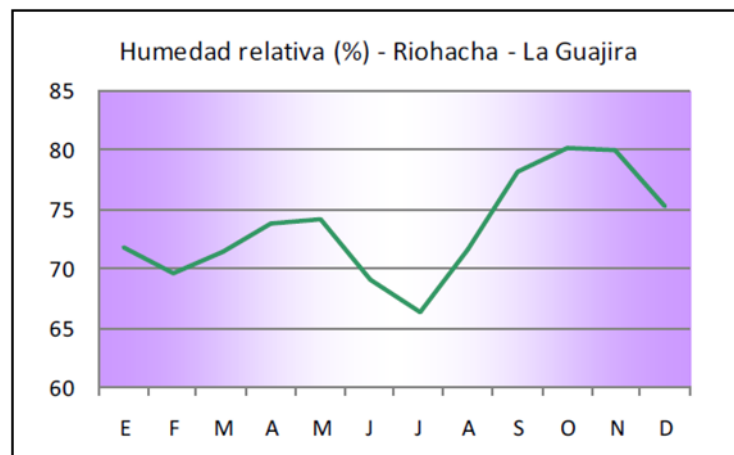


Figura 9: Promedio mensual de humedad relativa en la zona de Riohacha, La Guajira, Colombia (IDEAM, 2024)

Un sistema híbrido, podría ser una solución para garantizar el suministro energético durante las horas de ausencia de sol, este estaría integrado por una granja solar y un parque eólico adecuadamente dimensionados.

Durante el día, los sistemas estarían operando en conjunto alimentando los equipos para la producción de agua, en la noche el grupo eólico debería ser capaz de mantener la operación por sí solo, mientras que en ausencia de vientos el grupo fotovoltaico debe suplir todas las necesidades.

Lo anterior implica un sobredimensionamiento del sistema, que en determinados momentos puede llevar a una sobreproducción de energía, dichos excedentes se pueden verter a la red, ayudando al flujo de caja y a la rentabilidad del proyecto.

Una ventaja adicional de esta forma de producir agua es que no requiere complejos sistemas de filtración como los de osmosis inversa usados actualmente, ya que produce agua de alta pureza, que con un mínimo tratamiento puede alcanzar condiciones óptimas de potabilidad.

### 2.3.1. RECURSO EÓLICO

Para la evaluación de este recurso se usarán datos obtenidos de la aplicación web Global Wind Atlas (Global Wind Atlas, 2024), que requiere como entrada principal, delimitar un área representativa mínima de 9 km<sup>2</sup>, una vez seleccionada, el aplicativo calcula automáticamente toda la información.

En lugar de tomar varias muestras de 9 km<sup>2</sup> para evaluar individualmente, se decidió tomar una sola gran muestra 10 veces mayor en la zona comprendida entre Uribia y Manaure, con el fin de verificar la densidad de potencia, la velocidad media y la dirección predominante del viento, para esto se trazó un polígono rectangular con centro aproximado en el acueducto Casa Azul, con vértices en las siguientes coordenadas geográficas: 11.78435 -72.40746, 11.74582 -72.29291, 11.69166 -72.32931, 11.73397 -72.44363 (figura 10)



Figura 10: Área delimitada para estudio del recurso eólico (Global Wind Atlas, 2024)

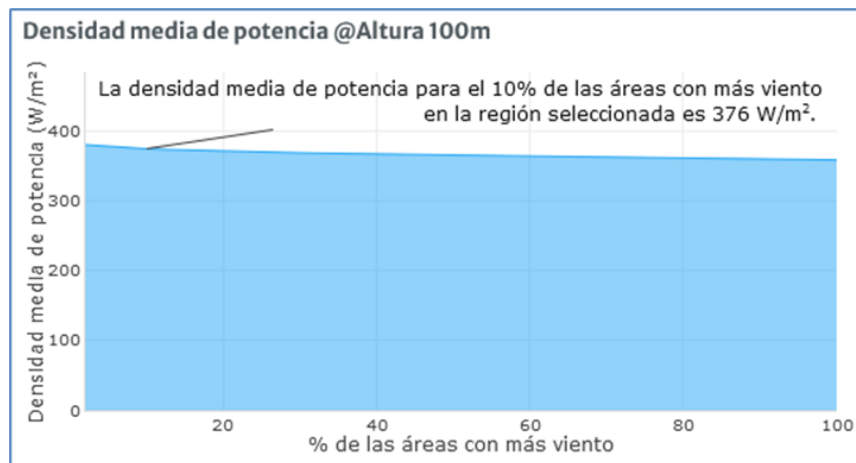


Figura 11: Densidad media de potencia a 100 m de altura (Global Wind Atlas, 2024)

En la figura 11 se muestra que la densidad de potencia media estimada a 100 m de altura, para el 10% de las áreas con mayor viento de la zona seleccionada, es de 376 W/m<sup>2</sup>, es decir que el 90% de esta zona tiene una densidad de potencia por debajo de este valor (Global Wind Atlas, 2024)

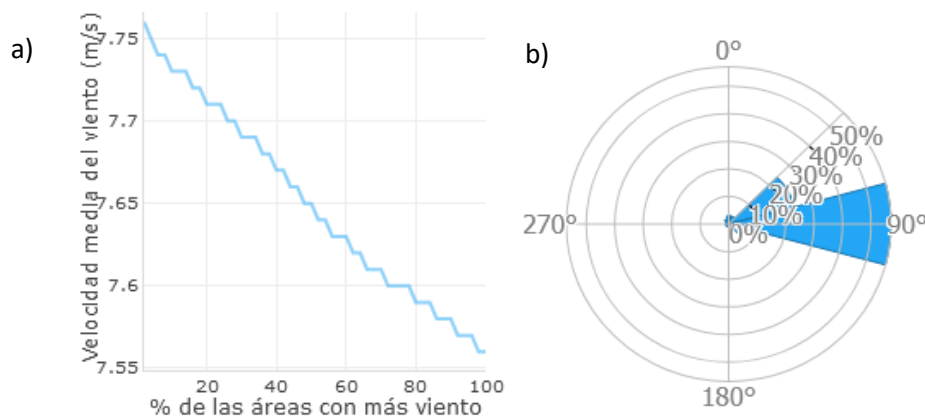


Figura 12: a) Velocidad media del viento a 100 de altura b) Rosa de frecuencia de los vientos a 100 m de altura (Global Wind Atlas, 2024)

La velocidad media de viento es de 7.75 m/s, estimada para el 10% de las áreas con más viento y a una altura de 100 m, lo que quiere decir que el 90% del área de estudio presenta velocidades inferiores a ésta, sin embargo, en la figura 12.a) también se muestra que el 100% de esta zona tiene velocidades medias por encima de 7.55 m/s (Global Wind Atlas, 2024), lo que podría ser favorable para proyectos eólicos dependiendo de la tecnología seleccionada.

La rosa de frecuencia de los vientos, en la figura 12.b), nos muestra que la mayor parte del tiempo el viento viene de la dirección Este-Oeste (Global Wind Atlas,

2024), lo que nos da una buena idea de la orientación que debería tener cualquier proyecto eólico en la zona, es decir perpendicular a la dirección predominante, en este caso sería la dirección Norte-Sur.

### 2.3.2. RECURSO FOTOVOLTAICO

Con ayuda de la herramienta online PVGIS (*European Commission, 2015*), se caracterizó el recurso fotovoltaico de la zona, tomando los datos mensuales de irradiación y temperatura de los últimos tres años de información existentes, 2021, 2022 y 2023, pues se considera que pueden representar bien las condiciones presentes.

Se promediaron los meses correspondientes de cada año y se elaboró la tabla 1, donde GHI (Global Horizontal Irradiation) es la irradiación global horizontal, DNI (Direct Normal Irradiation) es la irradiación normal directa, DHI (Diffuse Horizontal Irradiation) es la irradiación difusa horizontal, DHI/GHI es la relación irradiación difusa/global, y T2m temperatura promedio horaria de cada mes.

Mes	GHI (kWh/m <sup>2</sup> )	DNI (kWh/m <sup>2</sup> )	DHI (kWh/m <sup>2</sup> )	DHI/GHI	T2m (°C)
Enero	167,93	216,20	39,19	0,23	27,3
Febrero	165,08	199,55	37,93	0,23	27,2
Marzo	189,65	201,40	49,91	0,26	27,6
Abril	178,11	165,40	56,57	0,32	28,4
Mayo	187,51	173,54	59,95	0,32	29,2
Junio	183,54	176,41	53,52	0,29	29,5
Julio	199,30	203,87	51,06	0,26	29,7
Agosto	192,47	190,60	52,42	0,27	29,2
Septiembre	176,35	169,59	53,98	0,31	28,9
Octubre	163,71	160,93	50,71	0,31	27,9
Noviembre	148,39	163,42	45,07	0,30	27,6
Diciembre	158,32	206,22	35,88	0,23	27,5

Tabla 1: Irradiación media mensual y temperatura de la zona de estudio (Elaboración propia a partir de datos PVGIS)

En las figuras 13 y 14 puede notarse que durante el año la irradiación se mantiene en el rango de 150 a 215 kWh por m<sup>2</sup> aproximadamente, con máximos en los meses de julio y agosto, mientras la temperatura media diaria varía entre 27 y 30°C aproximadamente, es decir que se mueve en un rango de apenas 3°C, lo que la hace muy estable a lo largo del año. En términos generales se puede decir que hay un excelente recurso para proyectos fotovoltaicos.

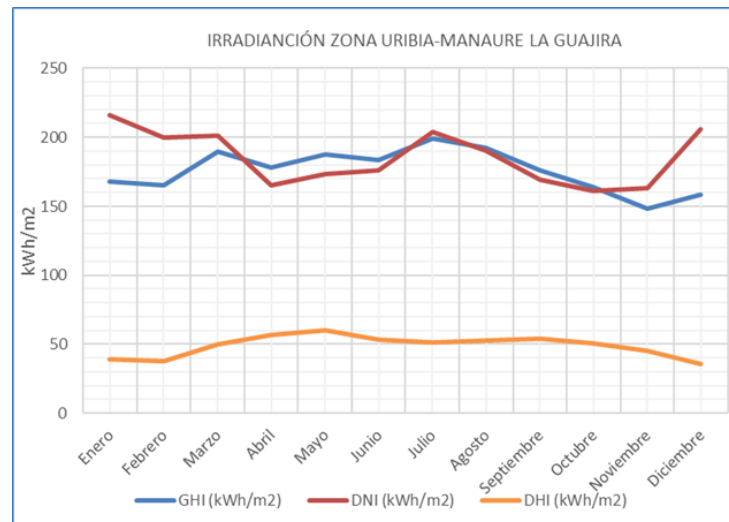


Figura 13: Irradiación global, directa y difusa del área de estudio (Elaboración propia a partir de datos PVGIS)

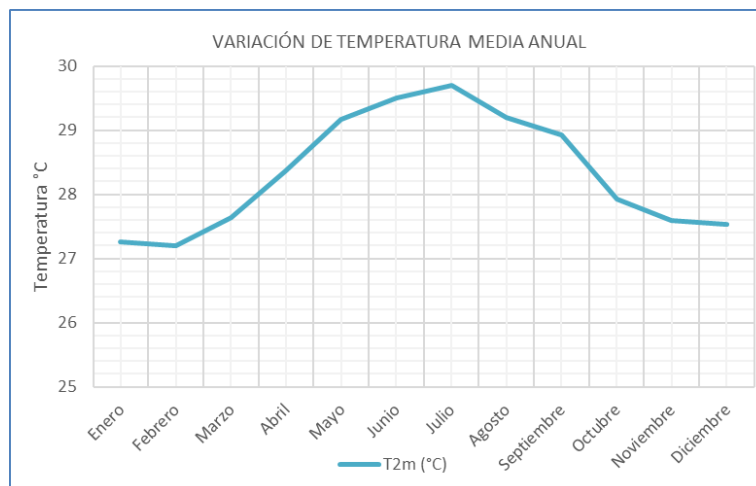


Figura 14: Variación de la temperatura media de la zona Manaure-Uribia (Elaboración propia a partir de datos PVGIS)



## **CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL ESTUDIO**

### **3.1. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA**

Para el cálculo de producción de agua atmosférica, en primer lugar, se tomó en cuenta la demanda basada en los datos poblacionales de las comunidades de Manaure y Uribia, necesidad mínima de agua potable para consumo directo y cobertura actual de acceso al agua del 50%, según datos del apartado 1.1. y 2.1., obteniendo una necesidad anual de 85,9 millones de litros.

Necesidad agua por habitante (L/día)	50	*Se consideran necesidades mínimas
Necesidad agua potable consumo directo por habitante (L/día)	2	*Se consideran necesidades mínimas

Comunidad	Habitantes (n°)	L/día Total	L/día Consumo directo	Desabastecimiento actual	Necesidad Potencial Consumo directo L/día	Necesidad Potencial Consumo directo L/año
Manaure	74 528	3 726 400	149 056	50%	74 528	27 202 720
Uribia	160 711	8 035 550	321 422	50%	160 711	58 659 515
<b>TOT</b>	<b>235 239</b>	<b>11 761 950</b>	<b>470 478</b>	<b>100%</b>	<b>235 239</b>	<b>85 862 235</b>

Tabla 2: Cálculos de demanda de agua Litros por año (Elaboración propia)

En segundo lugar, según la evaluación de tecnologías, se hizo una selección de equipos de refrigeración por compresión de vapor con capacidades desde 5000 a 6000 litros por día a condiciones de temperatura a 30°C y humedad relativa de 80% (tabla 3).

Proveedor	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
Modelo	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Units/Cont. 20"	1	2	1
Capacidad L/día (30°C y 80% HR)	5413	6000	5000
Potencia Kw	36	60	46
*Consumo KWh/L	0,16	0,24	0,22
Precio unitario USD	\$450 000	\$267 702	\$62 695
% Efic.	98%	98%	90%

Tabla 3: Equipos de generación de agua atmosférica AWG (Elaboración propia)



Ahora bien, para evaluar la producción de agua a condiciones variables de temperatura y humedad, es necesario, conocer el flujo de aire de los equipos. Para ello, en función a diagramas psicrométricos y tomando en cuenta los datos de condiciones de entrada y salida del sistema de refrigeración por compresión de vapor, se procedió a calcular los flujos de masa de vapor, teniendo como resultados flujos de aire de 4,98; 5,52 y 4,6 m<sup>3</sup>/s según cada equipo (Anexo IV).

Manteniendo constante el flujo de aire y considerando una eficiencia estimada para los equipos, se procedió a evaluar la producción diaria en función a la humedad y temperatura promedio mes a mes de la zona de estudio (Figura 15).

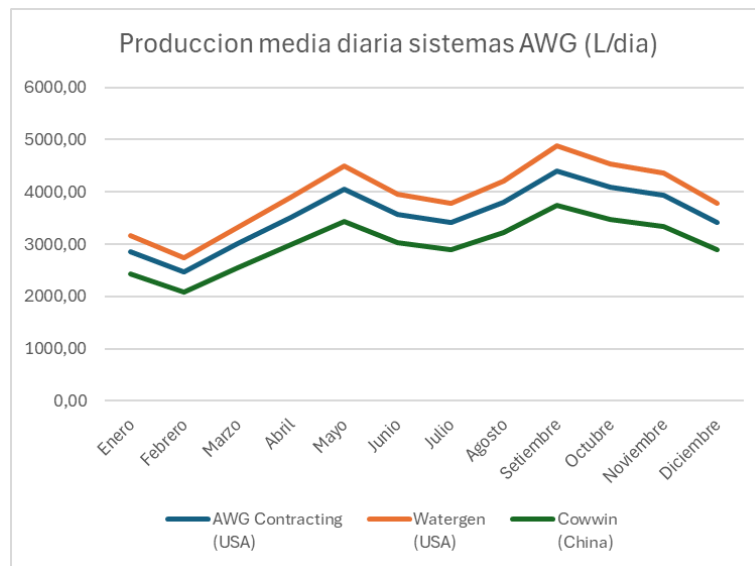


Figura 15: Producción de agua diaria de equipos AWG a condiciones de humedad y temperatura promedio mes - La Guajira (Elaboración propia)

Dado que la capacidad unitaria de los equipos es mucho menor a la demanda estimada, se consideró la adquisición de una cantidad de equipos de manera que se cubra un volumen piloto de alrededor de un 20% del potencial año (17 millones de litros año). Finalmente, para el cálculo de la producción total diaria se consideró la ecuación y tabla 4 a continuación.

$$Produccion\ L\ año = \sum_{n=1}^{12} (producción\ media\ diaria_n * \#equipos * días\ de\ funcionamiento_n)$$

Cantidad Unit		14	13	17
		AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
Mes	# Dias de Funcionamiento	Producción (L)	Producción (L)	Producción (L)
Enero	30	1 200 485	1 235 621	1 236 591
Febrero	10	345 392	355 501	355 780
Marzo	30	1 260 784	1 297 685	1 298 704
Abril	29	1 427 300	1 469 074	1 470 227
Mayo	30	1 704 014	1 753 888	1 755 264
Junio	29	1 449 438	1 491 860	1 493 031
Julio	30	1 430 524	1 472 393	1 473 548
Agosto	30	1 597 479	1 644 234	1 645 524
Setiembre	29	1 787 462	1 839 777	1 841 222
Octubre	30	1 721 045	1 771 417	1 772 808
Noviembre	29	1 599 361	1 646 172	1 647 464
Diciembre	30	1 435 722	1 477 743	1 478 902
<b>TOTAL</b>	<b>336</b>	<b>16 959 006</b>	<b>17 455 365</b>	<b>17 469 066</b>
<b>Litros año/equipo</b>	<b>-</b>	<b>1 211 358</b>	<b>1 342 720</b>	<b>1 027 592</b>

Tabla 4: Cálculos de producción anual equipos AWG (Elaboración propia)

### 3.2. ESTIMACIÓN DE SUMINISTRO ENERGÉTICO NECESARIO

Para el cálculo de suministro energético por cada tecnología, se tomaron en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$\text{Método 1: Producción kWh año} = \text{Potencia(kW)} * \text{Horas año} * \#\text{equipos}$$

$$\text{Método 2: Producción kWh año} = \text{Consumo} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{Litro}} \right) * \text{Volumen año (Litros)} * \#\text{equipos}$$

En función a datos de potencia instalada en kW y las horas de producción año por equipo, se obtuvieron consumos anuales de 4 a 6 GWh (tabla 5).

	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Potencia kW	36	60	46
Producción Litros año/equipo	1 211 358	1 342 720	1 027 592
Horas año de funcionamiento	8064	8064	8064
Ratio de consumo kWh/L	0,24	0,36	0,36
# equipos	14	13	17
Energía requerida (kWh/año) *MET 01 (Ratio kWh x horas x # equipos )	4 064 256	6 289 920	6 306 048
Energía requerida (kWh/año) *MET 02 (Ratio kWh/L x Volumen L x # equipos)	4 064 256	6 289 920	6 306 048

Tabla 5: Cálculo de necesidad energética kWh año tecnología AWG (Elaboración propia)

Ahora bien, tomando en cuenta de forma preliminar un factor de capacidad de 33,5% y 23,3% para producción de energía renovable eólica y fotovoltaica respectivamente (Consultores en energías renovables, 2024), se requería una potencia instalada de 1,38 a 2.15 MW para el parque eólico y de 1,99 a 3,09 MW para el parque fotovoltaico dependiendo de cada tecnología (tabla 6).

$$Potencia\ Instalada\ (MW) = \frac{Energía\ producida\ (MWh)}{FC * Horas\ año \times 1000}$$

	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)	Prom. Max. y Min
Potencia preliminar (MW) - EOLICA FC 33,5%	1,38	2,14	2,15	1,77
Potencia preliminar (MW) - SOLAR FC 23,3%	1,99	3,08	3,09	2,54

Tabla 6: Cálculo preliminar de necesidad potencias instaladas acorde a tecnologías AWG (Elaboración propia)

Cabe aclarar, que para el dimensionamiento de los parques eólico y fotovoltaicos, el proyecto busca alcanzar estas potencias tanto con energía eólica como fotovoltaica, de modo que los sistemas puedan suministrar energía incluso si una de las opciones renovables no está disponible. Cuando haya excedente, este se verterá a la red, contribuyendo a la viabilidad del proyecto.

### 3.3. PRODUCCIÓN EÓLICA

En La Guajira, los parques eólicos en construcción o existentes están ubicados principalmente en la región entre Maicao y Cojoro (zona del parque eólico Windpeshi) y cerca de Cabo de la Vela (zona del parque eólico Guajira I) (figura 16). El proyecto más cercano al área de estudio es el Parque Eólico Camelia, ubicado en los municipios Uribia y Maicao (González, D., 2023), a aproximadamente 15 km de distancia, por lo que no tendría ningún impacto en el proyecto.



Figura 16: Ubicación parques eólicos en Colombia (González, D., 2023)

Para los cálculos de producción de energía eólica se ha considerado la potencia media requerida por las tecnologías consideradas, que es de aproximadamente 1,77 MW, en función a ello, se ha optado por utilizar un único aerogenerador, el Vestas V136-3.45 (tabla 7), ya que tiene una curva de potencia bastante favorable en comparación con otros aerogeneradores e, incluso, frente a soluciones que incluyen 2 o 3 aerogeneradores de menor potencia. Considerando la velocidad media del viento en la región de 7,55 m/s mencionada anteriormente, la potencia generada por el aerogenerador es de aproximadamente 1,7 MW, y con una velocidad de alrededor de 10 m/s se alcanza la potencia máxima de 3,45 MW (figura 17).

Potencia nominal (kW)	3450,0
Velocidad del viento (m/s)	3,0
Velocidad del viento de corte (m/s)	22,5
Wind Class (IEC)	IIIa
Diámetro del rotor (m)	136,0
Superficie del rotor (m2)	14.527,0
Altura del buje (m)	82/112/132/149

Tabla 7: Características Vestas V136-3.25 (Elaboración propia a partir de datos de Wind-turbine-models, s.f.)

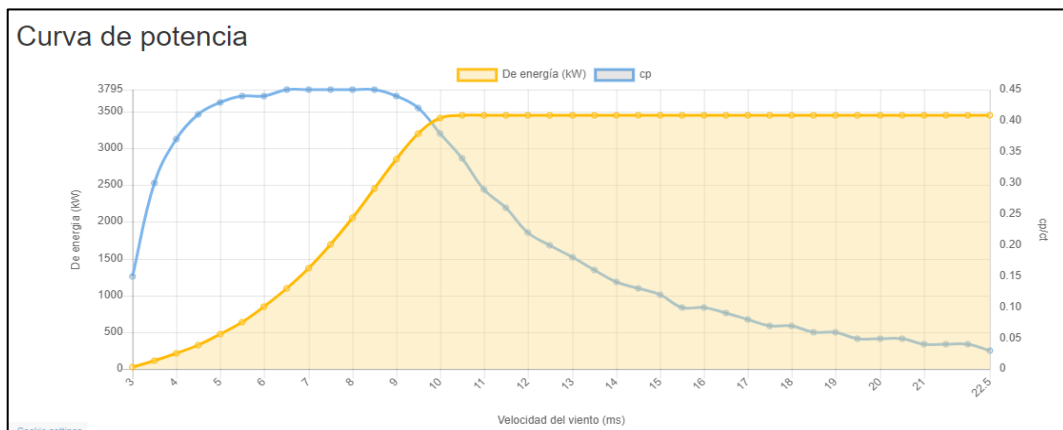


Figura 17: Curva de potencia del aerogenerador Vestas V136-3.25 (Wind-turbine-models, s.f.)

Considerando una distancia de 500m a las rancherías de la región e intentando mantener la menor distancia posible con relación al acueducto Casa Azul, la ubicación elegida para la implantación del aerogenerador está indicada en la figura 18, en las coordenadas 11°44'44.61"N 72°21'19.44"O (11.74572500, -72.35540000), a 730 metros del acueducto. Para más información sobre restricciones de ubicación ver Anexo VI.

Con estas consideraciones, se ha obtenido el informe WAsP del Anexo VIII, en el que la distribución de Weibull omnidireccional proyecta una energía bruta anual de 15,338 GWh y la distribución emergente por sectores de 15,574 GWh. También se obtiene un factor de capacidad de 51,5%, que es bastante elevado ya que los parques eólicos terrestres suelen tener factores entre 20 y 40%.

Para la ubicación exacta de la turbina, la velocidad media obtenida es de 7,47 m/s y la máxima de 10,08 m/s, mientras que la densidad media de potencia es de 343

W/m<sup>2</sup>. Considerando la velocidad media del sitio, la potencia alcanzada es de aproximadamente 1,66 kW.

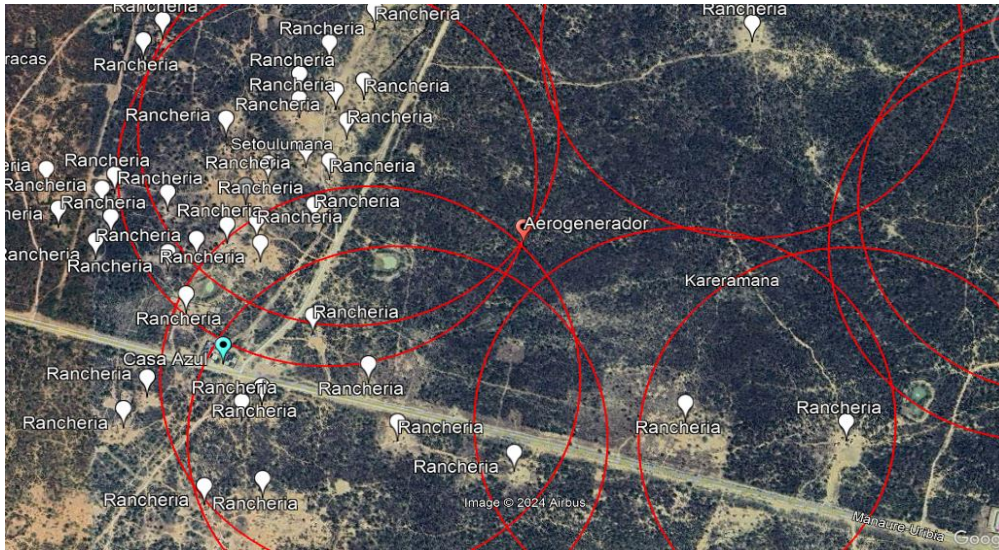


Figura 18: Ubicación aerogenerador (Elaboración propia a partir de datos de Google Earth)

### 3.4. PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA

Para la producción fotovoltaica se ha contemplado la potencia media requerida por las tecnologías consideradas más un sobredimensionamiento del 20% para compensar las pérdidas, por lo cual se va a considerar una potencia de aproximadamente 3 MW para el proyecto. El parque fotovoltaico estará ubicado cerca del aerogenerador, formando un parque híbrido.

Los módulos utilizados son los JKM-600N-66HL4M-BDV, con potencia nominal unitaria de 600 Wp. A través de PVGsys (Anexo IX) se ha realizado la simulación del proyecto, con un total de 5022 módulos y una potencia nominal de 3013 kWp, La distribución de los módulos es de 186 en paralelo y 27 en serie, totalizando un área de 1355 m<sup>2</sup> solamente para los módulos.

Para el inversor se ha elegido el modelo SUN2000-330KTL-H1, de 330 kWac. Serán necesarios 9 unidades, totalizando 2475 kWac.

La energía anual estimada es de 5601,418 MWh, con un índice de rendimiento (PR) de 84,96%.

## **CAPÍTULO IV: ESTUDIOS ECONÓMICOS**

### **4.1. ANÁLISIS DE INVERSIÓN**

#### **4.1.1. Planta generadora de agua atmosférica**

En función al número y precios comerciales de cada equipo AWG, sumado a los costos de transporte marítimos e instalación estimados en la tabla 8, se determinaron inversiones totales para el proyecto desde 1.2 a 6.9 millones de USD, siendo la tecnología *Cowwin* la más económica.

Inversión equipos (USD)	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
<b>Costo Total Equipos USD</b>	<b>\$6 300 000</b>	<b>\$3 480 132</b>	<b>\$1 065 821</b>
Costo unitario	450 000,0	267 702,5	62 695,3
#equipos	14,0	13,0	17,0
<b>Costo transporte</b>	<b>\$637 770</b>	<b>\$351 898</b>	<b>\$143 132</b>
Units/Cont. 20"	1,0	2,0	1,0
Impuestos + tramites aduana (10%)	630 000,0	348 013,2	106 582,1
# contenedores 20"	14,0	7,0	17,0
USD/contenedor	\$555	\$555	\$2 150
<b>Instalacion</b>	<b>\$9 750</b>	<b>\$8 400</b>	<b>\$10 950</b>
# Tecnicos	3	3	3
Dias instalacion	6	5	7
Vuelo tecnico + Visa/tecnico	\$550	\$550	\$2 250
Hospedaje + Viaticos/dia	\$50	\$50	\$50
Tarifa USD/dia	\$400	\$400	\$150
<b>COSTO TOTAL USD</b>	<b>\$6 947 520</b>	<b>\$3 840 430</b>	<b>\$1 219 903</b>
<b>Ratio CAPEX - USD/equipo</b>	<b>\$496 251</b>	<b>\$295 418</b>	<b>\$71 759</b>

Tabla 8: Resumen de inversión equipos planta de generación agua atmosférica  
(Elaboración propia)

#### **4.1.2. Planta producción de energías renovables**

Para el caso del parque eólico, se consideró un ratio de inversión de 1142 USD/kW instalado tomado como referencia del proyecto Guajira I de la compañía colombiana Isagen (Valora Analitik, 2022), así también, para el desglose de costes se tomaron en cuenta porcentajes referenciales establecidos en el reporte de costos de generación de energía renovable (IRENA, 2023) obteniendo una inversión de 3,94 millones de USD.



Por su parte, para la instalación fotovoltaica se consideró un ratio de 837 USD/kW, tomado del promedio de países de la región sudamericana (IRENA, 2023), obteniendo una inversión de 2,5 millones de USD.

Finalmente, entre los 2 proyectos se obtuvo como resultado una inversión total de 6,46 millones de USD, equivalente a un ratio de 1000 USD/kW instalado (Tabla 9).

PARQUE EÓLICO (1)		
Potencia nominal (MW)		3,45
Ratio (USD/kW)		1 142
<b>Inversión total (USD)</b>		<b>3 939 900</b>

Item	%	CAPEX USD
Aerogenerador	67%	\$2 639 733
Instalaciones electricas	5%	\$196 995
Subestacion y conexion electrica	18%	\$709 182
Obra civil e Ingenieria	8%	\$315 192
Promocion	2%	\$78 798
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>\$3 939 900</b>

PARQUE FOTOVOLTAICO (2)		
# paneles		5022
# inversores		9
Potencia nominal (MW)		3,013
Ratio (USD/kW)		837
<b>Inversión total (USD)</b>		<b>2 521 881</b>

Item	%	CAPEX USD
Paneles	32%	\$803 467
Inversores	6%	\$140 607
Otros componentes	26%	\$662 860
Instalacion	16%	\$401 733
Costos indirectos/administrativos	20%	\$513 214
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>\$2 521 881</b>

<b>TOTAL 1+2</b>	<b>\$6 461 781</b>
------------------	--------------------

<i>Ratio CAPEX - USD/Kw</i>	<i>\$1 000</i>
-----------------------------	----------------

Tabla 9: Resumen de inversión planta producción híbrida de energías renovables  
(Elaboración propia)

## 4.2. ANÁLISIS DE COSTOS

En el presente apartado se ha realizado una estimación de costos relacionados al mantenimiento, operación, transporte y suministro energético para la producción y abastecimiento de agua potable a las comunidades de estudio.

### 4.2.1. Costos de mantenimiento y operación



Para la estimación de costos de mantenimiento y operación se ha tomado como referencia la guía básica de generadores de agua atmosférica (Aquasol, 2024), a nivel general estos equipos operan de forma autónoma, su instalación suele ser *plug and play* y su mantenimiento puede estar a cargo del mismo usuario abarcando actividades como limpieza de tanques, filtros, reposición de lámparas UV y refrigerantes. En función a las actividades en mención, frecuencia y número de equipos, podemos ver el resumen de costos estimados en la tabla 10 a continuación.

#equipos		14,0	13,0	17,0
Produccion (m3)		16 959	17 455	17 469
Costos mantenimiento & operacion		AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
		AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Limpieza de tanques	mensual	\$2 520	\$2 340	\$3 060
Filtro sedimentos	cada 6 meses	\$14 000	\$13 000	\$17 000
Filtro aire y agua	anual			
Lampara rayos UV	cada 2 años			
Refrigerantes	acorde a necesidad			
Costo Total USD		\$16 520	\$15 340	\$20 060
Ratio USD/L		0,001	0,001	0,001

Tabla 10: Cálculos costos de mantenimiento y operación (Elaboración propia)

#### 4.2.2. Costos de transporte

Para la estimación de costos de transporte del agua potable generada hacia las comunidades de estudio, el estudio tomó en cuenta el uso de carros cisterna con capacidades 5000 L, y un recorrido promedio de 10km. Así también, una tarifa de 2000 pesos colombianos por tonelada – km (Sodexo, 2023). De esta manera, se obtuvo un ratio de 0,005 USD por litro producido y costos totales acorde a la tabla 11.

Costos de transporte	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Capacidad Cisterna L	5000	5000	5000
USD/km x cisterna	2,4	2,4	2,4
Km ruta promedio	10	10	10
USD/vuelta	23,736	23,736	23,736
Ratio USD/L	0,005	0,005	0,005
USD Totales	80 508	82 864	82 929

Tabla 11: Cálculos ratios costos de transporte (Elaboración propia)

4.2.3. Costos de suministro energético de la red

Para estimar los costos de suministro energético, el estudio tomó en cuenta el listado de tarifas de la red eléctrica nacional Colombia (ENEL, 2024), teniendo el último valor registrado mes de septiembre 1007,645 pesos colombianos (0,24 USD).

En función a la tarifa y consumo energético de los equipos, se procede a realizar una estimación de costes energéticos (tabla 12), obteniendo un ratio de costo de 0,06 a 0,08 USD por litro producido.

Costos de suministro energetico - RED	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Tarifa (USD/Kwh)	0,24	0,24	0,24
Consumo (Kwh)	4064256	6289920	6306048
Ratio (kWh/L)	0,24	0,36	0,36
Ratio USD/L	0,06	0,09	0,09
USD Totales	971 921	1 504 164	1 508 021

Tabla 12: Cálculo ratios de suministro energético – mercado actual (Elaboración propia)

4.2.4. Costos de suministro energético mediante uso de energías renovables

Para el cálculo de costos de explotación de energías renovables, se tomó como referencia ratios de eólica y fotovoltaica en USD/kWh producidos el reporte de costos de generación de energía renovable (IRENA, 2023). Obteniendo un monto total de 844,644 USD anuales, equivalente a un ratio de 0,04 USD/kWh, seis veces inferior al precio del mercado (tabla 13).

**PARQUE EÓLICO (1)**

Produccion anual (Gwh)	15,34
Ratio (USD/kwh)	0,039
<b>Coste de operacion (USD)</b>	<b>598 182</b>

Item	%	OPEX USD
O&M Aerogenerador	57%	\$337 973
O&M Instalacion electrica	2%	\$11 964
Alquiler de tierras	19%	\$110 664
Seguros	2%	\$11 964
Tasas y otros	2%	\$11 964
Gastos administrativos	19%	\$113 655
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>\$598 182</b>

**PARQUE FV (2)**

Item	OPEX USD
Produccion anual (Gwh)	5,60
Ratio (USD/kwh)	0,044
<b>Coste de operacion (USD)</b>	<b>\$246 462</b>

<b>TOTAL 1+2</b>	<b>\$844 644</b>
------------------	------------------

*Ratio OPEX - USD/kwh**0,040*

Tabla 13: Cálculo de costos de explotación propuesta de Energías Renovables  
(Elaboración propia)

Para efectos del ejercicio, se consideró una tarifa equivalente al costo operativo con un adicional de 25%, logrando un ratio de 0,05 USD/kWh y costos totales por cada tecnología acorde a la tabla 14.

Costos de suministro energetico (USD/L) - EERR	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Tarifa (USD/Kwh)	0,05	0,05	0,05
Consumo (Kwh)	4064256	6289920	6306048
Ratio (kWh/L)	0,24	0,36	0,36
<b>Ratio USD/L</b>	<b>0,012</b>	<b>0,018</b>	<b>0,018</b>
<b>USD Totales</b>	<b>204928</b>	<b>317150</b>	<b>317963</b>

Tabla 14: Cálculo ratios de suministro energético con energías renovables

### 4.3. ESTIMACIÓN DE VENTA

#### 4.3.1. Ingresos por venta de agua potable

Debido a los altos costos iniciales y de operación, los sistemas de generación de agua atmosférica son en general más caros que los sistemas de agua de red pública, llegando a valores por encima de 0.15 USD/L (Haura Energy, 2020), sin

embargo, los mismos son una alternativa válida en zonas aisladas y de poco acceso a un agua de calidad necesaria para la vida de las comunidades.

Teniendo en cuenta que este recurso busca ser accesible a la comunidad de estudio, se consideró un precio estimado de 0,058 USD/L, equivalente a 250 pesos colombianos obteniendo ingresos acordes a la tabla 15. Cabe mencionar, que este precio es mucho más accesible frente a la venta de agua embotellada con precios por encima de los 2000 pesos colombianos por litro (Sánchez N., 2022)

	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Produccion (L/año)	16 959 006	17 455 365	17 469 066
Tarifa agua (USD/L)	0,058	0,058	0,058
Tarifa agua (Peso Colombiano/L)	250	250	250
<b>Ventas (USD/año) - Agua</b>	<b>\$978 931</b>	<b>\$1 007 583</b>	<b>\$1 008 374</b>

Tabla 15: Propuesta de precios de venta de agua potable (Elaboración propia)

#### 4.3.2. Ingresos por venta de energía renovable

En Colombia, el precio de la energía se tasa en bolsa diariamente entre los generadores y los comercializadores, y el organismo administrador del mercado es la compañía XM (XM Precio de bolsa y escasez, 2024), quien recibe las ofertas y proyecta la demanda hora a hora los 365 días del año, este precio no solo varia a lo largo del día, sino que presenta grandes fluctuaciones durante el año debido a la fuerte dependencia del sistema eléctrico colombiano del sector hidráulico, ya que más del 60% de su matriz energética proviene de esta fuente primaria (XM, 2024), por tanto está sujeto a los ciclos de lluvia y sequía y a fenómenos climáticos como El Niño o La Niña (XM, Condiciones climáticas, 2024).

Para la estimación de ingresos por venta de energía renovable excedente se analizaron los precios del mercado de energía en bolsa de los últimos 6 años (figura 19), en el mismo, podemos notar el precio promedio estuvo por debajo de los 215 pesos colombianos anteriores al 2022 y los años posteriores este aumento en más de 160%. Tomando en cuenta la tendencia de precios a la alza, para el análisis se ha considerado un precio promedio de los últimos 2 años, obteniendo un valor de 587 pesos colombianos por kWh, equivalente a 136 USD/MWh.

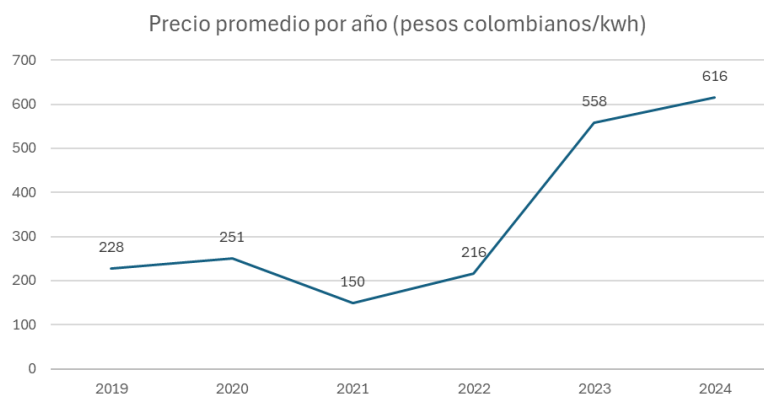


Figura 19: Precios de energía en bolsa Colombia 2023/2024 (Elaboración propia a partir de datos XM Administradores del mercado eléctrico, 2024)

A continuación, se presenta el resumen de ingresos por venta de energía (tabla 16).

#### Parque Eólico/FV

	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Produccion (GWh/año)	20,9	20,9	20,9
Consumo (GWh/año) - Sistemas AWG	4,1	6,3	6,3
Excedente (GWh/año) - Venta RED	16,9	14,6	14,6
Tarifa especial sistemas AWG (USD/kWh)	0,050	0,050	0,050
Tarifa Bolsa RED (USD/kWh)	0,136	0,136	0,136
Tarifa Bolsa RED (Peso Colombiano/kWh)	587	587	587
<b>Ventas Energía (USD/año) - Sistemas AWG</b>	<b>\$204 928</b>	<b>\$317 150</b>	<b>\$317 963</b>
<b>Ventas Energía exc. (USD/año) - RED</b>	<b>\$2 287 175</b>	<b>\$1 985 520</b>	<b>\$1 983 334</b>
<b>Ventas Totales (USD/año) - EERR</b>	<b>\$2 492 103</b>	<b>\$2 302 670</b>	<b>\$2 301 297</b>

Tabla 16: Cálculo de Ingresos por venta de sistema híbrido de energías renovables (Elaboración propia)

## 4.4. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

### 4.4.1. Resumen de ingresos totales y periodo de recuperación

En el análisis podemos notar que, si adquirimos estas tecnologías con un costo de suministro energético del mercado, el proyecto de planta generadora de agua obtendría resultados negativos y por ende sin periodo de recuperación (tabla 17). Vemos que, debido a los altos consumos de energía y tarifas actuales de la RED eléctrica nacional, la implementación de este tipo de proyectos sería inviable a la tarifa inicial planteada de 250 pesos colombianos.

	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Produccion (L/año)	16 959 006	17 455 365	17 469 066
Tarifa agua (USD/L)	0,058	0,058	0,058
Tarifa agua (Peso Colombiano/L)	250	250	250
<b>Ventas (USD/año) - Agua</b>	<b>\$978 931</b>	<b>\$1 007 583</b>	<b>\$1 008 374</b>
Costos mantenimiento & operacion (USD/año)	16 520	15 340	20 060
Costos de transporte (USD/año)	80 508	82 864	82 929
Costos de suministro energetico (USD/año) - RED	971 921	1 504 164	1 508 021
<b>Costos O&amp;M (USD/año) - Sistemas AWG</b>	<b>\$1 068 949</b>	<b>\$1 602 368</b>	<b>\$1 611 010</b>
<b>Ingresos totales (USD/año)</b>	<b>-\$90 018</b>	<b>-\$594 786</b>	<b>-\$602 637</b>

<b>Inversion (USD) - Sistemas AWG</b>	<b>\$6 947 520</b>	<b>\$3 840 430</b>	<b>\$1 219 903</b>
<b>Payback años</b>	<b>sin recuperó</b>	<b>sin recuperó</b>	<b>sin recuperó</b>

Tabla 17: Cálculo de ingresos totales y periodo de recuperación planta AWG, consumo energético RED (Elaboración propia)

En el escenario de duplicar el precio, se comenzarían a tener resultados positivos con periodos de recuperó simple entre 3 y 9 años (tabla 18).

	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Produccion (L/año)	16 959 006	17 455 365	17 469 066
Tarifa agua (USD/L)	0,115	0,115	0,115
Tarifa agua (Peso Colombiano/L)	500	500	500
<b>Ventas (USD/año) - Agua</b>	<b>\$1 957 863</b>	<b>\$2 015 166</b>	<b>\$2 016 747</b>
Costos mantenimiento & operacion (USD/año)	16 520	15 340	20 060
Costos de transporte (USD/año)	80 508	82 864	82 929
Costos de suministro energetico (USD/año) - RED	971 921	1 504 164	1 508 021
<b>Costos O&amp;M (USD/año) - Sistemas AWG</b>	<b>\$1 068 949</b>	<b>\$1 602 368</b>	<b>\$1 611 010</b>
<b>Ingresos totales (USD/año)</b>	<b>\$888 913</b>	<b>\$412 797</b>	<b>\$405 737</b>

<b>Inversion (USD) - Sistemas AWG</b>	<b>\$6 947 520</b>	<b>\$3 840 430</b>	<b>\$1 219 903</b>
<b>Payback años</b>	<b>7,82</b>	<b>9,30</b>	<b>3,01</b>

Tabla 18: Cálculo de ingresos totales y periodo de recuperación planta AWG, consumo energético RED a tarifa de 500 pesos colombianos (Elaboración propia)

Por otro lado, si complementamos el proyecto con uso de energías renovables y mantenemos el precio inicial propuesto, el periodo de recuperó mejoraría significativamente, obteniendo valores de 3,8 a 5,8 años, siendo la tecnología Cowwin la de menor tiempo de recuperó (tabla 19).

#### Sistema AWG

	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Produccion (L/año)	16 959 006	17 455 365	17 469 066
<b>Ventas (USD/año) - Agua</b>	<b>\$978 931</b>	<b>\$1 007 583</b>	<b>\$1 008 374</b>
<b>Costos O&amp;M (USD/año) - Sistemas AWG</b>	<b>\$301 956</b>	<b>\$415 354</b>	<b>\$420 952</b>

<b>Ingresos totales (USD/año)</b>	<b>\$676 976</b>	<b>\$592 229</b>	<b>\$587 421</b>
-----------------------------------	------------------	------------------	------------------

*Inversion (USD) - Sistemas AWG*      \$6 947 520      \$3 840 430      \$1 219 903

#### Parque Eolico/FV

	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
	AWG-5000	GEN-L	COW-5000L-38
Produccion (GWh/año)	20,9	20,9	20,9
Consumo (GWh/año) - Sistemas AWG	4,1	6,3	6,3
Excedente (GWh/año) - Venta RED	16,9	14,6	14,6
Tarifa especial sistemas AWG (USD/kWh)	0,050	0,050	0,050
Tarifa Bolsa RED (USD/kWh)	0,136	0,136	0,136
Tarifa Bolsa RED (Peso Colombiano/kWh)	587	587	587
<b>Ventas Energia (USD/año) - Sistemas AWG</b>	<b>\$204 928</b>	<b>\$317 150</b>	<b>\$317 963</b>
<b>Ventas Energia exc. (USD/año) - RED</b>	<b>\$2 287 175</b>	<b>\$1 985 520</b>	<b>\$1 983 334</b>
<b>Ventas Totales (USD/año) - EERR</b>	<b>\$2 492 103</b>	<b>\$2 302 670</b>	<b>\$2 301 297</b>
Costos Operacion y Mantenimiento - Parque Eolico	\$598 182	\$598 182	\$598 182
Costos Operacion y Mantenimiento - Parque FV	\$246 462	\$246 462	\$246 462
<b>Costos Totales (USD/año) - EERR</b>	<b>\$844 644</b>	<b>\$844 644</b>	<b>\$844 644</b>

<b>Ingresos totales (USD/año)</b>	<b>\$1 647 458</b>	<b>\$1 458 025</b>	<b>\$1 456 653</b>
-----------------------------------	--------------------	--------------------	--------------------

*Inversion (USD) - EERR*      \$6 461 781      \$6 461 781      \$6 461 781

<b>Ingresos TOTALES (AWG+EERR)</b>	<b>\$2 324 434</b>	<b>\$2 050 254</b>	<b>\$2 044 074</b>
<b>Inversión TOTAL (AWG+EERR)</b>	<b>\$13 409 301</b>	<b>\$10 302 211</b>	<b>\$7 681 684</b>
<b>Payback años</b>	<b>5,77</b>	<b>5,02</b>	<b>3,76</b>

Tabla 19: Cálculo de ingresos totales y periodo de recuperación planta AWG con uso de energías renovables (Elaboración propia)

#### 4.4.2. Análisis de flujo de caja

Para complementar el estudio, se realizó un análisis de flujo de caja para cada una de las tecnologías seleccionadas, para ello, se tomó en cuenta un periodo de 20 años y porcentaje de financiación del 80%. Finalmente, se obtuvieron los resultados de rentabilidad acorde a la tabla 20, siendo la tecnología *Cowwin* la de mejores indicadores. Para mayor detalle de variables y flujos de caja ver Anexo X.

	AWG Contracting (USA)	Watergen (USA)	Cowwin (China)
Payback simple (años)	5,61	4,77	3,43
ROI	17,8%	20,9%	29,1%
VAN (USD)	13 499 574	14 244 680	18 213 858
TIR	12,5%	15,1%	21,5%
Relación Coste Beneficio	1,68	1,68	1,84
Payback compuesto (años)	9,97	8,39	5,93

Indice de potencia USD/kW	999,81	999,81	999,81
Indice de energía USD/kWh	0,31	0,31	0,31
Indice de energía promedio USD/kWh	0,31	0,31	0,31

Tabla 20: Análisis de Rentabilidad del Proyecto AWG con uso de Energías Renovables  
(Elaboración propia)

#### 4.4.3. Sensibilidad de precios

La figura 20 nos muestra el comportamiento de la TIR y el periodo de retorno de la inversión compuesto (*Payback*) frente a una variación de precios. Haciendo uso de la tecnología AWG de la compañía *Cowwin*, con un precio aproximado de 136 USD/MWh (587 COP/kWh) se podría obtener una TIR del 22% y un *Payback* de 5.9 años (verde). Así mismo se puede estimar el precio para un periodo de retorno de 10 años, (rojo), en torno a los 88 USD/MWh (380 COP/kWh) con una TIR de 12.7% y si proyectamos el precio promedio del último año, 2024, de aproximadamente 142 USD/MWh (616 COP/kWh) se tendría un *Payback* de 5.6 años y una TIR del 22,8% (violeta).

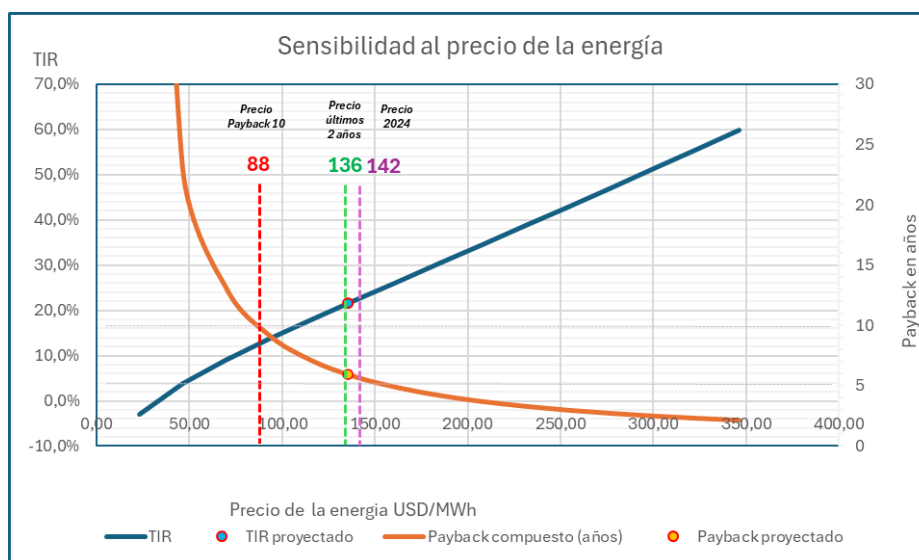


Figura 20: Sensibilidad del proyecto a diferentes precios de energía en bolsa USD/MWh  
(Elaboración propia)



#### 4.4.4. Sensibilidad económica en función a humedad y temperatura

Para evaluar la replicabilidad del estudio, se realizó una simulación de escenarios económicos en función a variables de humedad y temperatura en diferentes áreas geográficas, en particular, ciudades que afrontarán desafíos de escasez de agua al 2050 (UAM Cuajimalpa, 2021). Acorde con las tablas 21, vemos que, considerando un flujo de aire fijo de 4,6 m<sup>3</sup>/s, la producción de agua no es factible para lugares como Ciudad de México y El Cairo con humedades relativas y temperaturas por debajo de 61% y 22°C.

Mes	Ciudad Referencia	Altitud (msnm)	HR media (%)	Temp. media (°C)	Datos carta psicrométrica		Sistema AWG seleccionado		
					Humedad abs. g agua/kg aire seco	Densidad aire kg/m <sup>3</sup>	Producción media diaria (L)	Días de Produccion	Producción anual (L)
Estudio	La Guajira	-	74%	28	18,026	1,158	3 058	336	1 027 592
E1	Jakarta (Indonesia)	-	81%	26	17,183	1,168	2 732	336	917 876
E2	Nueva Delhi (India)	216	80%	25	16,388	1,143	2 348	336	789 007
E3	Sao Paulo (Brasil)	762	80%	20	12,842	1,091	857	336	288 105
E4	Lima (Peru)	101	80%	19	11,119	1,186	201	336	67 571
E5	CD Mexico	2240	61%	16	9,070	0,924	-521	336	-174 924
E6	El cairo (Egipto)	-	46%	22	7,559	1,190	-1 314	336	-441 407

Tabla 21: Escenarios de producción de agua sistemas AWG a diferentes humedades y temperaturas (Elaboración propia a partir de datos *Climate Data* 2021 y Herramientas de ingeniería, 2024)

Por otra parte, si evaluamos la producción en lugares como Lima y Sao Paulo, se tendrían bajas producciones de agua haciendo no rentable este tipo de inversiones (tabla 23) debido principalmente a las bajas temperaturas promedio año.

Finalmente, en ciudades como Yakarta y Nueva Delhi, se tienen tiempos de recupero simple por debajo de 5 años debido principalmente a condiciones de alta humedad y temperaturas por encima de los 25°C.

Item	Ciudad Referencia	# Equipos Requeridos	Producción anual (L)	Consumo Energetico (kWh año)	Ratio consumo (kWh/L)	Produccion EERR (kWh año)	Excedentes EERR (kWh año)	CAPEX AWG + EERR (USD)	OPEX AWG + EERR (USD)	Ventas Agua + EERR (USD)	Ingresos totales (USD)	Payback (años)
Estudio	La Guajira	17	17 469 066	6 306 048	0,361	20 939 418	14 633 370	7 687 710	1 265 597	3 309 671	2 044 074	3,76
E1	Jakarta (Indonesia)	19	17 439 635	7 047 936	0,404	20 939 418	13 891 482	7 831 228	1 302 831	3 244 827	1 941 997	4,03
E2	Nueva Delhi (India)	22	17 358 163	8 160 768	0,470	20 939 418	12 778 650	8 046 505	1 358 461	3 145 408	1 786 947	4,50
E3	Sao Paulo (Brasil)	60	17 286 302	22 256 640	1,288	20 939 418	-1 317 222	10 773 346	2 068 779	2 053 629	-15 149	Sin recupero
E4	Lima (Peru)	255	17 230 554	94 590 720	5,490	20 939 418	-73 651 302	24 766 346	5 715 673	2 050 411	-3 665 261	Sin recupero
E5	CD Mexico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E6	El cairo (Egipto)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 22: Escenarios de ingresos y periodo de recupero a diferentes humedades y temperaturas promedio (Elaboración propia)

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES / CONCLUSIONS**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

- Se determinó que la tecnología AWG de la empresa *Cowwin* es la más viable económicamente para desarrollar un proyecto piloto que cubra el 20% del requerimiento de agua para consumo directo de las comunidades de los municipios de Uribia y Manaure con una inversión total de 7,68 millones de USD, inversión que con la venta directa de agua y de los excedentes de energía renovable se recuperaría en 5.93 años con una TIR del 21,5% (financiamiento al 80%).
- Con la tecnología seleccionada, el proyecto plantea la instalación de una planta generadora de agua atmosférica con capacidad total de 17.47 millones de litros año (17 equipos) y un parque eólico-fotovoltaico con capacidad nominal total 6.46 MW y producción anual de 20,94 GWh. El parque eólico cuenta con un factor de capacidad de 51% eólico, mientras que el parque fotovoltaico 21%. Con estas capacidades se pretende abastecer las necesidades de agua para consumo directo de 23,930 habitantes y venta de excedentes de energía renovable a la red eléctrica nacional.
- El sistema genera excedentes de energía estimados entre los 14,6 y 16,9 GWh/año, cuya venta a la red podría aportar aproximadamente 2 millones de dólares anuales de ingresos, contribuyendo a un retorno de inversión compuesto (*Payback*) de entre 6 y 10 años, según la tecnología utilizada. Sin el uso de energías renovables, el precio de venta de agua sería muy alto, haciendo el proyecto menos viable.
- Si se quisiera abastecer el 100% de la demanda no atendida, es decir, 85,86 millones de litros al año, se requerían adquirir 84 equipos AWG con una necesidad energética de 31,17 GWh. Manteniendo el mismo esquema de suministro energético renovable capacidad de abastecimiento total independiente, se requerirían 25,8 MW entre energía eólica y fotovoltaica, lo que incrementaría la inversión inicial en 23 millones de USD de forma preliminar.
- En Colombia las iniciativas de energías renovables están siendo favorecidas por los altos precios de la energía y se considera que este es el factor de mayor

impacto en la rentabilidad del proyecto, en lo que va del 2024 este se promedia en 616 COP/kWh (0.142 USD/kWh), 10% mayor al promedio de 2023 y muestra una clara tendencia a seguir aumentado. Se estima que a un precio de energía menor a los 380 COP/kWh (0.088 USD/kWh) se tendrían *Paybacks* por encima de los 10 años, haciendo menos atractivo el proyecto.

- Se puede afirmar que esta tecnología es escalable, sin embargo, no se puede implementar en cualquier zona del planeta, ya que requiere de unas condiciones mínimas de humedad y temperatura, las ubicaciones con temperaturas medias anuales superiores a 25°C y alta humedad relativa son óptimas para replicar tecnologías AWG, con tiempos de recuperación de inversión cortos, como los ejemplos de Yakarta y Nueva Delhi.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se evidencia que las tecnologías AWG están cobrando alta relevancia y se perfilan como una solución viable a los problemas de escasez de agua en ciertas zonas del mundo. Cabe precisar que, si bien estas tecnologías requieren altos consumos de energía, su funcionamiento con sistemas basados en energías renovables puede viabilizar y generar sostenibilidad en proyectos de este tipo, independientemente de si existe o no un aprovechamiento de excedentes para verter a la red eléctrica nacional. Por supuesto, aún existen desafíos en cuanto al uso de las tecnologías AWG que deben ser superados, como la optimización de los costos, la mejora de la eficiencia energética y la ampliación de estas soluciones a mayor escala.
- Para la obtención de información más precisa sobre ratios de consumo energético por cada tecnología, es importante profundizar los estudios y fichas técnicas directamente con los fabricantes. Para el presente trabajo, se consideró información disponible de la web.
- Durante el desarrollo del presente estudio se evidenció que La Guajira colombiana, cuenta con un enorme potencial energético, en lo que a renovables se refiere ya que posee un régimen de vientos fuerte y constante con velocidades medias de entre 9 y 12 m/s en algunas áreas, ideales para proyectos eólicos, y es una de las zonas de mayor radiación solar de Colombia

con hasta 6 kWh/m<sup>2</sup>, además de contar con un elevado número de horas de sol al año, altas temperaturas y alta humedad, lo que la convierte en un lugar privilegiado y el nicho ideal para el desarrollo de estas tecnologías de cara a la transición energética.

- El proyecto tiene un gran potencial para ser sostenible debido a su rentabilidad, bajo impacto ambiental, replicabilidad y alto impacto social. La propuesta presenta una visión innovadora con grandes beneficios, principalmente al integrar fuentes de energías renovables disponibles en la región y contribuyendo significativamente a la autosuficiencia hídrica de las comunidades vulnerables. Además, impacta en la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y de la huella de carbono, genera nuevos nichos económicos, contribuye al empleo local, dinamiza la economía y expande los campos de conocimiento al requerir mano de obra calificada, mejorando así la calidad de vida de los habitantes y contribuyendo al desarrollo del departamento de la Guajira. De esta manera, se respaldan también varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), incluyendo salud y bienestar, agua limpia, energía asequible y no contaminante, trabajo decente y crecimiento económico. Así también, se promueve una mayor aceptación de las comunidades locales hacia la producción de energías renovables.
- A pesar de los beneficios del proyecto, existen algunos impactos negativos que deben ser gestionados adecuadamente. La compactación del suelo y la alteración de la vegetación son inevitables durante la instalación, mientras que el aerogenerador puede representar un riesgo de colisión para aves y murciélagos. El impacto visual del aerogenerador y el contenedor puede alterar el paisaje y generar oposición por parte de la comunidad local, y el ruido generado por el aerogenerador y el ventilador debe ser mitigados para minimizar molestias. Una planificación cuidadosa y una comunicación constante con la comunidad local son esenciales para garantizar la viabilidad y la aceptación del proyecto a largo plazo. Para mayor detalle ver Anexo VII.

## DISCUSSION OF RESULTS

- *It is estimated that the AWG technology from Cowwin is the most economically viable option for developing a pilot project that would cover 20% of the water needs for direct consumption in the communities of the municipalities of Uribia and Manaure. The total investment required is 7.68 million USD. This investment, through the direct sale of water and surplus renewable energy, is expected to be recovered in approximately 5.93 years with an IRR of 21.5% (80% financing).*
- *With the selected technology, the project proposes the installation of an atmospheric water generating plant with a total capacity of 17.47 million liters per year (17 units) and a wind-photovoltaic park with a total nominal capacity of 6.46 MW and an annual production of 20.94 GWh. The wind farm has a capacity factor of 51%, while the photovoltaic park has a capacity factor of 21%. These capacities are intended to supply the water needs for direct consumption of 23,930 inhabitants and to sell surplus renewable energy to the national electrical grid.*
- *The system generates surplus energy estimated between 14.6 and 16.9 GWh/year, the sale of which to the grid could provide approximately 2 million dollars of annual income, contributing to a compound return on investment (Payback) of between 6 and 10 years, depending on the technology used. Without the use of renewable energy, the sales price of water would be very high, making the project less viable.*
- *If you wanted to supply 100% of the unmet demand, which amounts to 85.86 million liters per year, you would need to purchase 84 AWG units with an energy requirement of 31.17 GWh. To maintain the same renewable energy supply scheme with total independent supply capacity, 25.8 MW from wind and photovoltaic energy would be required, which would increase the initial investment by approximately USD 23 million.*
- *In Colombia, renewable energy initiatives are being favored by high energy prices, which is considered the factor with the greatest impact on the project's*

*profitability. So far in 2024, the average energy price is 616 COP/kWh (0.142 USD/kWh), 10% higher than the 2023 average, and shows a clear trend of continuing to increase. It is estimated that at an energy price lower than 380 COP/kWh (0.088 USD/kWh), the payback period would exceed 10 years, making the project less attractive.*

- This technology is scalable; however, it cannot be implemented in just any area of the planet, as it requires minimum humidity and temperature conditions. Locations with average annual temperatures above 25°C and high relative humidity are optimal for replicating AWG technologies with short payback times, such as in the examples of Jakarta and New Delhi.*

## **CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS**

- It is evident that AWG technologies are becoming highly relevant and are emerging as a viable solution to the problems of water scarcity in certain areas of the world. It should be noted that, although these technologies require high energy consumption, their operation with systems based on renewable energy can make projects of this type viable and generate sustainability, regardless of whether or not there is a use of surpluses to feed into the national electrical grid. Of course, there are still challenges in using AWG technologies that must be overcome, such as optimizing costs, improving energy efficiency, and scaling these solutions to a larger scale.*
- To obtain more precise information on energy consumption ratios for each technology, it is important to deepen the studies and technical sheets directly with the manufacturers. For this work, information available from the web was considered.*
- During the development of this study, it was evident that La Guajira, Colombia, has enormous energy potential in terms of renewables, since it has a strong and constant wind regime with average speeds between 9 and 12 m/s in some areas, ideal for wind projects. It is also one of the areas with the highest solar radiation in Colombia, with up to 6 kWh/m<sup>2</sup>, in addition to*

*having a high number of sunshine hours per year, high temperatures, and high humidity, which makes it a privileged place and the ideal niche for the development of these technologies in the face of the energy transition.*

- The project has great potential to be sustainable due to its profitability, low environmental impact, replicability, and high social impact. The proposal presents an innovative vision with great benefits, mainly by integrating renewable energy sources available in the region and contributing significantly to the water self-sufficiency of vulnerable communities. Additionally, it impacts the reduction of dependence on fossil fuels and the carbon footprint, generates new economic niches, contributes to local employment, boosts the economy, and expands fields of knowledge by requiring qualified labor. This, in turn, improves the quality of life of the inhabitants and contributes to the development of the department of La Guajira. In this way, several Sustainable Development Goals (SDGs) are also supported, including health and well-being, clean water, affordable and clean energy, decent work, and economic growth. Furthermore, it promotes greater acceptance of local communities towards the production of renewable energy.*
- Despite the benefits of the project, there are some negative impacts that must be managed appropriately. Soil compaction and vegetation disturbance are inevitable during installation, while the wind turbine may pose a collision risk to birds and bats. The visual impact of the wind turbine and container can alter the landscape and generate opposition from the local community. Additionally, the noise generated by the wind turbine and fan should be mitigated to minimize disturbance. Careful planning and constant communication with the local community are essential to ensure the long-term viability and acceptance of the project. For more details, see Annex VII.*

## **BIBLIOGRAFÍA**

Aquasol (2024). Guía básica antes de comprar un generador atmosférico.

Obtenido de <https://aquasol.cat/es/archivos/comprar-generador-agua-atmosferico>

Asociación de Energías Renovables Colombia (2017). Justificación no DAA

proyectos de energías renovables. Obtenido de <https://www.ser-colombia.org/images/Anexo-4.pdf>

Atlas Climatológico de Colombia (s.f.). Distribución espacio-temporal de las características de humedad del aire. Obtenido de

<http://www.cambioclimatico.gov.co/AtlasWeb/info/Textos/hrel-text.pdf>

Berg C.E. (2016). Contenido teórico del boletín técnico COLMAC COIL

Manufacturing Inc. Psicrometría y la Carta Psicrométrica. Obtenido de [www.colmaccoil.com](http://www.colmaccoil.com)

Bonet, J. y L.W. Hahn (2017), La Mortalidad Infantil en La Guajira: Una

Caracterización Estructural, Banco de la República – sucursal Cartagena.

Consultores en energías renovables (5 Julio de 2024). Factor de capacidad en las

renovables. Obtenido de <https://wemakeconsultores.com/factor-de-capacidad-en-las-renovables/>

Corpoguajira. (6 de septiembre de 2017). Resolucion N° 1688. Obtenido de

<https://corpoguajira.gov.co/wp-content/uploads/2018/02/RESOLUCI%C3%93N-No.-1688-DEL-6-DE-SEPTIEMBRE-DE-2017.pdf>



DANE. (2017). Resultados y proyecciones (2005-2020) del censo 2005. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/cuantos-somos>

DANE. (2019). Proyecciones de población y estadísticas demográficas. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Obtenido de <https://sitios.dane.gov.co>

DANE. (2020). La información del DANE en la toma de decisiones de los departamentos: La Guajira. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Obtenido de <https://www.dane.gov.co>

DANE (2022). Comunicado de prensa. Incidencia de la pobreza monetaria 2021-2022. Obtenido de [www.dane.gov.co](http://www.dane.gov.co)

DANTHERMGROUP. (12 de junio de 2024). Mantener la productividad en movimiento con una deshumidificación focalizada. Obtenido de <https://www.danthermgroup.com/es/articulos/mantener-la-productividad-en-movimiento-con-una-deshumidificacion-focalizada>

Damario E. (2020). Contenido teórico de La Unidad Temática B, Actualización del Apunte de Climatología y Fenología Agrícolas del CEA 1979. Pág. 10. Obtenido en: [aulavirtual.agro.unlp.edu.ar](http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar)

Diaz, A. (2008). Psicometría. Obtenido de <https://avdiaz.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/01/i-unidad3.pdf>

Duque, J. P. (marzo de 2019). La ranchería de los Wayuu en la Guajira. Colombia. Obtenido de <https://www.revistacredencial.com/historia/temas/la-rancheria-de-los-wayuu-en-la-guajira>

Enel (septiembre de 2024). Tarifas de energía. Obtenido en  
<https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-distribucion.html>

Energetica 30 (2021). Mapa muestra zonas de colombia aptas para energía solar y eólica. Obtenido de <https://medellin.unal.edu.co/la-sede-en-los-medios/4182-mapa-muestra-zonas-de-colombia-aptas-para-energia-solar-y-eolica.html>

European Commission. (2015). PVGIS. Obtenido de [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en)

Galindo Torres, M., Gregorio Contreras, J., y Mendoza Ortiz, A. (2018). Condensación de la humedad del aire: solución a la escasez de agua en regiones de Colombia como La Guajira y San Andrés Isla. *Letras ConCiencia TecnoLógica*, (13), 15-24. Obtenido de <https://doi.org/10.55411/26652544.118>

García Arbeláez C., Vallejo G., Lou Higgings M. y Escobar E. M. (2016). El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático. 1 ed. WWF-Colombia. Cali, Colombia. 52 pp. Obtenido de [https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/documentos\\_tecnicos\\_soporte/As%C3%AD\\_actuar%C3%A1\\_Colombia\\_frente\\_al\\_cambio\\_clim%C3%A1tico.pdf](https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/documentos_tecnicos_soporte/As%C3%AD_actuar%C3%A1_Colombia_frente_al_cambio_clim%C3%A1tico.pdf)

Global Wind Atlas. (2024). Obtenido de <https://globalwindatlas.info/es>

Gobernación de La Guajira. (2024). La Guajira. Obtenido de <https://www.laguajira.gov.co/LaGuajira/Paginas/La-Guajira.aspx>

Gobierno de Colombia (2014). Ley 1715: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

Gobierno de Colombia (2021). Ley 2099: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=16632>

6

Gobierno de Colombia (2024). Colombia en Mapas. Obtenido de <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>

González, D. (2023). Los parques eólicos dividen a comunidades indígenas de Colombia. Obtenido de <https://dialogue.earth/es/energia/368855-los-parques-eolicos-dividen-a-comunidades-indigenas-de-colombia-wayuu/>

Google Maps. (2024). Obtenido de [https://www.google.com/maps/@11.7619159,-72.3326479,12305m/data=!3m1!1e3?hl=es&entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI0MDkyNS4wIjKXMDS0ASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/@11.7619159,-72.3326479,12305m/data=!3m1!1e3?hl=es&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MDkyNS4wIjKXMDS0ASAFQAw%3D%3D)

Guerrero et al. (2019). Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia). Ambiente y Desarrollo, vol. 23, núm. 44, 2019. Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado de [https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/AyD/23-44%20\(2019-I\)/151561629005/](https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/AyD/23-44%20(2019-I)/151561629005/)

Grupo Hidráulica. (2022). Atrapanieblas: una solución para tener agua en el desierto de Lima. Obtenido de <https://grupohidraulica.com>

Haura Energy (octubre de 2020). Plantas de Agua Atmosférica (AWP) Experiencias y Desafíos para un Chile en Sequía. Obtenido de [https://www.eda.admin.ch/dam/countries/countries-content/chile/es/tradepoint/Haura%20Energy\\_AWP\\_ES.pdf](https://www.eda.admin.ch/dam/countries/countries-content/chile/es/tradepoint/Haura%20Energy_AWP_ES.pdf)

Herramientas de Ingeniería (2024). Diagrama y calculadora de parámetros psicrométricos online. Obtenido de <https://www.herramientasingeneria.com>

Hidalgo Max (2020). YAWA Tecnología sostenible para el acceso al agua. Obtenido de <https://youtu.be/sFBEaKnZ2mg?si=vpTW5o5hJtgg0IMr>

IDEAM – Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (s.f.). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>

IRENA (2023). *Renewable power generation costs in 2023*. Obtenido de [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA\\_Renewable\\_power\\_generation\\_costs\\_in\\_2023.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf)

LABOMAT. (2024). ¿Cómo medir la humedad? Obtenido de <https://labomat.eu/es/preguntas-frecuentes-temperatura-higrometria/808-como-medir-la-humedad.html>

Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Resolución 1283.

Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-1283-de-2016/>

Montaño, H., Zapata, A., & Sánchez, L. (2022). Construcción de un sistema de extracción de agua subterránea utilizando energías renovables para una comunidad Wayú en La Guajira Colombiana.

ONU. (2010). *The Human Right to Water and Sanitation*. Obtenido de <https://www.amnesty.org>

OMS Datos (2024). Proporción de la población que utiliza servicios de agua potable gestionados de forma segura (%). Obtenido de <https://data.who.int/es/indicators/i/5131A52/1548EA3>

Ospino, A. (1 de 04 de 2023). Antonio Ospino refrigeración y climatización elite. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=tGZexxZf494>

Parlamento Europeo y del Consejo (11 de diciembre 2018). Directiva UE 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Obtenido de en <https://www.cde.ual.es/ficha/directiva-ue-2018-2001-del-parlamento-europeo-y-del-consejo-de-11-de-diciembre-de-2018-relativa-al-fomento-del-uso-de-energia-procedente-de-fuentes-renovables/>

Parlamento Europeo y del Consejo (11 de diciembre 2018). Reglamento UE 2018/1999 sobre la gobernanza de la Unión de la Energía y de la Acción por el Clima. Obtenido de <https://www.cde.ual.es/ficha/reglamento-ue-2018-1999-del-parlamento-europeo-y-del-consejo-de-11-de-diciembre-de-2018-sobre-la-gobernanza-de-la-union-de-la-energia-y-de-la-accion-por-el-clima/>

- Raveesh G., Goyal R., Tyagi S.K. (2021). *Advances in atmospheric water generation technologies*. Obtenido en: <https://www.sciencedirect.com>.
- Revista Mundo HVAC&R (2016). La humedad relativa y sus implicaciones sobre la salud y el confort. Obtenido de <https://www.mundohvacr.com>
- Salinas Carlos (2011). La consulta previa como requisito obligatorio dentro de trámites administrativos cuyo contenido pueda afectar en forma directa a comunidades indígenas y tribales en Colombia. Obtenido de <https://revistas.uexternado.edu.co>
- Sánchez Nicolás (24 de junio de 2022). Agua más cara que la gaseosa. Obtenido de <https://voragine.co/historias/reportaje/agua-mas-cara-que-la-gaseosa-la-guajira-padece-con-la-comida-chatarra/>
- Smith, J., Van Ness, H., & Abbott, M. (1996). Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. McGraw-Hill.
- Sodexo (septiembre de 2023). Consejos para optimizar los costos de transporte de carga. Obtenido de <https://blog.sodexo.co/consejos-optimizar-costos-transporte-carga#:~:text=Seg%C3%BAun%20estudio%20realizado%20por,pesada%3A%20%242500%20por%20tonelada%2Dkil%C3%B3metro>
- SOURCE (s.f). *Changing the State of Water*. Obtenido de <https://source.co/pages/how-it-works>
- Superservicios (2022). Superservicios divulga diagnóstico sobre la situación del acceso al agua potable en La Guajira. Obtenido de <https://www.superservicios.gov.co/>

Thermopedia (2023). *Atmospheric water generation: concepts and challenges*.

Obtenido de <https://www.thermopedia.com>

Tegou, L.-I., Polatidis, H., y Haralambopoulos, D. A. (2010). Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study. *Journal of Environmental Management*, 91(11), 2134–2147. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.05.010>

UAM Cuajimalpa (20 de septiembre de 2021). Ciudades del mundo que sufrirán escasez de agua en 2050. Obtenido de <https://www.cua.uam.mx/news/miscelanea/ciudades-del-mundo-que-sufriran-escasez-de-agua-en-2050>

Ulloa A., Quiroga C., Gaitán L. (2020). Territorios sin agua en el sur de la Guajira. Obtenido de <https://www.researchgate.net>

UNICEF (2024). Agua, saneamiento e higiene para más de 18.000 personas en La Guajira. Obtenido de <https://www.unicef.org>

Valora Analatik (22 de enero de 2022). Colombia inauguró primer parque eólico en más de 17 años. Obtenido de <https://www.valoraanalitik.com/colombia-inauguro-primer-parque-eolico-en-mas-de-17-anos/>

Velásquez Violeta. (2024). Transición Energética en Colombia: nuevas Licencias Ambientales para Proyectos de Energías Renovables. Obtenido de <https://serranomartinezcma.com/transicion-energetica-en-colombia-nuevas-licencias-ambientales-para-proyectos-de-energias-renovables/>

WEDEW (s.f). *Wood-to-Energy Deployable Emergency Water*. Obtenido de <https://www.skysource.org/wedew>

Wind-Turbine-Models (s.f.). Vestas V136-3.45. Obtenido de <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/1282-vestas-v136-3.45>

XM Administradores del mercado eléctrico. (2024). Condiciones climáticas.

Obtenido de <https://informeannual.xm.com.co/informe/pages/xm/22-condiciones-climaticas.html>

XM Administradores del mercado eléctrico. (2024). Precio de bolsa y escasez.

Obtenido de <https://www.xm.com.co/transacciones/cargo-por-confiabilidad/precio-de-bolsa-y-escasez>

XM. (2024). XM. Obtenido de

<https://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>