

**Estudio de factibilidad para implementar proyectos de generación eólica en Bolívar,  
San Andrés y Norte de Santander utilizando el software RETScreen Expert**

Geraldin Tatiana Cristancho Pérez

Jenny Marcela Leguizamón Cupitra

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería Ambiental

Fusagasugá, Colombia

2022

**Estudio de factibilidad para implementar proyectos de generación eólica en Bolívar,  
San Andrés y Norte de Santander utilizando el software RETScreen Expert**

Proyecto de Investigación como requisito parcial para optar por el título de:

Ingeniera Ambiental

Geraldin Tatiana Cristancho Pérez

Jenny Marcela Leguizamón Cupitra

Director (a):

MSc Luis Alejandro Duarte Rodríguez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería Ambiental

Fusagasugá, Colombia

2022

### **Dedicatoria**

Mi trabajo de grado está dedicado, principalmente a Dios y a mamita María por haberme dado salud, paciencia y sabiduría para lograr este objetivo. A mis padres Guillermo y Alexandra quienes con su amor, apoyo y entrega han sido la razón y la más grande motivación para cumplir este sueño, gracias por sus valores y consejos, son un gran ejemplo para mí; me siento orgullosa y privilegiada de ser su hija. A mis hermanas Andrea, Leydi y Gabi por su cariño y apoyo incondicional y en general a todos aquellos que de alguna u otra manera contribuyeron en este proceso. Este proyecto es un recordatorio para Jenny y para mí que se puede lograr cada meta que nos propongamos, sin importar cuán difícil pueda resultar y que Dios siempre estará para guiarnos.

#### ***Geraldin Cristancho***

Dedico este proyecto de grado a mi amado Dios quien ha sido el mejor padre, quien provee los recursos, quién ha orquestado mis sueños y de su mano me ha permitido cumplirlos. A mi preciosa hija Sara Valentina, compañera de vida, gracias por animar mis noches de tareas con tus mágicas cartas, gracias por creer en mí más de lo que yo misma he pensado, eres increíble. Dedico esta fase final de mi proceso para convertirme en profesional a todas las mujeres jóvenes, mamás solteras, cabezas de familia, pues hace 6 años no había ninguna esperanza para iniciar este proceso, pero el dador de sueños lo hace posible ¡créanlo! Soy una prueba real de ello.

#### ***Jenny Leguizamón***

## **Agradecimientos**

Expresamos nuestros agradecimientos a:

Dios por la oportunidad de vivir, por permitirnos disfrutar de esta gran experiencia, de compartir, conocer personas maravillosas y adquirir nuevos conocimientos que dignifican nuestra vida.

A la universidad por abrirnos sus puertas y permitirnos llevar a cabo este proceso de desarrollo profesional y alcanzar un peldaño más en el camino del aprendizaje.

A nuestro director de tesis MSc Luis Alejandro Duarte, por compartir su conocimiento con nosotras, apoyarnos con su constante orientación y valiosa colaboración durante la realización de este proyecto, Dios bendiga cada uno de sus sueños.

A nuestras familias por su paciencia y motivación para continuar adelante en cada una de las metas fijadas.

A Jenny por ser la mejor compañera de proyecto de grado. (Geraldin)

A Geral por ser un regalo del cielo (Jenny)

## Resumen

En razón a los determinantes cambios que ha generado el calentamiento global en los últimos años, la implementación de tecnologías limpias ha tomado fuerza; en este grupo encontramos la energía eólica que ha desarrollado avances tecnológicos importantes ayudando a disminuir el uso de combustibles fósiles y por ende a reducir los niveles de CO<sub>2</sub>.

Colombia se encuentra en el proceso de transición energética y viene gestionando proyectos de aerogeneración eléctrica, actualmente se encuentran dos en funcionamiento, Jepírachi y Guajira I. Por lo anterior, se realizó el análisis de factibilidad para implementar parques eólicos realizando un análisis técnico – económico, a partir de variables meteorológicas, aspectos técnicos, ambientales y financieros en zonas específicas en los departamentos de Bolívar, San Andrés y Norte de Santander, a través del software RETScreen Expert proponiendo la instalación de un parque eólico en cada sector con una capacidad instalada de 7,8 MW con 6 aerogeneradores Nordex N60/1300 pues se tuvo en cuenta su potencia nominal, la trayectoria de la marca fabricante y el costo de kWh de energía producida, sobre el cual se realizó una evaluación económica y ambiental a fin de determinar la factibilidad del proyecto. Así mismo, se determinó que el espacio requerido para su implementación debe contar con un área de 4,5 ha y las familias que se beneficiarían de este proyecto eólico en cada departamento serían aproximadamente 15.400 sobre un factor de capacidad de 33%; este proyecto de investigación permitió determinar que, en el sector de San Luis, departamento de San Andrés es viable implementar proyectos eólicos pues las condiciones meteorológicas y las variables financieras son óptimas para el desarrollo del proyecto, caso distinto al de las otras dos regiones estudiadas.

**Palabras Clave:** Proyectos Eólicos, RETScreen Expert, factibilidad, economía, medio ambiente, CO<sub>2</sub>, tecnologías limpias

## Abstract

Due to the significant changes generated by global warming in recent years, the implementation of clean technologies has gained strength; in this group we find wind energy, which has developed important technological advances helping to control the use of fossil fuels and therefore reduce CO<sub>2</sub> levels.

Colombia is in the process of energy transition and has been managing electric aerogeneration projects; currently there are two in operation, Jepírachi and Guajira I. Therefore, a feasibility analysis was carried out to implement wind farms by performing a technical-economic analysis, based on meteorological variables, technical, environmental and financial aspects in specific areas in the departments of Bolívar, San Andrés and Norte de Santander, through the RETScreen Expert software, proposing the installation of a wind farm in each sector with an installed capacity of 7.8 MW with 6 Nordex N60/1300 wind turbines, taking into account their nominal power, the trajectory of the manufacturer and the cost per kWh of energy produced, on which an economic and environmental evaluation was carried out in order to determine the feasibility of the project. Likewise, it was determined that the space required for its implementation must have an area of 4.5 ha and the families that would benefit from this wind project in each department would be approximately 15,400 over a capacity factor of 33%; this research project allowed determining that in the sector of San Luis, department of San Andrés it is feasible to implement wind projects since the meteorological conditions and the financial variables are optimal for the development of the project, a different case from the other two regions studied.

**Keywords:** Wind projects, RETScreen Expert, feasibility, economics, environment, CO<sub>2</sub>, clean technologies.

## Tabla de Contenido

Lista de Tablas	9
Lista de Figuras	10
Lista de Abreviaturas	12
Introducción	14
Justificación	17
Planteamiento del Problema	19
Objetivos	21
<b>Desarrollo de las Energías Renovables</b>	<b>22</b>
Energías Renovables	22
<i>Contexto Mundial</i>	24
<i>Contexto Colombia</i>	29
Evolución de la Energía Eólica	32
<i>Contexto Mundial</i>	32
<i>Contexto Colombia</i>	34
Antecedentes Energía Eólica en Bolívar, San Andrés y Norte de Santander	37
Marco legal	41
<b>Energía Eólica</b>	<b>47</b>
Aspectos técnicos	47
Potencia del Viento	48
La Distribución de Weibull	49
Velocidad del Viento	50
Partes del aerogenerador	51
Aspectos ambientales	52
Ventajas y Desventajas	54
<b>Desarrollo estudio de caso: Metodología del proyecto</b>	<b>56</b>
Introducción a RETScreen Expert	56
Punto de Referencia	57
<i>Ubicación</i>	57
<i>Instalación</i>	58
Factibilidad	59
<i>Energía</i>	59
<i>Costos</i>	61
<i>Emisiones</i>	62
<i>Finanzas</i>	64

Información básica	65
Datos Financieros	66
Viabilidad del proyecto	68
Análisis de Sensibilidad y Riesgo	70
<i>Análisis de Sensibilidad</i>	71
<i>Análisis de Riesgo</i>	72
Rendimiento	72
<b>Resultados y discusión – Estudio de caso</b>	<b>73</b>
Prefactibilidad	73
Ubicación – Punto de Referencia	73
Análisis de Instalación y Factibilidad	76
Instalación	79
<i>Especificaciones del aerogenerador seleccionado</i>	79
<i>Esquemización del modelo eólico propuesto</i>	79
<i>Factibilidad</i>	81
Evaluación Financiera	83
Variables	86
Viabilidad Financiera	87
Componente Ambiental	91
Análisis de Sensibilidad y Riesgo	93
Comparativas	94
<i>Temperatura del aire vs. velocidad del viento</i>	94
<i>Costo de venta de electricidad por departamento</i>	95
<i>Costos O &amp; M anuales</i>	96
Factibilidad ambiental vs. viabilidad financiera	97
Análisis San Andrés vs. Guajira I	98
Conclusiones	101
Recomendaciones	102
Bibliografía	103



## Lista de Tablas

**Tabla 1.** Composición de las FNCE en el SIN a 2010 en Colombia.

**Tabla 2.** Especificaciones del aerogenerador seleccionado

**Tabla 3.** Costos de Operación y Mantenimiento para proyecto eólico propuesto en cada región

**Tabla 4.** Resumen financiero para potencial proyecto eólico en San Andrés, Bolívar y Norte de Santander

**Tabla 5.** Viabilidad Financiera del potencial proyecto eólico en San Luis – San Andrés

**Tabla 6.** Viabilidad Financiera del potencial proyecto eólico en Bolívar y Norte de Santander

## Lista de Figuras

- Figura 1.** Evolución de la inversión en fuentes renovables por región 2004 – 2013
- Figura 2.** Consumo de energía mundial para el año 2016
- Figura 3.** Consumo de energías renovables para el año 2016
- Figura 4.** Capacidad de Energía Renovable por tecnología de 2011 a 2021
- Figura 5.** Cuota de Energía Renovable Moderna 2009, 2019 y 2020
- Figura 6.** Participación de ER en el consumo total mundial, 2019
- Figura 7.** Generación de Energía Renovable 1990 – 2021
- Figura 8.** Total Energías Renovables en la capacidad instalada 2012 – 2021
- Figura 9.** Evolución aerogeneradores.
- Figura 10.** Incremento de potencia eólica mundial 2016 - 2020
- Figura 11.** Mapa eólico de Colombia con velocidad media del viento en superficie
- Figura 12.** Mapa eólico mapa eólico del Caribe.
- Figura 13.** Localización de lugares con mayor potencial de energía eólica en Colombia
- Figura 14.** Frecuencia de la velocidad del viento en Qorveh 1998-2007
- Figura 15.** Partes turbina eólica.
- Figura 16.** Impacto a la fauna por turbinas eólicas
- Figura 17.** *Desmontes para instalar plataformas de aerogeneradores y de torres de la línea eléctrica. Foto: Amigos de la Tierra.*
- Figura 18.** Software inicial RETScreen Expert.
- Figura 19.** Ejercicio Representación de la variación mensual Velocidad del Viento vs. Temperatura

**Figura 20.** Ejercicio RETScreen equivalencia GEI – San Andrés

**Figura 21.** Ejercicio RETScreen flujos de caja Anual

**Figura 22.** Ejercicio RETScreen Análisis de Sensibilidad

**Figura 23.** Mapa Velocidad del Viento Bolívar, agosto 2022

**Figura 24.** Mapa Velocidad del Viento San Andrés, agosto 2022

**Figura 25.** Mapa Velocidad del Viento Norte de Santander, agosto 2022

**Figura 26.** Representación de la variación mensual Velocidad del Viento vs. Temperatura en la región de San Luis – San Andrés

**Figura 27.** Esquematización del sistema eólico propuesto

**Figura 28.** Área de montaje potencial parque eólico en Galerazamba – Bolívar

**Figura 29.** Área de montaje potencial parque eólico en San Luis – San Andrés

**Figura 30.** Área de montaje potencial parque eólico en Ocaña – Norte de Santander

**Figura 31.** Flujo efectivo acumulado proyecto eólico Galerazamba – Bolívar

**Figura 32.** Equivalencia reducción de emisiones contaminantes San Andrés

**Figura 33.** Parámetro de riesgo proyecto eólico San Luis – San Andrés

**Figura 34.** Comparativo Velocidad del Viento Bolívar, San Andrés y Norte de Santander

**Figura 35.** Comparativo costo de venta electricidad en Norte de Santander, Bolívar y San Andrés

**Figura 36.** Comparativo costos O&M por año para proyecto eólico en San Andrés, Bolívar y Norte de Santander

## **Lista de Abreviaturas**

**ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible

**PNUD:** Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

**FENOGE:** Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía

**DNP:** Departamento Nacional de Planeación - Colombia

**PCH's:** Pequeñas Centrales Hidroeléctricas

**FNCE:** Fuentes no convencionales de Energía

**IRENA:** International Renewable Energy Agency

**ER:** Energías Renovables

**MDL:** Mecanismo de Desarrollo Limpio

**CONPES:** Consejo Nacional de Política Económica y Social

**PEN:** Plan Energético Nacional

**CREG:** Comisión de Regulación de Energía y Gas

**CER's:** Certificados de Reducción de Emisiones

**IEA:** International Energy Agency

**INEA:** Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas

**WWF:** Fondo Mundial para la Naturaleza

**SIN:** Sistema Interconectado Nacional

**ZNI:** Zonas No Interconectadas

**PROURE:** Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía

**MME:** Ministerio de Minas y Energía

**UPME:** Unidad de Planeación Minero Energética

**CAPEX:** Gastos de Capital

**OPEX:** Gastos Operativos

**SINA:** Sistema Nacional Ambiental

**GEI:** Gases de Efecto Invernadero

**FMAM:** Fondo para el Medio Ambiente Mundial

**GWEC:** Global Wind Energy Council

**PROMIX:** Producción Mixta

**PROEL:** Producción Eléctrica

**LCOE:** Coste Nivelado de la Electricidad

**IPC:** Índice de Precios al Consumidor

**TIR:** Tasa Interna de Retorno

**VAN:** Valor Actual Neto

**EIA:** Estudio del Impacto Ambiental

**MIRR:** Tasa Interna de Rendimiento Modificada

**IEC:** Comisión Electrotécnica Internacional

**ANLA:** Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

## Introducción

Según la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU el Desarrollo Sostenible se define como «la satisfacción de las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades»; basadas en este concepto, elegimos desarrollar nuestro proyecto de investigación analizando alternativas factibles que permitan contribuir al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) No. 7 que propone garantizar el acceso a una energía asequible y no contaminante; a nivel global “entre 2000 y 2016, la cantidad de personas con acceso a energía eléctrica aumentó de 78 a 87 por ciento, y el número de personas sin energía bajó a poco menos de mil millones (RECON, 2020)”.

En el contexto colombiano entre 2014 y 2017, 110.289 nuevos usuarios se han beneficiado del servicio de energía eléctrica; sin embargo, en 2009 el porcentaje de la población del país que tuvo acceso a energía eléctrica fue de 94,9%. La meta del Gobierno es lograr una cobertura del 100% y la entidad encargada de liderar este proceso es el Ministerio de Minas y Energía (MME)” (Planeación, 2018). En la medida que se da el incremento de la población, así mismo lo hará la demanda energética; por lo tanto, es determinante promover estrategias para la economía mundial que actualmente depende de los combustibles fósiles, pues los impactos generados sobre el medio ambiente son irreversibles. Para lograr el cumplimiento del ODS 7 al año 2030 según las metas definidas por el gobierno de Colombia, es necesario realizar inversiones en proyectos de energías renovables como la solar, eólica y térmica, buscando expandir la infraestructura y mejorar la tecnología para promover la eficiencia energética en el país.

En un concepto histórico, vemos que el desarrollo de la humanidad ha estado enmarcado por descubrir y utilizar la energía, como primer momento el manejo del fuego y luego los inventos como la rueda dieron paso a mejorar los procesos agrícolas y ganaderos

para transformar la energía en alimentos. “Así bien, aproximadamente para el siglo (XX a.C.), se emplearon las velas para captar la energía del viento para posteriormente surgir la rueda hidráulica y los molinos de viento, que constituyeron en el continente europeo la principal fuente de energía durante la Edad Media.” (Oviedo-Salazar et al., 2015)

La Revolución Industrial fue determinante para una transformación de civilización mecanizada; sin embargo, en contexto energético el punto de partida se dio en 1859 con la primera perforación de un pozo petrolero en Estados Unidos que permitió el desarrollo de diferentes inventos sostenidos bajo esta fuente de energía como el generador eléctrico, el motor de combustión interna, la luz eléctrica y el automóvil. Desde la Segunda Guerra Mundial se ha mantenido el uso de combustibles fósiles desde la construcción de la primera central eléctrica con la producción de carbón, gas natural, pero con una dimensión mayor la producción de petróleo que se mantiene en alza hasta la actualidad debido al crecimiento poblacional, pues también aumenta la necesidad de energía.

Desde un contexto ambiental, la crisis energética se da por la demanda de estas fuentes no renovables para la generación de energía, que impactan a la atmósfera con emisión de gases contaminantes como el dióxido de carbono, el óxido de nitrógeno y el monóxido de carbono, y por supuesto ha tenido un resultado que estamos viviendo llamado “cambio climático”. En la capa de ozono, se da con el la ruptura de la misma permitiendo el ingreso a la radiación ultravioleta; en el efecto invernadero, provoca el aumento de la temperatura terrestre ocasionando sequías y pérdidas de fertilidad en el suelo; y por la combinación de humedad en el aire y los gases contaminantes presentes en los procesos de combustión se ha generado la lluvia ácida.

Por lo anterior, ha tomado fuerza en las últimas dos décadas la urgencia de buscar nuevas fuentes para dar abasto a las necesidades energéticas y mitigar los impactos

ambientales; de allí que las energías renovables se imponen como la alternativa más factible teniendo en cuenta su disponibilidad actual y futura, pero también por la reducción significativa en el impacto ambiental. Las energías renovables tienen la condición especial de ser potencialmente inagotables ya que funcionan directa o indirectamente con la energía del viento, los cuerpos de agua, la vegetación, el sol o el calor interior de la tierra; entre las principales formas de energía renovable encontramos la solar térmica y fotovoltaica, eólica, hidráulica, biomasa, entre otras.

En esta investigación, estudiaremos la energía eólica que conocemos como la energía obtenida del viento. Es uno de los recursos energéticos más antiguos explotados por el ser humano y es al día de hoy la energía más madura y eficiente de todas las energías renovables. El término “eólico” proviene del latín “aeolicus”, perteneciente o relativo a Eolo, Dios de los vientos en la mitología griega. (Acciona, 2020). La transformación del viento en energía se realiza por medio de aerogeneradores en movimiento; encontramos algunos beneficios como la cooperación con el desarrollo sostenible y la disponibilidad de implementar proyectos eólicos en todo el planeta, lo que reduce drásticamente las importaciones energéticas y a su vez permite un desarrollo local promoviendo oportunidades de empleo y calidad de vida. Nuestro proyecto de investigación pretende evaluar la factibilidad de implementar proyectos eólicos en 3 zonas de Colombia utilizando la herramienta RETScreen Expert, el último modelo del software ha añadido la capacidad de analizar rápidamente la viabilidad de múltiples opciones de plantas de energía eólica en condiciones reales. Esta rápida función del modelo permite evaluar el potencial real del parque eólico propuesto en MW eligiendo un conjunto de tipos de turbinas y modelos diferentes combinados. Se aplican escenarios con el objetivo de ampliar la capacidad en el futuro a partir de la simulación ejecutada en RETScreen Expert, la optimización técnica y económica del sistema energético propuesto. (Loren et al., 2021)



## Justificación

El creciente desarrollo mundial de las energías renovables ha traído consigo la oportunidad de contrarrestar los efectos del cambio climático ocasionados por las actividades antropogénicas y el incremento de la demanda energética del último siglo; por ello, la implementación de energías limpias como la energía eólica presentan una interesante, natural y viable opción para contribuir a la mitigación de los impactos en gran parte por la emisión de gases de efecto invernadero, que se producen por el uso de fuentes de energía tradicionales que utilizan combustibles fósiles como el carbón y derivados del petróleo.

Así mismo, la energía eólica es una fuente inagotable y continua pues la obtenemos de procesos atmosféricos naturales. Los equipos necesarios para la generación de energía a través del viento son conocidos como aerogeneradores, los cuales producen electricidad a precios competitivos frente a otras fuentes energéticas, como las centrales térmicas, que han producido su rápida implantación, haciéndolo a través de las energías renovables configurando sistemas futuros de suministro y uso final de la energía, que incrementará previsiblemente su porcentaje mundial de la energía renovable antes que los sectores de combustibles para usos de calefacción o transporte. (IPCC, 2011)

Las turbinas eólicas tienen un diseño que refleja principios aerodinámicos que se han desarrollado en aviación para lograr rectores eólicos y perfiles elevados de rendimiento. De igual forma, se clasifican según el nivel de fuerza aerodinámico ocasionado por el movimiento del rotor y por la ubicación de su eje de rotación (Barliza et al., 2019). Entonces, los aerogeneradores pueden producir energía a gran escala bajo su instalación en filas y se conocen como parques eólicos. Los costos de la energía eléctrica producida con esta modalidad logran ser competitivo respecto a otras formas de generación energética, aunque la inversión es alta, si hay una buena planificación del proyecto podría ser retribuida en un corto o mediano plazo y adicionalmente grandes ahorros.

Colombia cuenta con un gran potencial para implementación de energías renovables, pues cuenta con una ubicación privilegiada dentro del planeta, lo que contribuiría a una transformación social, ambiental y económica para toda la población mejorando la calidad de vida, y que paralelamente es posible alcanzar las metas propuestas como país al participar junto a 193 miembros de las Naciones Unidas en firmar la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible con 17 objetivos a favor de las personas, el planeta y la prosperidad; específicamente apuntando al objetivo 7 que busca garantizar el acceso a la energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Para ello, es necesario duplicar la tasa nacional de eficiencia energética y aumentar paulatinamente la implementación de las diferentes energías renovables. Así mismo, en el transcurso de la última década Colombia se ha vuelto foco de diferentes organizaciones a nivel mundial para implementación de proyectos eólicos, ya que “sólo en la región de la Guajira se cuenta con un potencial de 18 GW, el cual sería suficiente para suplir más de dos veces la demanda nacional de energía (Bank, 2013)”. Cabe resaltar, que el gobierno saliente del 2022 logró avances significativos en la ruta de transición energética para el País, implementando diferentes proyectos en energías renovables y con resoluciones publicadas listas para ser llevadas a cabo, como el caso de los proyectos de generación eólica costa afuera (“offshore”), iniciando con el proyecto Vientos Alisios, que en 2021 recibió la aprobación de prefactibilidad por parte de la Dirección General Marítima en conjunto con el Ministerio de Minas y Energía, y dispone de una oferta de conexión de 200 MW recibida por la Unidad de Planeación Minero - Energética (UPME) (BlueFloat, 2022)

Teniendo en cuenta lo anterior, este proyecto de investigación generará un análisis de factibilidad, por medio del software RETScreen Expert, donde además se definirá la viabilidad de nuevos proyectos eólicos en diferentes regiones de Colombia e identificaremos los niveles de reducción de CO<sub>2</sub> que se podrían alcanzar tras su implementación.

## Planteamiento del Problema

Para el año 2040 se espera que la demanda de energía se incremente en un 60% según reporte de la International Energy Agency (IEA) 2014; igualmente, se calcula como resultado del impacto por las emisiones de gases de efecto invernadero que se alcance al final del siglo un aumento en el calentamiento global entre 1,4 y 5,8 grados centígrados, lo que conlleva a graves consecuencias para la economías y los ecosistemas del mundo, esto si no se toman medidas urgentes y determinantes para mitigar esta problemática (Bank, 2013).

Actualmente el mundo está más consciente de la necesidad de implementar energías renovables por su eficiente resultado para equilibrar el cambio climático, promover el sector económico y garantizar el servicio energético a la población. En Latinoamérica solo un 19,3% de la producción de energía corresponde a energías renovables, del cual se destaca la biomasa tradicional con un 9,1% y las hidroeléctricas con un 3,6%, el porcentaje restante se distribuye entre las energías geotérmica, eólica y solar. Los motivos por los que son relativamente viables los mercados eólicos a nivel mundial es por las ventajas económicas y su competitividad que va en aumento frente a otras fuentes de energía, así mismo el reemplazar las tecnologías actuales por las que estén libres de emisiones buscando mitigar la contaminación del aire y a su vez el cambio climático.

Según estadísticas presentadas por la UPME, Colombia ha sido catalogada como el cuarto país con mayor capacidad hidráulica en el mundo. Se estima un potencial de 25.000 MW instalables para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's), de los cuales se han construido 197 pequeñas centrales con una capacidad instalada que ronda los 220 MW (RevistaEspacios, 2018); es decir que de un 100% de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) un 75,9% corresponde a las hidroeléctricas. Sin embargo, los grandes proyectos con este tipo de energías pueden encontrarse con la oposición social a causa de su impacto en la disponibilidad de agua, los ecosistemas, medioambiente, además de la necesidad de reubicar

a las poblaciones afectadas (Robles & Rodríguez, 2018). Adicionalmente en tiempos de verano cuando hay disminución de las reservas hídricas, las termoeléctricas son quienes entran a dar el respaldo de producción de energía para el país. No obstante, este manejo que parece ser la solución, realmente contribuye a la problemática al promover el uso de combustibles fósiles y la generación de emisiones perjudiciales para la salud humana y el ambiente.

La participación de la energía eólica en Colombia corresponde únicamente a un 0,11% con una capacidad instalada de 18,4 MW (EnergíasRenovables, 2020), siendo Guajira la región con el potencial eólico más importante del país, seguido de la Costa Atlántica y la zona costera de Urabá; por ello, entendiendo el contexto y recordando que la energía eólica es considerada como la tecnología más limpia y con menos impactos en los contextos ambiental, social y económico debería propender a su crecimiento, razón por la que este proyecto de investigación busca determinar si ¿Es factible la implementación de proyectos eólicos en zonas de Colombia como Bolívar, San Andrés y Norte de Santander?

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Analizar la factibilidad técnico – económica y ambiental de implementar proyectos de generación eólica en las regiones de Bolívar, San Andrés y Norte de Santander mediante el uso del software RETScreen Expert.

### **Objetivos específicos**

1. Determinar los aspectos técnicos y de rendimiento óptimo en la implementación de proyectos eólicos en las regiones de Bolívar, San Andrés y Norte de Santander.
2. Analizar la factibilidad financiera de la implementación de proyectos eólicos en algunas regiones de Colombia.
3. Identificar los niveles de reducción de CO<sub>2</sub> que se podrían alcanzar tras la implementación de los proyectos eólicos en regiones de Colombia.

## Desarrollo de las Energías Renovables

### Energías Renovables

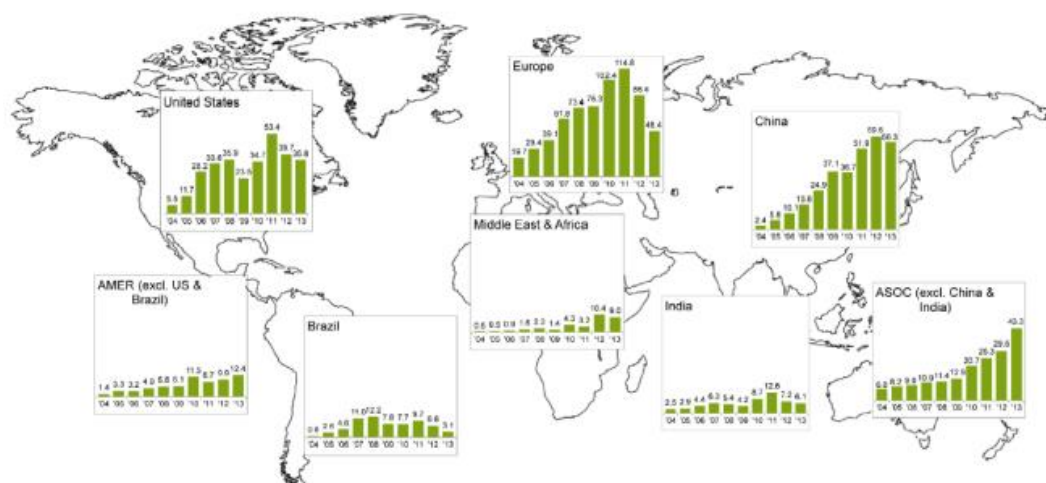
Ha sido notoria la atención que han tomado conceptos alineados al cuidado del medio ambiente, debido a los irreversibles impactos generados por problemáticas tales como el cambio climático, contaminación, deforestación, degradación del suelo, entre otras. Por ello, cada país se encuentra desarrollando estrategias para mejorar las condiciones de adaptación al clima, reducir los impactos y transitar hacia nuevos mercados energéticos en conjunto con las tecnologías de información, comunicación, los sistemas de control y monitoreo; como resultado vemos la consolidación del concepto de *transición energética* que se define como “un conjunto significativo de cambios en los patrones de uso de la energía en una sociedad, afectando los recursos, los portadores, los equipos y los servicios energéticos”. Esta transición está caracterizada por un cambio hacia energías renovables como principal medio de producción energética, reduciendo progresivamente la producción con combustibles fósiles y carbón. Varios países como Alemania siguen con el propósito de desmontar el parque nuclear. (UPME, 2015)

Si bien, las energías renovables han tenido una acogida importante desde que los gobiernos implementaron beneficios que definitivamente redujo costos de producción de la energía, como la eólica y solar que se destacan por sus decrecientes costos de fabricación con tecnologías mejoradas, eficientes y mecanismos de comercialización apropiados. Sin embargo, la caída estable de costos para el crudo y gas, además de los avances en la extracción de fósiles hacia yacimientos no convencionales compite con los esfuerzos de las demás fuentes, que también presionan la legislación para evitar perder su mercado. El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), establece en su documento “The Energy Report” la siguiente visión: “Para el 2050 podremos obtener toda la energía que necesitamos a partir de fuentes renovables. Esa transición no sólo es factible, sino costo-efectiva, entregando energía

asequible para todos, y produciéndola en forma sostenible para el planeta y nuestra economía global.” (UPME, 2015)

### Figura 1

*Evolución de la inversión en fuentes renovables por región 2004 – 2013*



*Fuente.* (UPME, 2015)

Según la figura 1 que expone el desarrollo de energías renovables por continentes, observamos que en América Latina los niveles de implementación son muy bajos; en efecto, está mayormente concentrada la inversión en el hemisferio norte, por ello se requiere incrementar las inversiones en instalación de fuentes renovables según las políticas de cada país. “La IEA, en su última proyección, estima que al 2040, la producción energética estará distribuida en cuatro cuartas partes: petróleo, gas, carbón y renovables. Su factibilidad está anclada en el parque energético actual, que no es fácil de cambiar. Renovar infraestructura es un proceso sumamente costoso”. (UPME, 2015)

Conocemos las energías renovables por producirse de forma continua y parcialmente inagotables; estas se renuevan constantemente de forma natural a diferencia de los combustibles fósiles, los cuáles podrían existir en cantidades específicas o reservas agotables.

Las energías renovables más conocidas son energía solar térmica y fotovoltaica, energía eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica y mareomotriz. (Canarias, 2008)

### *Contexto Mundial*

Nos remontamos en la historia ante el uso y dominio del fuego como un hallazgo determinante para el inicio de la utilización de energía, que desarrolló también la producción agrícola y ganadera. Luego, sobre el siglo XX a.C. se captaba la energía del viento empleando velas para dar paso a la llegada de la rueda hidráulica y un tiempo después surgieron los molinos de viento que se establecieron durante la Edad Media como la principal fuente de energía, además de mantenerse anclada al proceso de agricultura domesticada pues era posible bombear agua del subsuelo y moler diferentes tipos de granos. Para el siglo XVIII se realizaron los primeros experimentos con vapor, pero no fue hasta la creación de la máquina de vapor por James Watt que se establecieron los cimientos de la civilización mecanizada. A partir de allí, se desarrollaron las industrias domésticas lo que en consecuencia disminuyó la productividad del campo; paralelo a ello se presenta el carbón considerada como fuente de energía de costo bajo y acceso ilimitado, que aunque desde su producción para generar energía fue evidente el impacto en la contaminación del aire y posibles afectaciones en la salud, ya había tomado demasiada ventaja por su demanda e innovación al ser el punto de partida de la conocida “Revolución Industrial”. En la transición del siglo XIX al siglo XX se vieron importantes acontecimientos como la perforación del primer pozo petrolero en Estados Unidos y la conformación de la primera central termoeléctrica, que dan paso a diferentes inventos para la generación de energía con combustibles fósiles; durante la Primera Guerra Mundial ya ha tomado fuerza el petróleo como fuente principal de energía que ocasiona el decaimiento de la producción de carbón.

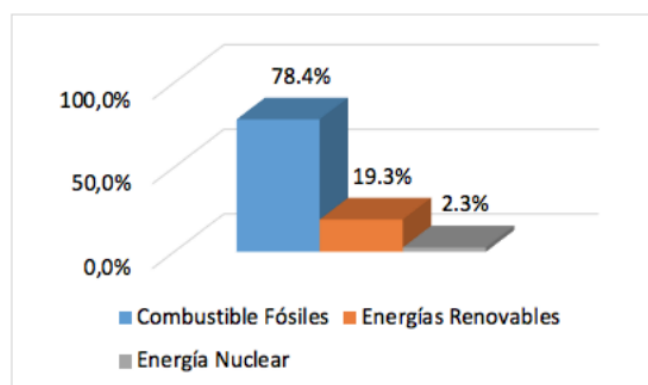
Para el año 1942 se descubrió la energía nuclear como fuente de energía y se pensaba como determinante para abastecer la demandante necesidad energética de la población; sin



embargo, no muchos años después se encontró que la producción mundial de energía no justificaba las miles toneladas de petróleo que se consumían, situación que desencadenó la Crisis Energética. “Posterior a ello, se dilucidó visiblemente el crecimiento de la población y sus necesidades energéticas, que hacen imprescindible una política de ahorro de energía y la búsqueda de nuevas fuentes. Fue en esa década que se consideró a las energías renovables como una alternativa a las energías tradicionales, tanto por su disponibilidad presente y futura que viene a ser una garantía, así como también por su menor impacto ambiental” (Oviedo-Salazar et al., 2015). Desde el año 2015 se ha incrementado el uso de Energías Renovables en un 2,3% mejorando la eficiencia energética, lo que de alguna manera intenta conservar estables las emisiones globales de carbono al mismo tiempo que la economía sigue su crecimiento. Según la International Renewable Energy Agency (IRENA), en el año 2016 las Energías Renovables (ER) proporcionaron un estimado de 19,3% del consumo mundial de energía. Se destaca la producción de energía a partir de la biomasa para calefacción y cocina en las áreas rurales en los países en vía de desarrollo con una representación alrededor del 9,1%, una participación del 10,2% para las ER modernas como la energía solar fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica, solar térmica y biocombustibles (REN21, 2017)

## Figura 2

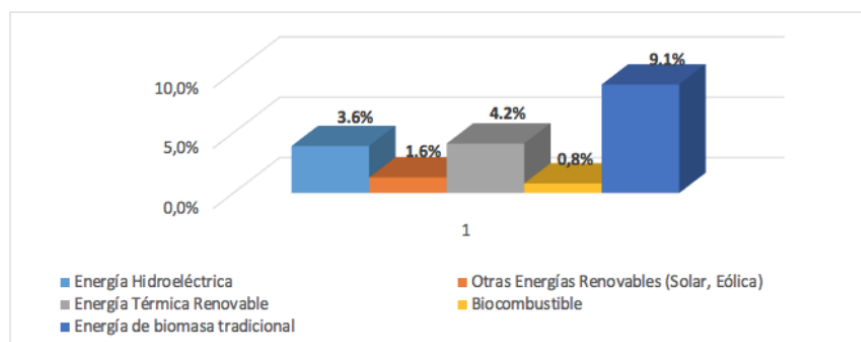
*Consumo de energía mundial en el año 2016*



*Fuente.* (REN21, 2017)

### Figura 3

*Consumo de energías renovables para el año 2016*



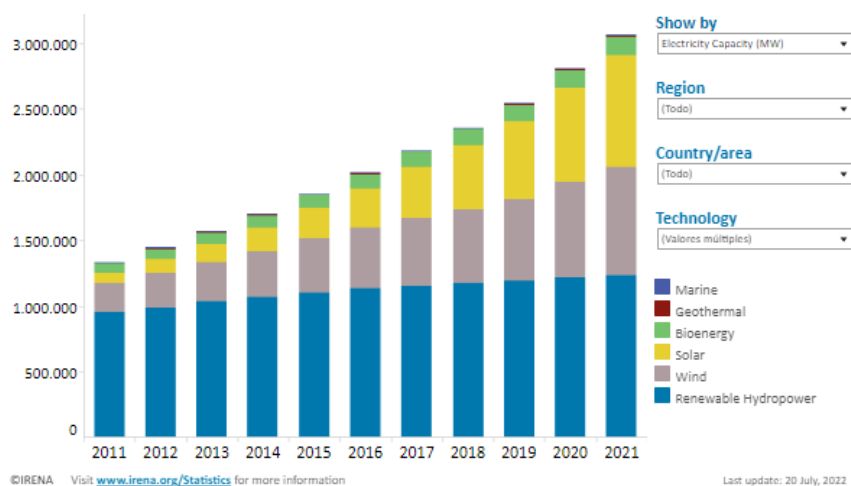
*Fuente.* (REN21, 2017)

La relación costo – competitividad ha impulsado el crecimiento de las Energías Renovables, por ello, muchos países intentan establecerlas frente a las fuentes de energía convencionales pues el reconocimiento de rentabilidad va en aumento y para zonas de difícil acceso, por ejemplo, representan un estatus progresivo para el servicio básico de energía y para su contexto productivo. A finales de 2021, la capacidad mundial de generación renovable ascendía a 3.068 GW. La capacidad de generación renovable aumentó en 260 GW (+9,2%) en 2021 (IRENA, 2022b). Este fue el mayor aumento de la historia.

Las instalaciones de capacidad y la inversión continuaron extendiéndose a todos los rincones del mundo. Los sistemas distribuidos de energía renovable proporcionaron a más hogares de países en desarrollo y emergente acceso a la electricidad. (REN21, 2019). Actualmente la capacidad instalada de ER supera las instalaciones netas de combustibles fósiles y capacidad de energía nuclear combinadas. A nivel mundial, 40 países tenían al menos 10 GW de capacidad de energía renovable en operación a fines de 2021, frente a solo 24 países una década antes. En la mayoría de los países, producir electricidad a partir de energía eólica y solar fotovoltaica es ahora más rentable que generarla a partir de nuevas centrales eléctricas de carbón.

## Figura 4

### Capacidad de Energía Renovable por tecnología de 2011 a 2021



Fuente. (IRENA, 2022b)

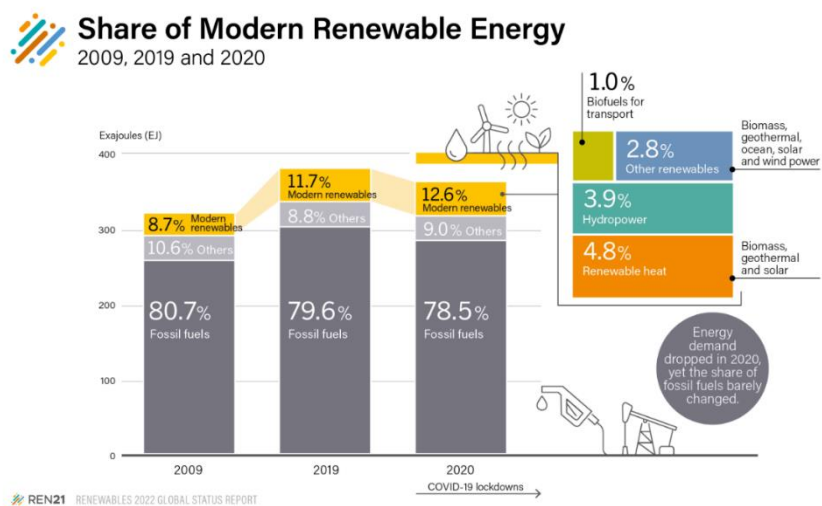
Estas disminuciones de costos han llevado a ofertas récord en los procesos de licitación, que se hicieron aún más comunes durante el año. Sin embargo, las subastas competitivas han llevado a la consolidación en algunas industrias y han favorecido a las empresas multinacionales de energía más grandes en lugar de a los actores más pequeños, incluidos los grupos liderados por la comunidad. (REN21, 2019)

A pesar de este crecimiento récord de las energías renovables, el Informe de Estado Global de Energías Renovables 2022 hace una observación confrontante, y es que la transición energética no está sucediendo, antes bien, se está estancando pues siguen liderando los combustibles fósiles, que son utilizados por los mayores consumidores de energía. Como vemos en la figura 5. Solo el 2,8% corresponde a ER del 12,6% de renovables modernas para 2020, frente a un 78,5% de combustibles fósiles como materia prima para producción de energía a nivel mundial. Ahora, para especificar una limitante más del crecimiento de las ER

es que los países que consumen más energía en el mundo, tienen la participación más pequeña en implementación de ER, tal como vemos en la figura 6.

**Figura 5**

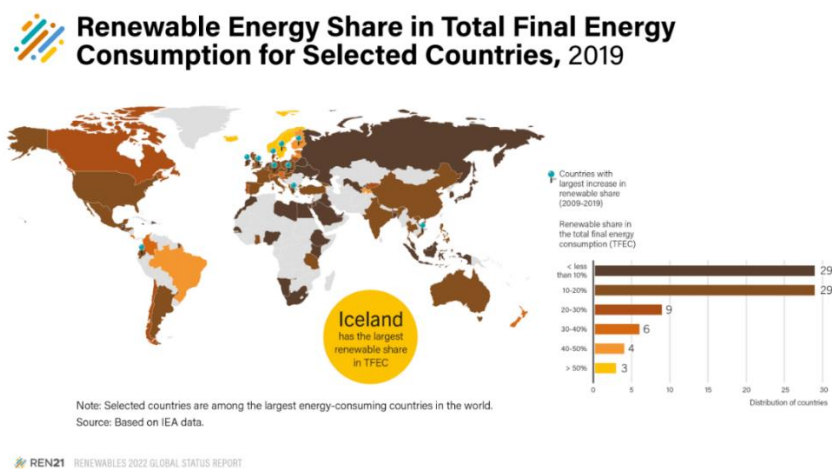
*Cuota de Energía Renovable Moderna 2009, 2019 y 2020*



Fuente. (Jones-Langley, 2022)

**Figura 6**

*Participación de ER en el consumo total mundial, 2019*



Fuente. (Jones-Langley, 2022)

### ***Contexto Colombia***

Por su privilegiada ubicación geográfica y en efecto sus condiciones climáticas, Colombia es un país con un potencial elevado para el desarrollo de energías renovables tales como solar, eólica, biomasa, geotérmica en diferentes regiones del territorio; sin embargo, lograr las condiciones para promover su desarrollo ha sido el reto más grande, pues el despertar de la transición energética ha venido en paulatino aumento durante los últimos años ante el evidente impacto del uso de combustibles fósiles como única fuente aparente para generación de energía, además de la incertidumbre asociada a la disponibilidad de datos de las FNCE para reaccionar a su regulación, los altos costos de inversión, la limitada capacitación en las nuevas tecnologías, los subsidios para el uso de los energéticos convencionales y el incumplimiento de la normatividad.

Vemos entonces, que empiezan a sentarse algunas determinaciones a partir de los 90 para incentivar el desarrollo de las energías renovables en Colombia desde el documento generado por la Comisión Nacional de Energía titulado “Bases para la formulación de un plan de fuentes nuevas y renovables para Colombia” donde se elaboraron algunos atlas con estudios sobre radiación solar y energía eólica, aproximaciones al recurso geotérmico, de biomasa e inventarios de implementaciones en energía solar y térmica. Posteriormente, para establecer la normativa de las acciones a realizar el gobierno de turno publica la Ley 697 de 2001 para definir las FNCE en Colombia y exponer las iniciativas políticas y tributarias orientadas a promover beneficios a los proyectos aplicables con FNCE renovables, que de igual forma se documentan en el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) 3242 como estrategia institucional para la venta de servicios ambientales de mitigación del cambio climático.

En el 2006 surge el Plan Energético Nacional (PEN) que señala algunas estrategias para fortalecer el esquema institucional; así como en 2010 se formula el Plan de Acción

indicativo para las FNCE denominado Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE) que para ese momento participaban con 192,4MW, lo cual corresponde a 1,4% del total instalado de 13.400MW, de los cuales 146MW corresponde a pequeños aprovechamientos hidroeléctricos menores de 10MW, otros 26,9MW a generación con residuos de biomasa y 19,5MW a generación eólica. Esto representa la siguiente composición de las FNCE en el SIN por tecnología:

**Tabla 1**

*Composición de las FNCE en el SIN a 2010 en Colombia.*

<b>Tecnología</b>	<b>Capacidad Instalada (MW)</b>	<b>Participación</b>
PCH	146,0	75,9%
Biomasa	26,9	14,0%
Eólica	19,5	10,1%
<b>Total</b>	<b>192,4</b>	<b>100,0%</b>

*Fuente.* (CORPOEMA, 2010)

Actualmente se encuentra la versión del PROURE adoptada por el Ministerio de Minas y Energía a través de la Resolución 40156 del 29 de abril de 2022, que recoge los comentarios recibidos por la UPME en el periodo de consulta realizado del 4 al 31 de octubre de 2021 y por el MME en enero de 2022. En este documento se propone una visión a 2030 de la eficiencia energética como recurso fundamental en la consecución de los objetivos de política pública del sector: abastecimiento confiable, precios competitivos y mitigación del cambio climático. (UPME, 2022)

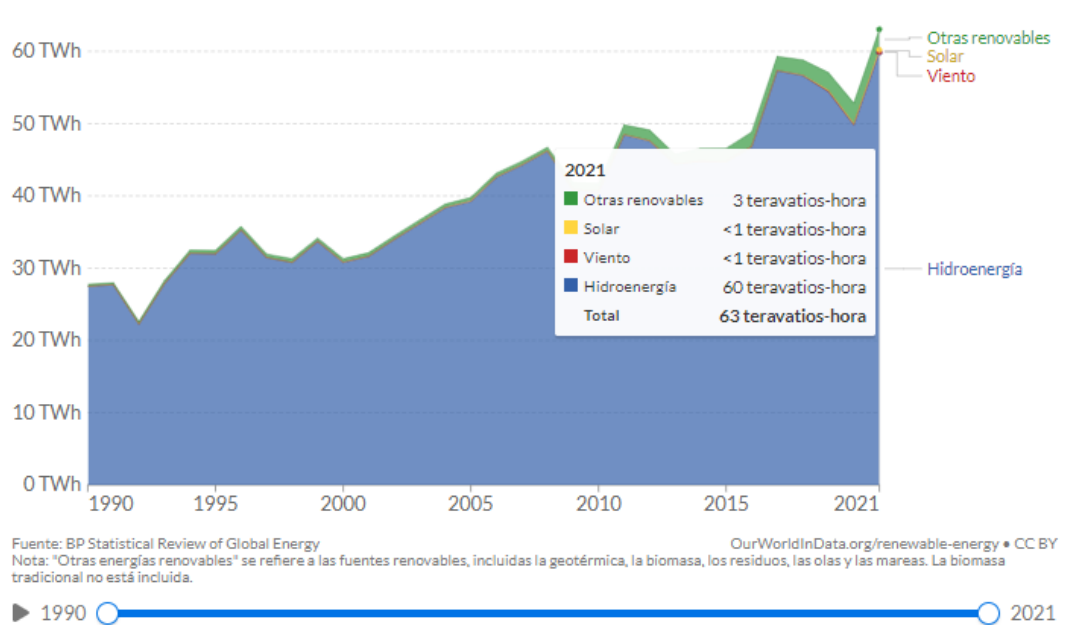
En el caso colombiano, según la figura 7 siguen liderando las hidroeléctricas muy por encima de las renovables solar y eólica en cuanto a la generación de energía. Sin embargo, según el plan de desarrollo 2011-2020 para las FNCE realizado por la UPME, en gran parte

del territorio nacional se cuenta con el potencial para construir soluciones para el suministro de energía en los campos de la biomasa, fotovoltaica y eólica. (CORPOEMA, 2010)

Actualmente Colombia tiene 24 granjas solares, 2 parques eólicos, 10 proyectos de autogeneración a gran escala y más de 3.000 proyectos solares fotovoltaicos de autogeneración a pequeña escala.

### Figura 7

#### Generación de Energía Renovable 1990 – 2021



Fuente. (Ritchie et al., 2022)

En el panorama suramericano encontramos para 2021 a Colombia como el cuarto país con un porcentaje de 67,9% de energía renovable en la capacidad instalada, después de Paraguay que tiene un 99,7%, Brasil con un 83,2% y Uruguay con un 75,9%; lo que supone un esfuerzo mayor para garantizar el cumplimiento de las estrategias que se ha planteado el gobierno actual con la ruta de transición energética para la agenda 2030.

**Figura 8**

*Total de Energías Renovables en la capacidad instalada Suramérica 2012 – 2021*

**Total energías renovables**

CAP (MW)	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Brazil	96 117	99 835	106 445	112 641	121 374	128 417	136 579	144 552	150 046	159 943
Chile	7 056	7 678	8 529	8 452	9 299	10 289	10 856	11 498	12 619	14 890
Colombia	9 979	10 075	11 134	11 757	11 888	12 071	12 194	12 291	12 387	12 553
Ecuador	2 368	2 388	2 440	2 599	4 640	4 714	5 266	5 277	5 298	5 300
Falklands Malv	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Fr Guiana	157	158	158	168	168	168	168	171	179	179
Guyana	54	55	55	55	46	48	51	53	53	53
Paraguay	8 810	8 849	8 849	8 849	8 849	8 849	8 849	8 832	8 832	8 832
Peru	3 713	3 784	4 055	4 647	5 725	5 820	6 100	6 289	6 345	6 431
South Georgia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Suriname	181	181	186	188	188	189	190	190	191	191
Uruguay	1 834	2 012	2 437	2 825	3 184	3 716	3 727	3 736	3 741	3 741
Venezuela	14 656	14 954	14 955	15 214	16 597	16 597	16 596	16 598	16 598	16 598

*Fuente.* (IRENA, 2022a; Ritchie et al., 2022)

## **Evolución de la Energía Eólica**

### **Contexto Mundial**

El primer aerogenerador fue construido por Charles F. Brush en EE. UU. en 1888. Contenía 144 palas construidas en madera de cedro que funcionó durante 20 años y lo construyó en su propio terreno en Cleveland, tenía una potencia de 12 kW, producía electricidad en CC, que almacenaba en baterías. Sobre 1904 el danés Poum la Cour construyó varios aerogeneradores modernos; a finales del siglo XIX puso en marcha varios aerogeneradores de 4 y 6 palas (Canarias, 2008). En 1940 la empresa danesa F. L. Smidth empezó a fabricarlos con 2 o 3 palas, estos últimos son los utilizados actualmente. En 1950 con un aerogenerador de 3 palas el danés Johannes Juul consiguió generar corriente alterna.

La energía eólica se clasifica entre las tecnologías con un desarrollo acelerado y su uso está creciendo en todo el mundo, pues los costos han ido en caída. La capacidad global instalada de generación eólica en tierra y mar adentro ha aumentado en un factor de casi 75 en las últimas dos décadas, saltando de 7,5 gigavatios (GW) en 1997 a unos 564 GW en 2018, según los últimos datos de IRENA.



## Figura 9

### *Evolución aerogeneradores*



*Fuente.* (HistoriaInventos, 2014)

La producción de electricidad eólica se duplicó entre 2009 y 2013, y en 2016 la energía eólica representó el 16% de la electricidad generada por las energías renovables. (IRENA, 2022a). La energía eólica instalada en el mundo creció un 53% en 2020, hasta situarse en 743 GW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC) 2020 ha sido, hasta el momento, el mejor año de la historia para la industria eólica con 93 GW de nueva capacidad instalada.

## Figura 10

### *Incremento de potencia eólica mundial*



*Fuente.* (AEE, 2020)

### ***Contexto Colombia***

El sistema eólico tiene sus inicios en el país a partir del siglo XX cuando llegaron al mercado las autobombas americanas y de las cuales Colombia importó al menos unas 3.000 con el apoyo de la Caja Agraria durante los años 1940 y 1980; aunque se realizó la instalación en puntos aledaños a Bogotá, un tiempo después fueron desechadas pues la tasa de red eléctrica durante la temporada era muy alta. Hacia 1970 el centro de desarrollo “las Gaviotas” en conjunto con la Universidad de los Andes gestionaron un proyecto de investigación, que dio como resultado el diseño del molino de viento tropical de doble efecto, y que posteriormente publicó en 1979 el resultado final conocido como “Gavilán” que tenía características importantes, como su forma simple de manejo, el bajo coste y fácil mantenimiento. Sobre 1989 la Universidad Nacional de Colombia desarrolló proyectos investigativos con pruebas de campo del primer prototipo de equipo eólico Producción Mixta (PROMIX) que logró presentar planos de un aerogenerador de 5kW nominales, y que se continuaría desarrollando hacia la Producción Eléctrica (PROEL) pero lastimosamente no se continuó, de lo contrario Colombia hoy tendría capital humano capacitado en esta tecnología.

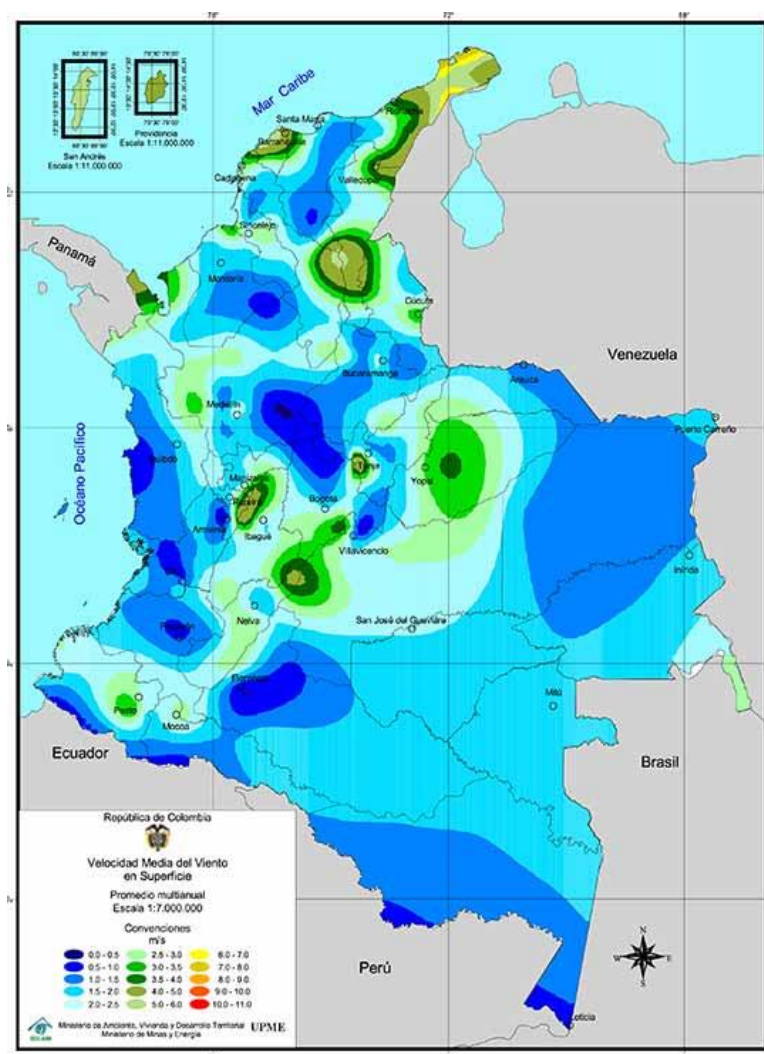
“Para el año 2009 la universidad de los Andes se encontraba realizando estudios aerodinámicos de perfiles con bordes de fuga recortados, fabricación de aspas con nuevos materiales, fabricación de un túnel de viento para la corroboración experimental de desarrollos aerodinámicos, entre algunos otros proyectos. Similarmente se continúa en el desarrollo de autobombas y en la actualidad se está desarrollando un banco de pruebas para autobombas consistente en un tubo ciego con 25 metros de profundidad. En este se podrán evaluar las condiciones dinámicas de fuerzas, presiones y manejo de caudales para nuevos diseños de bombas actuadas mecánicamente.”. (Jiménez, 2019)

En la actualidad, la energía eólica representa un 0,1 de la producción de energía del País. Tenemos funcionando dos parques eólicos, el primero desarrollado como un proyecto

piloto por el grupo EPM (Empresas Públicas de Medellín) en 2004 ubicado en el municipio de la Uribia, Guajira y es el *Parque Eólico Jepírachi* que cuenta con 15 turbinas de aerogeneración eléctrica con una producción de 19,5MW. Y el segundo, se trata de *Guajira I* desarrollado por ISAGEN e inaugurado en enero 2022 con 10 aerogeneradores para una capacidad de 20MW; “este último posee el registro del proyecto como Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y puede emitir Certificados de Reducción de Emisiones (CER). Además, permitirá reducir 136 toneladas de CO2 que se emiten a la atmósfera en su etapa de funcionamiento” (LaRepública, 2022).

### Figura 11

*Mapa eólico de Colombia con velocidad media del viento en superficie*



Fuente. (Gsalcedo, 2021)

Aunque la Guajira es la región más prometedora para el desarrollo de proyectos eólicos con velocidades que se sitúan entre 5 y 11 m/s, no es la única en el país que cuenta con este potencial, también encontramos regiones como San Andrés, Santa Catalina, Providencia, Santander o Barranquilla, por ejemplo, con capacidad de instalación costa afuera. Según investigaciones realizadas por la Unidad de Planeación Minero Energética, aprovechar naturalmente los recursos eólicos podría permitir que se sustituya gran parte del gas natural que se emplea hoy. A continuación, mostramos un mapa eólico de Colombia proporcionado por la UPME 2021.

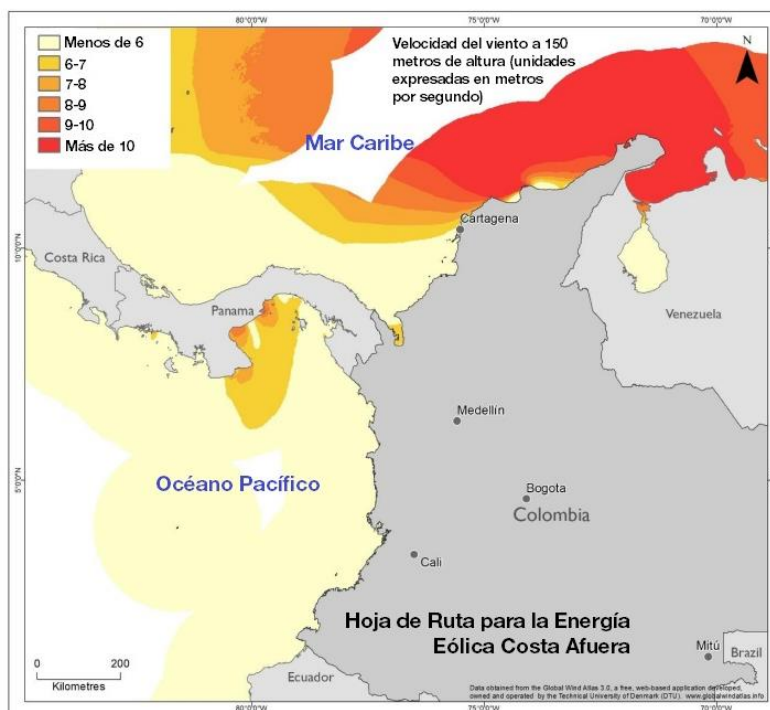
Según reporta el Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia, los vientos que presentan velocidades superiores a 5 m/s constituyen una oportunidad de aprovechamiento energético, según el mapa estos corresponden a las zonas de color amarillo, verde y rojo. Los expertos analizan que para 2030 la capacidad instalada eólica terrestre de Colombia podría alcanzar los 3,4 GW (gsalcedo, 2021) esto también teniendo en cuenta que hay actualmente 16 proyectos eólicos en desarrollo.

En mayo 2022 el gobierno de turno presentó "*La Hoja de Ruta de Energía Eólica Costa Afuera*" que tiene como objetivo construir la regulación transparente y clara que garantice la seguridad energética, así como el mercado eléctrico resiliente y descarbonizado. Estos nuevos proyectos eólicos costa afuera pueden traer a Colombia inversiones por valor de "más de 27.000 millones de dólares estadounidenses de acá al 2050, lo que representaría la creación de 26.000 empleos".

La Hoja concreta en cincuenta gigavatios (50 GW) el potencial eólico marino colombiano, lo que corresponde a casi tres veces la capacidad instalada que hay actualmente en el país (17 GW). (RenewableEnergies, 2022)

**Figura 12**

*Mapa eólico mapa eólico del Caribe*



*Fuente.* (RenewableEnergies, 2022)

### **Antecedentes Energía Eólica en Bolívar, San Andrés y Norte de Santander**

La densidad de la energía eólica se ve influenciada por el resultado del viento en la superficie que está modulado por los principales sistemas atmosféricos que regulan las condiciones del tiempo en el país. Es decir, que en los lugares donde la intensidad del viento es débil encontramos valores menores de densidad de energía, de igual forma hacia la intensidad fuerte del viento en donde la densidad crece de forma potencial. En el capítulo 4 del Atlas del Viento 2006 encontramos la variabilidad diurna del viento a través del año en donde se relacionan algunas regiones que arrojan datos para aprovechamiento energético según la dinámica atmosférica. Allí observamos que las regiones de Bolívar, San Andrés y Norte de Santander están entre las 10 más destacadas con datos puntuales registrados en las gráficas que veremos más adelante, en donde se realiza un análisis de la variabilidad temporal

del viento mediante el trazado de isolíneas de dicha variable meteorológica. Estos trazados permiten visualizar los intervalos de tiempo diurno y anual en donde se pueden establecer las condiciones eólicas propicias para el aprovechamiento del recurso viento, en la generación energética para evaluaciones locales de potencial energético, así como también preseleccionar proyectos de prefactibilidad relacionados con el desarrollo de parques eólicos o si es el caso, planificar el sistema integrado de generación y distribución de energía, según la participación que puede ofrecer la dinámica atmosférica. (UPME, 2006)

Evidenciamos en la figura 13 que, según los datos arrojados por las diferentes estaciones meteorológicas de algunas zonas del país, la velocidad promedio del viento más significativa la tiene el departamento de Bolívar con una velocidad de 5,9 m/s, seguido de Boyacá con 5,5 m/s y en un tercer lugar para San Andrés con un registro de 5,1 m/s, al departamento de Norte de Santander lo encontramos en el puesto 9 con una velocidad del viento promedio de 3,3 m/s según datos de la estación meteorológica del Aeropuerto Camilo Daza.

### Figura 13

*Localización de lugares con mayor potencial de energía eólica en Colombia*

ID	LONGITUD	LATITUD	ESTACIÓN	DEPARTAMENTO	VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO
1	75°16'W	10°47'N	GALERAZAMBA	BOLÍVAR	5.9
2	73°33'W	05°26'N	GACHANECA	BOYACÁ	5.5
3	81°43'W	12°35'N	AEROPUERTO SESQUICENTENARIO	ISLA DE SAN ANDRÉS	5.1
4	74°44'W	03°20'N	LA LEGIOSA	HUILA	4.1
5	81°21'W	13°22'N	AEROPUERTO EL EMBRUJO	ISLA DE PROVIDENCIA	4.0
6	72°56'W	11°32'N	AEROPUERTO ALMIRANTE PADILLA	LA GUAJIRA	4.0
7	73°30'W	05°32'N	VILLA CARMEN	BOYACÁ	3.9
8	77°18'W	01°11'N	OBONUCO	NARIÑO	3.5
9	72°31'W	07°56'N	AEROPUERTO CAMILO DAZA	NORTE DE SANTANDER	3.3
10	76°07'W	06°20'N	URRAO	ANTIOQUIA	3.0

Fuente. (UPME, 2006)

## ***Bolívar***

El desarrollo de las energías renovables en Colombia ha estado avanzando a pasos agigantados, especialmente en la región de la Guajira en donde ya están implementados y en marcha los dos parques eólicos del País. Sin embargo, gracias al estudio realizado en 2006 por el Atlas del Viento en Colombia se determinó que el departamento de Bolívar también tendría un potencial eólico considerable, especialmente en la zona de Galerazamba, corregimiento de Santa Catalina. Así mismo, según el caso estudio de (Ricardo & Venecia, 2011) en donde se evaluó el recurso eólico en Colombia para su aprovechamiento como fuente de energía eléctrica se determinó que en los años 2008 y 2009, Galerazamba presentó promedios anuales de la velocidad del viento de 5,14 y 5,2, m/s respectivamente. De igual forma, se realizó una evaluación de la densidad de energía eólica (W/m<sup>2</sup>) en 45 zonas de Colombia. A partir de estas zonas, se seleccionó Galerazamba, teniendo en cuenta además de su densidad de energía eólica, otros criterios de interés como su ubicación geográfica, los antecedentes de la zona referentes a la energía eólica, la dirección del viento y la atracción que presenta la zona para el desarrollo de proyectos eólicos. En la zona seleccionada, se realizó la modelación y simulación de la producción de energía eléctrica (a partir del viento), además de su evaluación económica y ambiental determinando viable instalar un parque eólico de 12 MW con 6 aerogeneradores Vestas de 2MW c/u. Es importante resaltar que, aunque los estudios en la zona llevan varios años no ha sido posible el aval para la ejecución de proyectos de energías renovables pues el Operador de Red indica que es un permiso que debe otorgar el gobierno debido a la falta de infraestructura que permitiera evacuar la energía allí generada, sin embargo, el gobierno le atribuía la responsabilidad al Operador de Red. Actualmente se desarrolla una queja desde la administración local hacia el gobierno nacional que pretende para lograr vía libre a la ejecución de proyectos especialmente en materia de energía eólico y fotovoltaica. (Intereléctricas, 2021)

### ***San Andrés***

Siendo otra de las regiones con potencial de viento considerable para implementar proyectos eólicos, San Andrés, según (César, 2013) intentó implementar un mini proyecto piloto de aerogeneración eléctrica encabezada por el SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje) seccional San Andrés, que pretendía instalar una turbina eólica experimental de 10m de altura para brindar iluminación a la primera planta del SENA, con una carga de 2kW y que permitiría ahorrar al mes, más de dos millones de pesos en facturación de energía. Sin embargo, estaban a la espera de la llegada de la torre para iniciar el componente práctico, pero no se volvió a mencionar en ninguna fuente bibliográfica a la fecha algún avance relacionado.

Durante 2016, la gobernación del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina adelantó una campaña denominada “El viento bajo nuestras alas” que sensibilizaba a la comunidad sobre las ventajas y desventajas de desarrollar iniciativas de energía eólica, aprovechando el viento como materia prima; sin embargo, en 2020 se vieron frustrados este y otros proyectos para el departamento pues fue azotado por el huracán *Iota* lo que enfocó todos los esfuerzos y recursos para reconstruir la isla.

### ***Norte de Santander***

De acuerdo al estudio realizado por (UPME, 2006) con datos reportados en el Atlas del Viento de Colombia, el departamento de Norte de Santander tuvo participación en dos estaciones meteorológicas dentro de las primeras 16 con mayores registros de velocidad del viento promedio, en la posición 9 con 3,3 m/s para la estación Aeropuerto Camilo Daza y en la posición 15 con 2,5 m/s para la estación Abrego Centro Administrativo; aunque en temporadas como junio a septiembre podría incrementar la intensidad del viento entre 5 m/s a 7 m/s. El acercamiento más significativo del departamento en materia de transición



energética con recurso eólico ha sido la participación de las Centrales Eléctricas de Norte de Santander en la subasta de fuentes no convencionales de energías renovables del Gobierno Nacional con el objetivo de obtener un cupo de 10 % de su demanda en el mercado para recibir energía de proyectos eólicos y solares. Aunque, cabe resaltar que en promedios menores a 5 m/s no se considera factible implementar proyectos eólicos, razón por la que (COCIER, 2018) asegura que “aparte de la hidroenergía, el departamento tiene grandes ventajas en petróleo, gas y carbón, como fuentes no renovables, e hidroenergía, energía fotovoltaica y biomasa, como fuentes renovables.

## **Marco legal**

### ***Constitución Política de Colombia 1991***

**Artículo 79:** “No solo reconoce el derecho que tienen las personas a gozar de un ambiente sano, sino que además le atribuye al Estado el deber de proteger la integridad del ambiente, lo que involucra aspectos relacionados con el manejo, uso, aprovechamiento y conservación de los recursos naturales, el desarrollo sostenible y la calidad de vida del hombre; aspectos que están totalmente relacionados con la aplicación de energías limpias”. (Constituyente, 1991)

**Artículo 80:** “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución”. (Constituyente, 1991)

**Artículo 334:** “La dirección general de la economía estará a cargo del Estado. Este intervendrá, por mandato de la ley, en la explotación de los recursos naturales, en el uso del suelo, en la producción, distribución, utilización y consumo de los bienes, y en los servicios públicos y privados, para racionalizar la economía con el fin de conseguir el mejoramiento de

la calidad de vida de los habitantes, la distribución equitativa de las oportunidades y los beneficios del desarrollo y la preservación de un ambiente sano”. (Constituyente, 1991)

**Ley 23 de 1973** “Por el cual se conceden facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones”. (Colombia, 1973)

**Ley 99 de 1993** “Se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones”. (Republica, 1993)

**Ley 143 de 1994** “Establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética”. (Colombia, 1994)

**Ley 697 de 2001** “Fomenta el uso eficiente y racional de la energía, a su vez promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones” (Andrea, 2013)

**Ley 665 de 2013** “Con esta ley Colombia ratifica el Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables. Con la ratificación de este documento Colombia adquiere unas obligaciones sobre el tránsito hacia energías limpias; sin embargo, a la fecha son pocos los avances que hay al respecto” (Sanchez et al., 2021)

**Ley 1715 de 2014** “Regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”.

**Artículo 11. Incentivos a la generación de energías no convencionales.**

“Fomento a la investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de la producción y utilización de energía a partir de FNCE, la gestión eficiente de la energía, los obligados a declarar renta que realicen directamente inversiones en este sentido, tendrán derecho a reducir anualmente de su renta, por los 5 años siguientes al año gravable en que hayan realizado la inversión, el cincuenta (50%) del valor total de la inversión realizada.

El valor por este concepto, en ningún caso podrá ser superior al 50% de la renta líquida de la contribuyente determinada antes de restar el valor de la inversión.

Para los efectos de la obtención del presente beneficio tributario, la inversión causante del mismo deberá obtener la certificación de beneficio ambiental por el Ministerio de Ambiente y ser debidamente certificada como tal por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en concordancia con lo establecido en el artículo 158-2 del Estatuto Tributario”.

**Artículo 20. Desarrollo de la energía eólica**

1.“La energía eólica se considerará como FNCER. Se deberá estudiar y analizar las condiciones propias de la naturaleza de la fuente para su reglamentación técnica por parte de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)”.

2.“El Gobierno Nacional a través del Ministerio de Minas y Energía fomentará el aprovechamiento del recurso eólico en proyectos de generación en zonas aisladas o interconectadas”.

3.“El Ministerio de Minas y Energía, directamente o a través de la entidad que designe para este fin, determinará requerimientos técnicos y de calidad a cumplir por las instalaciones que utilicen el recurso eólico como fuente de generación”.

4. “El Gobierno Nacional, por intermedio del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, determinará los parámetros ambientales que deberán cumplir los proyectos desarrollados con energía eólica, así como la mitigación de los impactos ambientales que puedan presentarse en la implementación”. (Colombia, 2014)

**Ley N. 2036 de 2020** “Promueve la participación de las entidades territoriales en los proyectos de generación de energías alternativas renovables y se dictan otras disposiciones”. (Republica, 2020)

**Ley 2099 de 2021** “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”. (Republica, 2021)

**Decreto 2811 de 1974** “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”. (Nacional, 1974)

**Decreto 2755 de 2003** “Renta exenta en la venta de energía eléctrica generada con base en los recursos eólicos, biomasa o residuos agrícolas por 15 años. También se tiene otro tipo de incentivo por la generación de energía limpia el cual consiste en un ingreso adicional producto de la expedición de certificados de reducción de emisiones de carbono, de acuerdo con el protocolo de Kyoto”. (Interior, 2003)

**Decreto 3573 de 2011** “Se crea la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y se dictan otras disposiciones” (Colombia, 2011)

**Decreto 2469 de 2014** “Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración”. (Energía, 2014)

**Decreto 1623 de 2015** “Modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura

del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas”. (Colombia, 2015)

**Decreto N. 2143 de 2015** “Este decreto es de suma importancia, ya que adiciona algunos apartes relacionados con incentivos tributarios para energías renovables a los que se puede acceder a través de los procedimientos generales en él señalados”. (Sanchez et al., 2021)

**Decreto N. 1543 de 2017** “Se reglamenta el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, FENOGE” todas aquellas contribuciones económicas destinadas para el desarrollo e implementación de energías no convencionales de las cuales hacen parte las energías renovables, serán destinadas a este fondo para financiar estos programas”. (Sanchez et al., 2021)

**Decreto 895 de 2022** “Modifica la normativa sobre el acceso a incentivos a la generación de energía eléctrica con fuentes no convencionales. Básicamente incluye a los proyectos de hidrógeno verde y azul dentro de los beneficiados de los incentivos tributarios estipulados para la generación de energía a partir de fuentes renovables, también se encuentra la sobre deducción de hasta el 50% en el impuesto sobre la renta del total de la inversión realizada en este tipo de proyectos y la exclusión del IVA en la adquisición de bienes y servicios, se toman otras disposiciones”. (Publico, 2022)

**Resolución UPME 0281 de 2015** "Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala". (Rueda-Bayona et al., 2019)

**Resolución CREG 061 (CREG, 2015)** “Metodología ENFICC - máxima energía eléctrica que puede producir una planta de generación de forma continua, en baja condiciones hidrológicas, en un año para parques eólicos”. (Rueda-Bayona et al., 2019)

**Resolución N. 1283 de 2016** “Esta resolución establece el procedimiento y los requisitos que deben tenerse en cuenta a la hora de expedir el certificado de beneficio ambiental por invertir en proyectos de fuentes no convencionales de Energías Renovables y gestión eficiente de la energía, lo que conlleva a el beneficio de deducción especial de renta y complementarios, beneficio de exclusión del IVA, beneficio de exención de gravamen arancelario y beneficio de depreciación acelerada”. (Sostenible, 2016)

**Resolución Ministerio del Medio Ambiente 1312 de 11 agosto de 2016** "Adopta los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de proyectos de uso de fuentes de energía eólica continental y se toman otras determinaciones”. (MinAmbiente, 2016)

**Resolución CREG 167 de 2017** “Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas”. (Energía, 2017)

**Resolución N. 000703 de 2018** “Instaura el procedimiento y los requisitos para obtener la certificación que avala los proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), con miras a obtener el beneficio de la exclusión del IVA y la exención de gravamen arancelario y se adoptan otras disposiciones”.(UPME, 2018)

## Energía Eólica

### Aspectos técnicos

El sol calienta la tierra en diferentes ubicaciones debido a la rotación, esto crea gradientes de temperatura a lo largo del mundo; el aire caliente tiende a subir en la atmósfera, mientras que el aire frío tiende a caer hacia el suelo, esto genera una recirculación global del aire entre regiones a diferentes temperaturas, es por ello que la diferencia de temperatura y la presión atmosférica tienen influencia sobre la dirección y velocidad del viento. Sobre el mar, el aumento será mucho más pronunciado, esto significa que en altamar la velocidad del viento es más uniforme con la altitud. También se asocia con la escala de los tiempos, el orden de los meses, ya que estos ciclos de recirculación global normalmente cambiarán con las estaciones.

Entonces, recordemos que la energía eólica es la que contiene el viento en forma de energía cinética y se puede transformar en otro tipo de energía como mecánica, eléctrica, hidráulica; aunque la energía en realidad se almacena químicamente, pero se libera en forma de electricidad. En la actualidad la forma más utilizada para el aprovechamiento de energía eólica se realiza a través de aeroturbinas, que transforman la energía eólica en energía mecánica si se utilizan aeromotores, o energía eléctrica si empleamos aerogeneradores.

Los aerogeneradores son sistemas de aprovechamiento eólico, que al incidir el viento sobre sus palas se produce un trabajo mecánico de rotación y produce que se mueva el generador que a su vez produce electricidad. Se componen de 2 o 3 palas, el buje, góndola, se conectan las 3 cuchillas y también abarcan el generador, la torre que soporta el conjunto rotor – góndola y el montaje, sea en tierra o en altamar. En cuanto mayor sea el número de cuchillas, mayor es el bloqueo de flujo; sin embargo, no quiere decir que si una turbina gira más rápido necesariamente producirá más energía, pues en este caso aplica la relación entre la velocidad de la punta de la hoja y la velocidad del viento entrante. Es importante tener en

cuenta que la potencia total disponible del viento en la ubicación del rotor se conoce como *Límite de Betz*.

Velocidad de relación = TSR

Concepto importante en mecánica de fluidos en base a las leyes de conservación; en particular la masa se conserva cuando el fluido se mueve a lo largo del tubo corriente mostrado por la línea discontinua. El caudal másico es en sí mismo una función de la velocidad, entonces T corresponde a la función de la velocidad. Por lo tanto, la velocidad del viento a la que el rotor comienza a rotar se denomina *velocidad de corte* y hace referencia a la velocidad máxima del viento a la que la energía puede ser producida de forma segura, esto podría ser sobre los 25 m/s; por su parte, la *velocidad de arranque* suele ser de unos 3 – 4 m/s mientras que la *potencia nominal* se limita a un valor constante y normalmente ocurre para velocidades entre 12 y 17 m/s. Algunos conceptos importantes:

*Histograma:* Probabilidad, función de densidad; muestra cuántas veces cierta velocidad del viento ocurre en ese lugar.

*Factor de capacidad:* Es un indicador de porcentaje del tiempo por el funcionamiento de un aerogenerador a plena potencia; si conocemos la potencia nominal de la turbina podemos multiplicar este valor por la capacidad factor para obtener una estimación aproximada de la energía. Los valores típicos de los factores de capacidad son: 0,25 en tierra y 0,45 en altamar.

### **Potencia del Viento**

La potencia del viento depende principalmente de tres factores:

1. Área del rotor  $A(m^2)$
2. Densidad del viento  $P (Kg/m^3)$



### 3. Velocidad del viento $V$ (m/s)

La potencia debido a la energía eólica está dada por la ecuación

$$P = \frac{1}{2} C_p P A V^3$$

En donde  $C_p$  corresponde al coeficiente de potencia mecánica

Se tiene la siguiente ecuación, para la potencia eléctrica producida por el viento al relacionar la potencia mecánica producida por el generador:

$$P_{elec} = \frac{1}{2} C_e P A V^3$$

En donde  $C_e$  corresponde a la tasa de eficiencia eléctrica (%) lo que indica el porcentaje de energía eólica convertida a eléctrica por la turbina. Los generadores actuales pueden convertir entre un 42% y 26% de energía eólica. (Ortiz, 2008)

### **La Distribución de Weibull**

Fue establecida por el físico suizo Weibull quien demostró que el esfuerzo al que se someten los materiales puede modelarse de manera adecuada mediante el empleo de esta distribución. Igualmente, esta se ha usado para modelar distintas situaciones como el tiempo de falla, vida útil de equipos y confiabilidad de un componente. (Ortiz, 2008) La función de distribución que describe el comportamiento del viento es la función tipo Weibull, la cual se

muestra en la ecuación:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}$$

En donde:

$x$  = Velocidad promedio del viento

$\beta$  = *Parametro de forma*

$\alpha$  = *Parametro de escala*

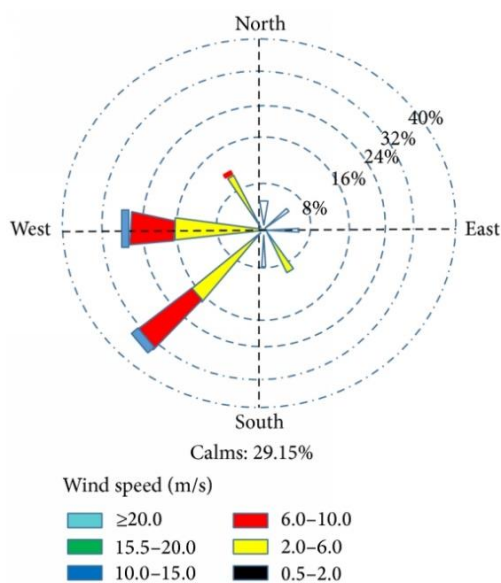
## Velocidad del Viento

Para determinar la factibilidad de proyectos eólicos como fuente de energía, la velocidad del viento se considera una variable determinante, esta se mide con unos aparatos llamados anemómetros. Un dato confiable respecto a las condiciones del viento requiere un seguimiento en las zonas estudiadas al menos por un año. Para considerar que un proyecto eólico podría ser factible se requiere que en la zona estudiada se presenten promedios de velocidad del viento superiores a 4 m/s. Adicionalmente se deben tener en cuenta variables determinantes como la dirección del viento, la densidad del aire, la presión y temperatura atmosférica, entre otras. (Ricardo & Venecia, 2011)

Gráficamente se puede representar la valoración del recurso eólico en un lugar determinado a través de la denominada Rosa de los Vientos (Figura 14). Aunque podemos tener una idea aproximada de la intensidad y dirección del viento, realmente no es considerada la mejor herramienta para evaluar un potencial energético.

### Figura 14

*Frecuencia de la velocidad del viento en Qorveh 1998-2007 (Rosa del viento)*



*Fuente.* (Hindawi, 2014)

## Partes del aerogenerador

Rotor: conjunto formado principalmente por las aspas y el buje. En el rotor se transforma la energía cinética del viento en energía mecánica.

Torre: se utiliza fundamentalmente para aumentar la altura del elemento que capta la energía del viento, pues el viento sopla a mayor velocidad según aumenta la altura.

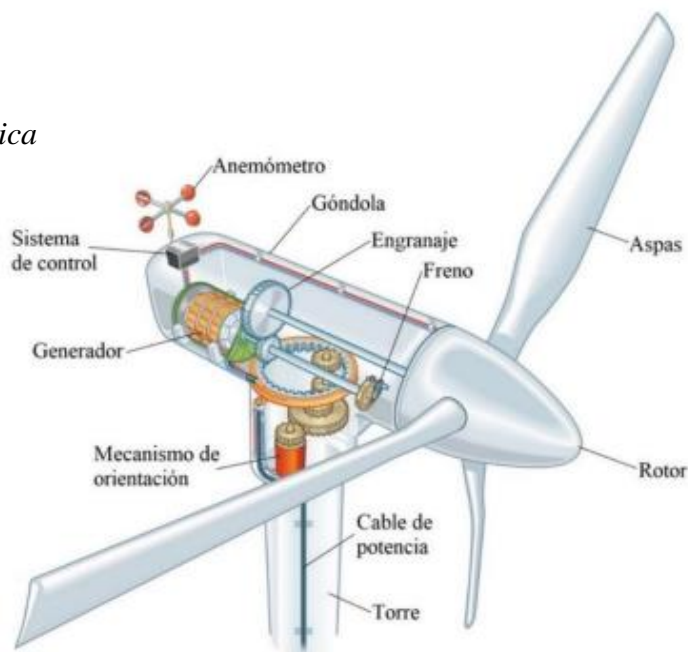
Góndola: se encuentran los elementos que transforman la energía mecánica en energía eléctrica: los ejes del aerogenerador, el multiplicador, el generador y los sistemas de control, orientación y freno. En el exterior está el anemómetro y la veleta.

Multiplicador: Elemento mecánico formado por un sistema de engranajes cuyo objetivo es transformar la velocidad del giro del rotor (velocidad del eje principal) a la velocidad de trabajo del generador eléctrico.

Generador Eléctrico: Máquina eléctrica encargada de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. El eje del generador lleva acoplado un sistema de freno de disco. (Canarias, 2008)

## Figura 15

### Partes turbina eólica



Fuente. (Sosapanta, 2020)

## Aspectos ambientales

*Afectación a la fauna:* durante la edificación se realizarán actividades que pueden causar daños en el hábitat de varias especies, esto se debe a la necesidad de construir carreteras, cunetas, construcciones para almacenar aparatos y materiales, salas de control y monitoreo del parque, cimentaciones de las turbinas eólicas, líneas eléctricas y estaciones de transformadores. Además, se tienen accidentes como el choque y muerte de aves debido a las hélices de los aerogeneradores cuando se encuentran en movimiento, las víctimas pueden estar localizados en la zona o ser migratorias.

### Figura 16

*Impacto a la fauna por turbinas eólicas*



*Nota.* El cadáver de un milano real yace al pie del aerogenerador que provocó su muerte en un parque eólico del sur de Navarra – España

*Fuente.* (Público, 2021)

**Emisiones de ruido:** En la fase de construcción, el movimiento de las maquinas ocasiona ruido mecánico que afecta a los habitantes aledaños y a los animales, los pájaros pueden ver afectada su nidificación, por ejemplo; especies como los rapaces abandonan sus nidos por el alto sonido.

**Flora:** La eliminación de la cobertura vegetal o el deterioro se ha ocasionado debido a las excavaciones realizadas para la instalación de los aerogeneradores, adecuación y apertura de vías de acceso. La gravedad dependerá de las especies afectadas, su valor como especies endémicas y autóctonas, niveles de protección, proximidad a la etapa clímax, su interés como recurso productivo, entre otros factores.

### **Figura 17**

*Desmontes para instalar plataformas de aerogeneradores y de torres de la línea eléctrica.*



*Fuente.* (d' Aragon, 2020)

**Aspecto visual:** El efecto sobre el paisaje se presentará en la instalación de cada aerogenerador, las torres que serán visualmente impactantes y para cuyo montaje se

realizaron desbroce de vegetación, excavaciones que alteraron las geoformas y la apariencia estética local. También depende de la topografía del lugar, condiciones climáticas y de la distancia a la que se ubica el parque de la comunidad.

## **Ventajas y Desventajas**

### ***Ventajas***

- La energía eólica no contamina, es inagotable y frena el uso indiscriminado de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático.
- La fuente de la energía eólica es el viento, recurso este que es renovable e interminable, lo que da una ventaja competitiva frente a la generación convencional de energía, donde los recursos son agotables.
- Al contrario de lo que puede ocurrir con las energías convencionales, la energía eólica no produce ningún tipo de alteración sobre los acuíferos ni por consumo, ni por contaminación por residuos o vertidos. (Andrea, 2013)
- Esta energía es clave para la conservación de las fuentes hídricas, en vista de que requiere un consumo de agua muy bajo.
- Los parques eólicos tienen un impacto muy pequeño en el suelo y en su erosión. Esto se debe tanto a la ausencia de residuos contaminantes como al hecho de que ocupan poco espacio en comparación con otro tipo de instalaciones energéticas. (Arriols, 2022)

### ***Desventajas***

- La principal desventaja de la energía eólica es que existe incapacidad para controlar el viento. Al ser una energía menos predecible no puede ser utilizada como única fuente de generación eléctrica. (Andrea, 2013)

- Los aerogeneradores son costosos por sus especificaciones técnicas y las dimensiones físicas que se requieren para una generación exitosa de energía. Por tanto, la inversión inicial en infraestructura de los parques eólicos es elevada.
- Esta energía renovable no se puede almacenar, sino que debe ser consumida de manera inmediata cuando se produce.
- Los parques eólicos ocupan grandes espacios y se localizan en paisajes naturales transformando el paisaje original. Es necesario realizar estudios de impacto ambiental previos para evitar que perjudiquen a las aves migratorias o al paisaje. (Andrea, 2013; FactorEnergía, 2018)

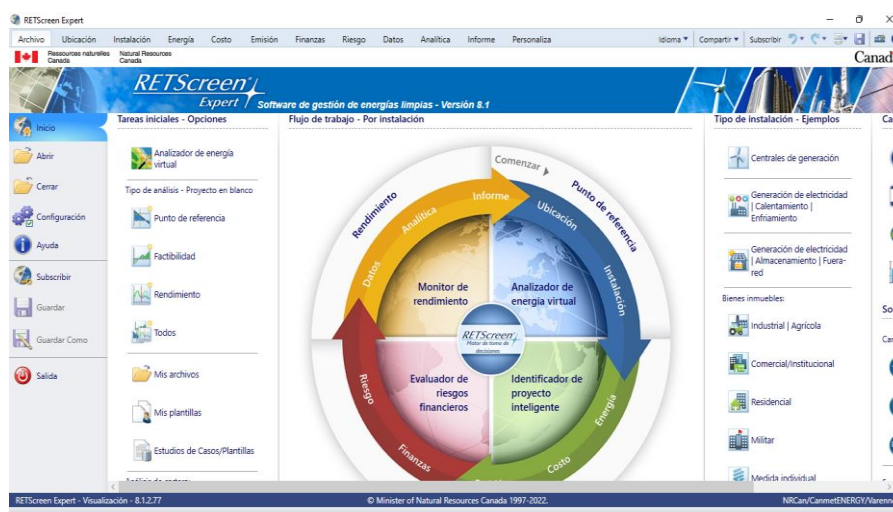
## Desarrollo estudio de caso: Metodología del proyecto

### Introducción a RETScreen Expert

RETScreen Expert es una completa plataforma de software de gestión de energía limpia que permite a los profesionales y responsables de la toma de decisiones identificar y evaluar rápidamente la viabilidad de proyectos potenciales de eficiencia energética, energías renovables y cogeneración; medir y verificar fácilmente el desempeño energético de sus instalaciones y ayudar a encontrar oportunidades adicionales de producción/ahorro de energía. Además de contar con modelos de energía y análisis de información, también cuenta con importantes bases de datos, tanto de productos, como de costos y la más relevante asociada a datos climatológicos, que permite obtener, ya sea a través de estaciones de monitoreo terrestre o mediante información satelital generada por la NASA, con el apoyo del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y otros organismos desarrolladores que contiene información clave para la evaluación de proyectos de energía limpias, como por ejemplo radiación solar, velocidad del viento y temperaturas ambientales, entre otras. (Muñoz, 2020).

### Figura 18

#### Software inicial RETScreen Expert



Fuente. (RETScreen\_Expert, 2018)



Se encuentra disponible en modo visor gratuita y la versión utilizada para el presente proyecto de investigación corresponde a la 8.1.2.77, Minister of Natural Resources Canada 1997- 2022.

### **Punto de Referencia**

Este módulo de análisis de comparación de RETScreen nos permite establecer de forma rápida condiciones climatológicas de referencia para cualquier instalación desde cualquier punto del planeta y comparar el rendimiento energético de varios tipos de instalaciones de referencia con el consumo estimado o medido anual de energía de una instalación específica. Así mismo, es posible evaluar de forma rápida el rendimiento de una instalación, es decir, la producción o el consumo de energía esperados frente a instalaciones de referencia, así como detectar las posibles mejoras.

### ***Ubicación***

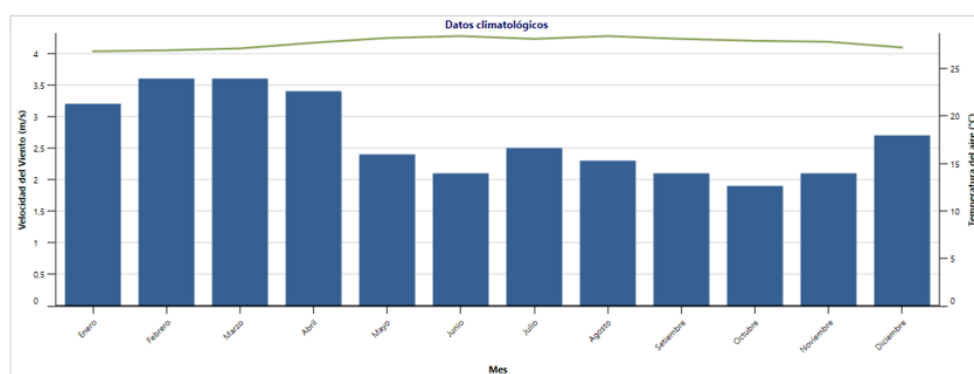
Como parte de la ruta de trabajo en el software se debe seleccionar la zona de estudio dentro del mapa en la opción *ubicación de datos meteorológicos* que permitirá conocer las condiciones climáticas de referencia; la base de datos climáticos de RETScreen incluye los datos de geolocalización y meteorológicos necesarios en el modelo, tales como latitud, longitud, zona climática, elevación, temperatura promedio, velocidad del viento, intensidad de radiación solar horizontal, entre otros,, siempre especificando la fuente de obtención de estos datos que pueden ser de las estaciones de monitoreo en tierra que se representan en el mapa como puntos rojos y/o de los datos globales de satélite/análisis de la NASA que se reflejan como puntos azules. Es importante tener claro que la opción siguiente de *ubicación de la instalación* no altera los datos elegidos en la ubicación de datos meteorológicos, pero si podemos manualmente ubicar el cursor en el punto específico donde potencialmente implementaremos el proyecto diseñado. En cuanto a la velocidad del viento RETScreen hace

la medición por defecto a 10m de altura habitualmente, aunque es posible verificar la base de datos climáticos y se puede ajustar entre 3 a 100m.

En esta sección podemos observar el comparativo del último año respecto a diferentes variables climáticas como la temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, entre otras; de igual forma podemos elegir dos de las más representativas variables para conocer gráficamente el comportamiento mensual y obtener a simple vista una conclusión; por ejemplo, en la figura 19 vemos que la velocidad del viento para los meses de febrero, marzo y abril en Galerazamba – Bolívar predomina sobre todo el año con un promedio de 3m/s.

**Figura 19**

*Ejercicio Representación de la variación mensual Velocidad del Viento vs. Temperatura*



*Fuente:* (RETSscreen, 2022)

### ***Instalación***

Este módulo tiene dos secciones, la primera donde se ingresa la información general sobre la instalación del proyecto que se quiere analizar en la zona de estudio elegida; por lo tanto, se debe seleccionar el tipo de instalación que para efectos del presente proyecto corresponde a *central de generación con Turbina – eólica*, luego una descripción breve del proyecto que puede ser la capacidad instalada del potencial parque eólico, el tipo de

tecnología o el año de construcción, y para completar las opciones se diligencian otros campos como datos de los investigadores y de la ubicación específica del proyecto. En la segunda sección encontramos el punto de referencia que permite observar un comparativo del rendimiento energético, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y los costes de una instalación con otras instalaciones de referencia. El modelo muestra un rango de costos de producción de energía bajo una variedad de condiciones de funcionamiento, costes de instalación y operación, para centrales eléctricas típicas existentes en todo el mundo. Estos costos de producción de energía, incluyen los costos de instalación y funcionamiento conectados a la red eléctrica, pero no incluyen costos de transmisión y distribución (T&D). Para el presente proyecto de investigación fue necesario ubicar en cada zona el costo de producción de energía vs. precio de venta expuesto en las páginas web de las empresas de servicios públicos de cada departamento y realizar el ejercicio en moneda COP para ubicarlo posteriormente en el software en CAD (dólar canadiense). De este modo, es fácil realizar una comparación con los posibles costos de producción en diferentes tecnologías y determinar si un proyecto es potencialmente viable a nivel financiero y justificar una investigación detallada mediante el análisis de viabilidad de RETScreen.

### **Factibilidad**

Esta ruta permite modelar y analizar todos los proyectos con energías limpias donde se puede obtener un completo análisis energético, de costos, de emisiones, financiero, de sensibilidad y riesgo, etc.

### ***Energía***

La hoja de trabajo permite simular el consumo y/o producción de energía de varios tipos de instalaciones, incluyendo medidas y sistemas individuales. Además de la electricidad, se puede especificar otro tipo de combustible a tener en cuenta para el caso base

y los sistemas del caso propuesto. En el caso estudio que propone el proyecto de investigación referente a la tecnología, corresponde a la central de generación eólica por lo que se debe tener en cuenta que los aerogeneradores producen electricidad utilizando la energía cinética (renovable) del viento. El rendimiento energético de un sistema de energía eólica está influido por una serie de factores. Por ejemplo, pueden ser elementos de recurso como la velocidad del viento o la densidad de potencia del viento a la altura del buje, el exponente de cizalladura del viento, la temperatura del aire y la presión atmosférica. Otros factores incluyen elementos de diseño y funcionamiento, como los datos de la capacidad de la potencia y la curva de energía del aerogenerador, la altura del buje, el área de barrido, el número de aerogeneradores, las pérdidas del conjunto, las pérdidas aerodinámicas y la disponibilidad del aerogenerador. El modelo de energía eólica de RETScreen puede utilizarse en todo el mundo para evaluar la producción y el ahorro de energía, los costos, la reducción de emisiones, la viabilidad financiera y el riesgo de los proyectos de energía eólica de red central, de red aislada y de fuera de la red, con un tamaño que va desde parques eólicos multiturbina de gran escala hasta los sistemas híbridos eólico-Diesel de pequeña escala; el programa también incluye enlaces a mapas de recursos de energía eólica.

Se requiere especificar el nivel de análisis que se desea realizar, al seleccionar el “nivel 1” se realiza un análisis simplificado basado en la capacidad de la potencia y el factor de capacidad de los aerogeneradores. El “nivel 2” corresponde a un análisis más detallado basado en los datos climáticos anuales y en los datos de los equipos de los aerogeneradores; en cuanto al “nivel 3” el análisis es aún más detallado basado en los datos climatológicos mensuales y en los datos de los equipos de los aerogeneradores. En esta sección, para el análisis de las tres regiones estudiadas elegimos el nivel 1, puesto que la información de análisis en este nivel era suficiente para la continuidad del proyecto de investigación.

Se ingresa la capacidad de generación eléctrica, la información detallada del tipo de

aerogenerador elegido, el factor de planta que representa la relación entre la potencia media producida por la central eléctrica a lo largo de un año y su capacidad de potencia nominal, para Colombia actualmente se encuentra entre el 20% y 40%.

### ***Costos***

Hay un costo de capital inicial de comprar turbinas eólicas, torres, transporte de materiales, cargo por mano de obra, cargo por experiencia, costos de operación y mantenimiento, etc. electricidad, reduciendo el costo de generación de energía. Hay dos factores principales que afectan el costo de la electricidad generada a partir del viento y por lo tanto su precio final que depende de: (i) factores técnicos, como la velocidad del viento y la naturaleza de las turbinas y (ii) la perspectiva financiera de aquellos que encargan los proyectos, por ejemplo, qué tasa de rendimiento se requiere sobre el capital y el período de tiempo durante el cual se reembolsa el capital. (Loren et al., 2021)

En el software se deben especificar los costos iniciales que incluyen los valores de equipamiento e instalación; según la Asociación Danesa de la industria eólica, los costos de Operación y Mantenimiento son muy bajos cuando las turbinas son nuevas, pero aumentan a medida que la turbina envejece. Los costos de operación y mantenimiento generalmente oscilan entre el 1,5% y el 3% del costo original de la turbina y constituyen al gasto originado para mantener, conservar la función de un activo fijo tangible en su condición normal de operación, y así el modelo calcula la tarifa de electricidad exportada a la red y la electricidad.

Como parte del software de gestión de energía limpia RETScreen, la hoja de trabajo de análisis de costes se utiliza para ayudar a estimar los costes (y los créditos) asociados al caso propuesto. Estos costes se abordan desde el punto de vista del coste inicial, o de inversión, y desde el punto de vista del coste anual, o recurrente. Las instalaciones más rentables de tecnologías renovables, de cogeneración (Energía | Calefacción | Refrigeración) o de eficiencia energética se producen normalmente en las nuevas construcciones. La

segunda instalación más rentable es probablemente la que se realiza en situaciones de readaptación cuando se planea reparar o actualizar un sistema o equipo existente. Sin embargo, es ciertamente posible que los altos costes de refrigeración, calefacción y/o electricidad, o los incentivos financieros, hagan que el caso propuesto sea económicamente atractivo, incluso en situaciones de readaptación que no cumplan los criterios anteriores.

Al preparar el análisis de costes del caso propuesto, es importante tener en cuenta que algunas partidas deben "acreditarse" por los costes de material y mano de obra que se habrían gastado en un sistema "convencional" o de caso base si no se hubiera considerado el sistema del caso propuesto. El usuario determina las partidas de costes iniciales que deben abonarse. Es posible que también se abonen los costes de ingeniería y diseño y otros costes de desarrollo, ya que una parte del tiempo necesario para estas partidas tendría que haberse invertido en el caso base.

Es importante tener en cuenta que la gama de posibles costes enumerados en el manual de usuario de RETScreen no incluye los impuestos sobre las ventas. En varias jurisdicciones, los costes de los proyectos de energía limpia suelen estar exentos de impuestos sobre las ventas. Los desarrolladores del proyecto tendrán que tener en cuenta estos costes para su región cuando preparen sus evaluaciones. Por ejemplo, si en una región concreta el impuesto sobre las ventas es aplicable al coste de un proyecto energético, el usuario deberá añadir el importe del impuesto sobre las ventas al coste del proyecto elegido entre la gama de valores propuesta.

### ***Emissiones***

En este módulo se realiza un análisis de emisiones para estimar el potencial de reducción (mitigación) de las emisiones de gases de efecto invernadero de la instalación propuesta. El primer paso es seleccionar el tipo de análisis preferido, que para este proyecto

de investigación elegimos el nivel 1. Para este nivel, la hoja de trabajo de análisis de reducción de emisiones contiene tres secciones principales: Sistema eléctrico de caso base (Baseline), emisión de GEI e ingresos por reducción de GEI. Las secciones Sistema eléctrico de referencia y Resumen de GEI del sistema de referencia ofrecen una descripción del perfil de emisiones del sistema de referencia. La sección de resumen de GEI del sistema del caso propuesto proporciona una descripción del perfil de emisiones de la instalación propuesta. La sección de resumen de la reducción de las emisiones de GEI proporciona un resumen de la reducción estimada de las emisiones de GEI basada en los datos introducidos por el usuario en las secciones anteriores y permite hacer una equivalencia de la reducción de GEI del proyecto planteado frente a la reducción por una fuente natural (figura 20). Los resultados se calculan en toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> evitadas por año. Los datos introducidos en esta hoja de trabajo no afectarán a los resultados que se comunican en otras hojas de trabajo, excepto los elementos relacionados con los GEI que aparecen en las hojas de trabajo de Análisis Financiero y Análisis de Riesgos.

**Factor de emisión de GEI:** Se debe introducir el factor de emisión de GEI excluyendo las pérdidas de transmisión y distribución (T&D) para el caso base del sistema eléctrico especificado. En el Nivel 1, podemos obtener los factores de emisión de GEI seleccionando un "país - región" y un "tipo de combustible" en las dos celdas adyacentes a la izquierda. Los valores se pueden colocar *manualmente* en la celda.

Cambio de unidades: Podemos elegir expresar el factor de emisión en kgCO<sub>2</sub>/kWh o en tCO<sub>2</sub>/MWh (que son equivalentes).

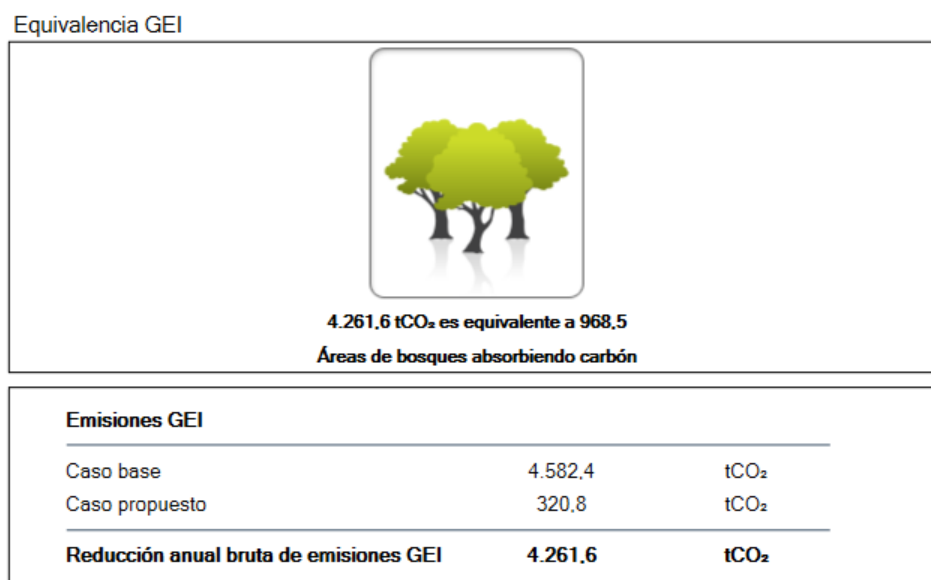
**Pérdidas de T&D:** Colocamos el valor de las pérdidas de transmisión y distribución (T&D) (%) del sistema eléctrico del caso base, que incluye todas las pérdidas de energía entre la central eléctrica y el usuario final. Este valor variará en función de la tensión de las líneas

de transporte, la distancia desde el lugar de producción de energía hasta el punto de uso, el pico de uso de energía y la temperatura ambiente; la calidad también puede influir en las pérdidas.

Las unidades se indican como porcentaje de todas las pérdidas de electricidad respecto a la electricidad generada. Como primera estimación, es razonable suponer unas pérdidas de T&D del 3 al 10% en la mayoría de las redes nacionales.

## Figura 20

### *Ejercicio RETScreen equivalencia GEI – San Andrés*



*Fuente.* (RETScreen, 2022)

## **Finanzas**

Una de las principales ventajas de utilizar el software RETScreen es que facilita el proceso de evaluación del proyecto a los responsables de la toma de decisiones. La hoja de análisis financiero, con sus parámetros financieros de entrada (por ejemplo, tasa de descuento, razón de endeudamiento, etc.), y sus elementos de salida de viabilidad financiera



calculada con base en los elementos de entrada (por ejemplo, tasa interna de retorno (TIR), amortización simple, Valor Actual Neto (VAN), etc.), permite al responsable del proyecto considerar varios parámetros financieros con relativa facilidad. A continuación, se describen estos elementos y se comenta su importancia para el análisis preliminar de viabilidad.

**Nivel 2:** Los elementos introducidos aquí se utilizan para realizar los cálculos en esta hoja de trabajo de análisis financiero. Los valores de cada parámetro dependerán de la perspectiva del usuario u organización interesada en el proyecto, comportamiento de la economía, entre otras variables que pueden estar relacionadas con la naturaleza de la empresa y su actividad económica.

### **Información básica**

**Tasa de aumento del coste del combustible:** Se coloca la tasa de aumento de los costes de combustible (%), que es la tasa media anual proyectada de aumento de los costes de combustible del caso base y del caso propuesto durante la vida del proyecto. Esto permite aplicar tasas de inflación a los costes de combustible, que pueden ser diferentes de la inflación general. Por ejemplo, en Sur América, las tasas de aumento de los costes de combustible a largo plazo oscilan entre el 0 y el 5%, siendo los valores más comunes entre el 2 y el 3%.

**Tasa de inflación:** Se presenta la tasa de inflación (%), que es la tasa media anual de inflación prevista durante la vida del proyecto. Por ejemplo, actualmente se prevé que la inflación para los próximos años en Colombia oscile entre el 4% y el 8%. (INDEC, 2022)

**Tasa de descuento:** Se coloca el tipo de descuento (%), que es el tipo utilizado para descontar los flujos de caja futuros con el fin de obtener su valor actual. El tipo que se considera más adecuado es el coste medio ponderado del capital de una organización. El coste de capital de una organización no es simplemente el tipo de interés que debe pagar por

la deuda a largo plazo. Más bien, el coste del capital es un concepto amplio que implica una mezcla de los costes de todas las fuentes de fondos de inversión, tanto de deuda como de capital. La tasa de descuento utilizada para evaluar la viabilidad financiera de un determinado proyecto se denomina a veces "tasa crítica de rentabilidad", "tasa de corte" o "tasa de rendimiento requerida". El modelo también utiliza la tasa de descuento para calcular la Tasa Interna de Rendimiento Modificada (MIRR) y el ahorro anual del ciclo de vida. Al calcular la MIRR, se supone que los flujos de caja negativos se financian al tipo de descuento.

**Tasa de reinversión:** Se introduce la tasa de reinversión (%), que es la tasa utilizada para reinvertir los futuros flujos de caja positivos con el fin de calcular la tasa interna de rendimiento modificada (TIR). Por ejemplo, las tasas de reinversión típicas pueden oscilar entre el 1 y el 18%.

**Vida del proyecto:** Se debe establecer la vida del proyecto (año), que es la duración durante la cual se evalúa la viabilidad financiera del proyecto. Dependiendo de las circunstancias, puede corresponder a la esperanza de vida de los equipos relacionados con la energía, al plazo de la deuda o a la duración de un acuerdo de compra de energía.

## **Datos Financieros**

**Incentivos y subvenciones:** Se determina el incentivo financiero; se trata de cualquier contribución, subvención, subsidio, etc. que se paga por el coste inicial (excluyendo los créditos) del proyecto. En el modelo, se considera que el incentivo no es reembolsable y se trata como ingreso durante el año de desarrollo/construcción, el año 0, a efectos del impuesto sobre la renta. Si un incentivo se paga a lo largo de varios años, puede introducirse en la sección Otros ingresos (costes).

**Razón de endeudamiento:** Se expone el coeficiente de endeudamiento (%), que es la relación entre la deuda y la suma de la deuda y los fondos propios de un proyecto. La razón

de endeudamiento refleja el apalancamiento financiero creado para un proyecto; cuanto mayor sea la razón de endeudamiento, mayor será el apalancamiento financiero. El modelo utiliza la razón de endeudamiento para calcular la inversión en capital que se necesita para financiar el proyecto. Por ejemplo, los coeficientes de endeudamiento suelen oscilar entre el 0 y el 90%, siendo los más habituales entre el 50 y el 90%. Tener en cuenta que no se puede introducir un valor superior al 100%.

**Deuda:** El modelo calcula la deuda del proyecto, que es la parte de la inversión total necesaria para realizar el proyecto y que se financia con un préstamo. La deuda del proyecto permite calcular los pagos de la deuda y el valor actual neto. Se calcula utilizando los costes iniciales totales y los fondos propios.

**Fondos propios:** El modelo calcula el capital del proyecto, que es la parte de la inversión total necesaria para financiar el proyecto que es financiada directamente por el propietario o propietarios de la instalación. El capital del proyecto se considera desembolsado al final del año 0, es decir, el año de desarrollo/construcción. Se calcula utilizando los costes iniciales totales y el coeficiente de endeudamiento.

**Tipo de interés de la deuda:** Se introduce el tipo de interés de la deuda (%), que es el tipo de interés anual que se paga al titular de la deuda al final de cada año del plazo de la misma. El modelo utiliza el tipo de interés de la deuda para calcular los pagos de la misma. Por ejemplo, como mínimo, el tipo de interés de la deuda corresponderá al rendimiento de los bonos del Estado con el mismo plazo que el de la deuda. Normalmente se añade una prima a este tipo (el "diferencial") para reflejar el riesgo percibido del proyecto.

**Plazo de la deuda:** Se incluye el plazo de la deuda (año), que es el número de años en los que se amortiza la deuda. El plazo de la deuda es igual o más corto que la vida del proyecto. En general, cuanto más largo sea el plazo, mejora la viabilidad financiera de un

proyecto energético. El modelo utiliza el plazo de la deuda para calcular los pagos de la misma y los flujos de caja anuales. El plazo de la deuda suele estar comprendido entre 1 y 25 años. No debe superar la vida estimada del proyecto.

***Pago de la deuda:*** El modelo calcula los pagos anuales de la deuda, que es la suma del principal y los intereses pagados anualmente para el servicio de la deuda. Mientras que los pagos de la deuda son constantes a lo largo del plazo de la misma, la parte del principal aumenta y la de los intereses disminuye con el tiempo. En este sentido, es similar a la anualidad que se paga para reembolsar la hipoteca de una casa. Los pagos de la deuda se calculan utilizando el tipo de interés de la deuda, el plazo de la deuda y la deuda.

***Análisis del impuesto sobre la renta:*** En algunas situaciones, la rentabilidad después de impuestos de un proyecto puede ser más atractiva que su rentabilidad antes de impuestos. El análisis del impuesto sobre la renta permite al modelo calcular los flujos de caja después de impuestos y los indicadores financieros después de impuestos. En todos los casos, el modelo supone un único tipo de impuesto sobre la renta válido durante toda la vida del proyecto y aplicado a los ingresos netos. Hay que tener en cuenta que el análisis se basa, entre otros, en los costes netos iniciales y anuales, es decir, que los créditos introducidos en la hoja de trabajo de análisis de costes para estas dos categorías no se tratan por separado. Esto conduce a un análisis fiscal razonablemente exacto, a menos que los créditos iniciales y/o anuales sean del mismo orden de magnitud que los costes correspondientes y entren en un calendario de amortización diferente a efectos fiscales.

### **Viabilidad del proyecto**

***Valor Presente Neto (VPN):*** El VPN se calcula, pues, en un momento 0 que corresponde a la unión del final del año 0 y el principio del año 1. Según el método del VPN, el valor presente de todas las entradas de efectivo se compara con el valor actual de todas las

salidas de efectivo asociadas a un proyecto de inversión. El modelo calcula el VPN utilizando los flujos de caja acumulados después de impuestos. En los casos en los que el usuario haya elegido no realizar un análisis fiscal, el VPN calculado será el de los flujos de caja antes de impuestos.

**Relación beneficio-coste (B-C):** El modelo calcula la relación beneficio-coste (B-C), que es la relación entre los beneficios netos y los costes del proyecto. Los beneficios netos representan el valor actual de los ingresos y ahorros anuales menos los costes anuales, mientras que el coste se define como los fondos propios del proyecto. La razón debe ser superior a 1 como indicativo de proyectos rentables. La razón beneficios netos-coste, similar al índice de rentabilidad, lleva a la misma conclusión que el indicador de valor actual neto.

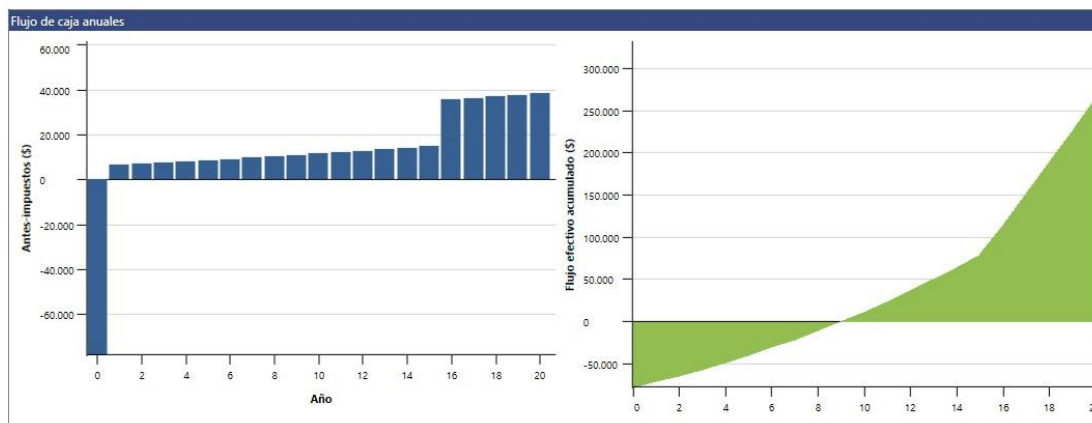
**Coste de producción de energía:** El modelo calcula el coste de producción de energía (electricidad) por kWh (o MWh). En el caso de las centrales eléctricas, este valor, también llamado Coste Nivelado de la Electricidad (LCOE) representa la tasa de exportación de electricidad necesaria para que el valor presente neto (VPN) sea igual a 0. Los ingresos por reducción de GEI, los otros ingresos (costes) y los ingresos por producción de energía limpia (EC) no se incluyen en este cálculo.

**Ahorro anual del ciclo de vida:** El modelo calcula el ahorro anual del ciclo de vida, que es el ahorro nominal anual nivelado que tiene exactamente la misma vida y valor actual neto que el proyecto. El ahorro anual del ciclo de vida se calcula utilizando el valor actual neto, la tasa de descuento y la vida del proyecto.

**Gráfico de flujos de caja anuales:** El usuario indica si se trazan o no los gráficos de flujos de caja anuales y acumulados. Estos flujos de caja a lo largo de la vida del proyecto se calculan en el modelo y se presentan en la tabla de flujos de caja anuales. Véase fig. 21

## Figura 21

### Ejercicio RETScreen flujos de caja Anual



Fuente. (RETScreen, 2022)

## Análisis de Sensibilidad y Riesgo

En esta sección se puede estimar la sensibilidad de los indicadores financieros importantes en relación con los parámetros técnicos y financieros clave. Esta hoja de trabajo estándar de análisis de sensibilidad y riesgo contiene dos secciones principales: Análisis de sensibilidad y Análisis de riesgo. Cada sección proporciona información sobre la relación entre los parámetros clave y los indicadores financieros importantes, mostrando los parámetros que tienen mayor impacto en los indicadores financieros. La sección de análisis de sensibilidad está destinada a un uso general, mientras que la sección de análisis de riesgo, que realiza una simulación de Monte Carlo, está destinada a usuarios con conocimientos de estadística. Ambos tipos de análisis son opcionales. Los datos introducidos en esta hoja de trabajo no afectarán a los resultados de otras hojas de trabajo.

**Paso 1 - Tipo de análisis:** Se debe marcar la casilla si se utiliza o no la sección opcional de análisis de sensibilidad para realizar un análisis de sensibilidad de los indicadores financieros importantes. También se necesita indicar marcando la casilla si se utiliza o no la sección opcional de análisis de riesgo para realizar un análisis de riesgo de los indicadores

financieros importantes. En la sección de análisis de riesgo, el impacto de cada parámetro de entrada sobre un indicador financiero se obtiene aplicando una regresión lineal múltiple estandarizada sobre el indicador financiero.

### **Análisis de Sensibilidad**

Esta sección presenta los resultados del análisis de sensibilidad. Cada tabla muestra lo que ocurre con el indicador financiero seleccionado (por ejemplo, TIR después de impuestos - fondos propios) cuando dos parámetros clave (por ejemplo, costes iniciales y O&M) se varían en los porcentajes indicados. El usuario indica en la lista desplegable qué parámetros se variarán conjuntamente. Los parámetros se varían utilizando la fracción seleccionada del rango de sensibilidad (por ejemplo, -1, -1/2, 0, 1/2, 1). Los valores originales (que aparecen en la hoja de trabajo del análisis financiero) aparecen en negrita en estas tablas de resultados del análisis de sensibilidad. Los resultados que indican un proyecto inviable, tal y como se define en el Umbral del usuario, aparecerán como celdas naranjas en estas tablas de resultados del análisis de sensibilidad (figura 22). Todos los valores de los parámetros utilizados para los cálculos se toman de la hoja de trabajo de Análisis Financiero y todas las variaciones de sensibilidad se evalúan a nivel de esa hoja de trabajo.

### **Figura 22**

#### *Ejercicio RETScreen Análisis de Sensibilidad*

Costo de combustible - caso base		Costos iniciales				
\$		195.043	227.550	260.057	292.564	325.071
54.907	-25,0%	> proyecto	> proyecto	> proyecto	> proyecto	> proyecto
64.059	-12,5%	13,4	16,5	18,5	> proyecto	> proyecto
73.210	0,0%	4,7	6,5	<b>9,0</b>	12,3	15,4
82.361	12,5%	2,7	3,6	4,6	5,8	7,4
91.512	25,0%	1,9	2,4	3,0	3,7	4,5

Fuente. (RETScreen, 2022)

### ***Análisis de Riesgo***

Esta sección permite al usuario realizar un análisis de riesgo especificando la incertidumbre asociada a una serie de parámetros de entrada clave y evaluar el impacto de esta incertidumbre en la TIR - patrimonio neto antes de impuestos, la TIR - activos antes de impuestos, la TIR - patrimonio neto después de impuestos, la TIR - activos después de impuestos, la amortización del patrimonio neto, el valor actual neto (VAN), el coste de producción de energía o el coste de reducción de GEI. En la sección de análisis de riesgos, el impacto de cada parámetro de entrada sobre un indicador financiero se obtiene aplicando una regresión lineal múltiple estandarizada sobre el indicador financiero.

El análisis de riesgo se realiza mediante una simulación de Monte Carlo que incluye entre 500 y 5.000 combinaciones posibles de variables de entrada que dan lugar a entre 500 y 5.000 valores de TIR antes y después de impuestos - patrimonio, TIR antes y después de impuestos - activos, amortización del patrimonio, valor actual neto (VAN) o coste de producción de energía. El análisis de riesgo permite al usuario evaluar si la variabilidad del indicador financiero es aceptable o no, observando la distribución de los posibles resultados. Una variabilidad inaceptable será un indicio de la necesidad de realizar un mayor esfuerzo para reducir la incertidumbre asociada a los parámetros de entrada que se identificaron como de mayor impacto en el indicador financiero.

### **Rendimiento**

En este módulo se proporciona un análisis de desempeño para facilitar el monitoreo, análisis y la información de los datos clave del desempeño energético; en colaboración de diferentes entidades RETScreen desarrolló este módulo que integra casi en tiempo real todos los datos meteorológicos obtenidos de los satélites de la NASA y se puede utilizar en todo el mundo para controlar el desempeño energético real de una instalación.



## Resultados y discusión – Estudio de caso

### Prefactibilidad

Iniciamos en el software RETScreen Expert con el punto de referencia para definir la ubicación e instalación de potenciales proyectos eólicos a través de la función *analizador de energía virtual* que permite hacer un modelado de energía remoto para hacer un análisis de prefactibilidad inmediato o una auditoria preliminar de las zonas de estudio con el fin de obtener una idea básica frente a la viabilidad del proyecto y determinar la continuidad a las siguientes etapas o de ser necesario realizar los ajustes correspondientes.

Realizamos la verificación de los datos arrojados para zonas específicas en cada departamento a estudiar, tal como el corregimiento de Galerazamba en Bolívar, Sector de San Luis en San Andrés, y Ocaña en Norte de Santander, se observa que el software relaciona en algunos campos información generalizada para el tipo de instalación proyectada; por ello, inicialmente determinamos con soporte bibliográfico los datos reales para el contexto de cada región, información que se expone en las siguientes etapas del proceso.

### Ubicación – Punto de Referencia

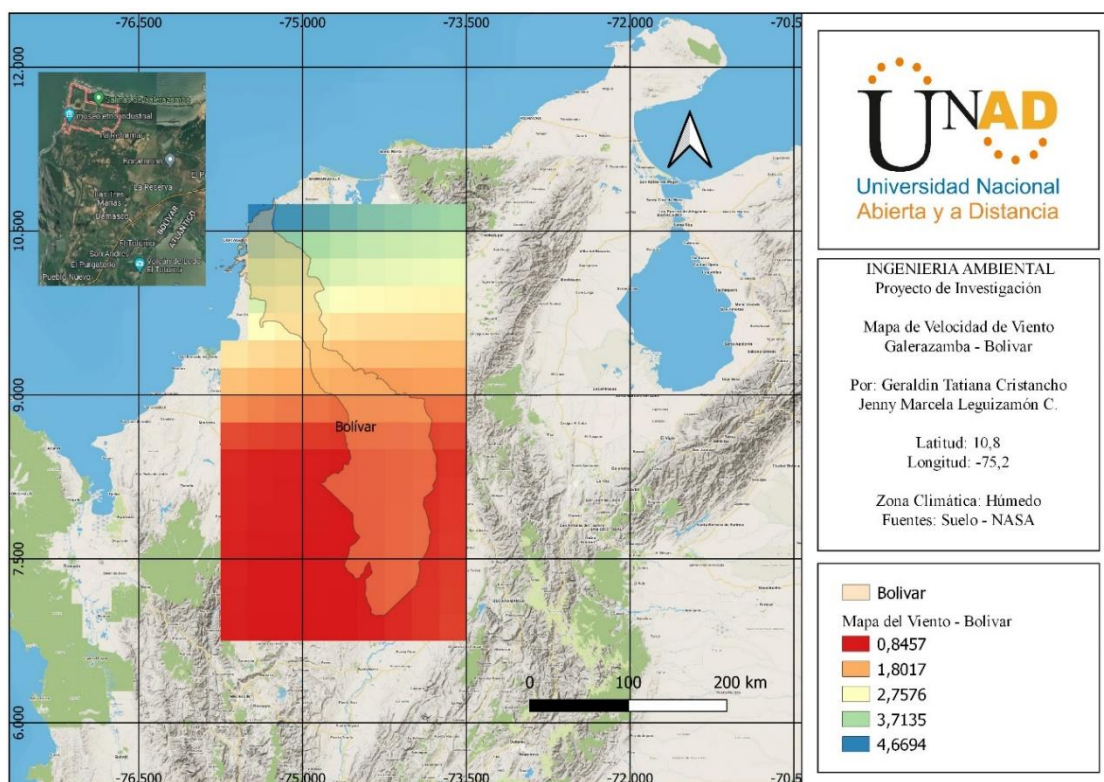
#### *Galerazamba - Bolívar*

Desde el contenido online de *Giovanni NASA* para Bolívar se descargaron los datos base frente a la velocidad del viento y posteriormente estos datos fueron procesados a través de la herramienta QGis donde obtuvimos el mapa del departamento con las variaciones de vientos que aumentan hacia la zona costera y reducen notablemente hacia el centro del país. (Véase Fig. 23). Galerazamba es un corregimiento del municipio de Santa Catalina que está situado al norte del departamento de Bolívar, coordenadas: Latitud: 10.0° 47.0' N; Longitud: 75.0° 15.0' W y posee una elevación de 6 metros sobre el nivel del mar, cuenta con una población aproximada de 2000 habitantes, presenta una topografía plana, con ligeras

pendientes hacia el noroeste en la parte costera sobre el litoral caribe, aptas para la explotación pesquera, salinera y turística, además es conocida por sus salinas rosadas, llamadas el mar rosado de Colombia. Desafortunadamente en este lugar los servicios públicos como alcantarillado y acueducto son muy deficientes, al igual que el fluido eléctrico, que se caracterizan por ser muy inestable. (Colombia, 2021)

### Figura 23

*Mapa velocidad del viento Bolívar, agosto 2022*



*Fuente. Autoría propia*

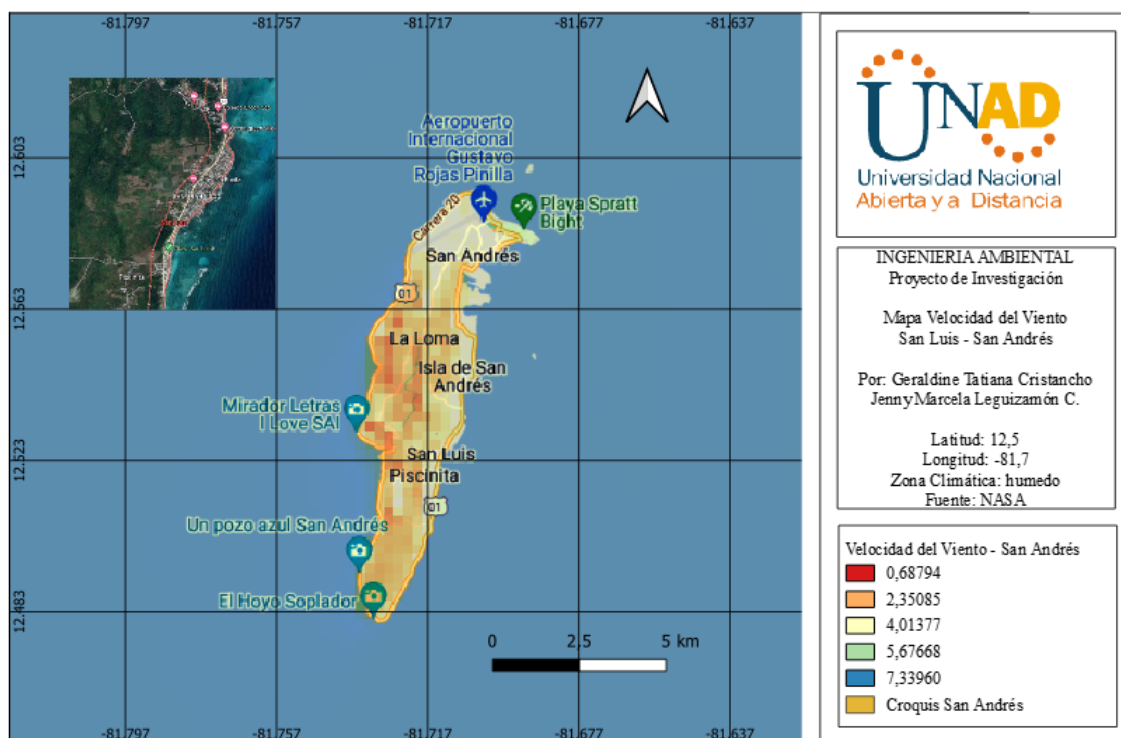
### *San Luis – San Andrés*

Por medio de datos obtenidos desde el *Atlas Mundial del Viento* para la región de San Andrés procesamos a través de la herramienta QGis la ubicación de la zona a estudiar, exponiendo así mismo el mapa del viento para el mes actual, agosto 2022. San Luis se

localiza en el costado oriental de la isla, está situado a  $13^{\circ} 31' 57.02''$  latitud norte y  $81^{\circ} 42' 44.86''$  longitud Oeste, la temperatura promedio es de  $27^{\circ}\text{C}$  y viento del SE a  $8\text{km/h}$ , humedad del 87%. Es un caserío habitado por nativos de San Andrés, Colombia en el que las viviendas de madera conservan la colorida arquitectura típica antillana.

## Figura 24

*Mapa velocidad del viento San Andrés, agosto 2022*



*Fuente. Autoría propia*

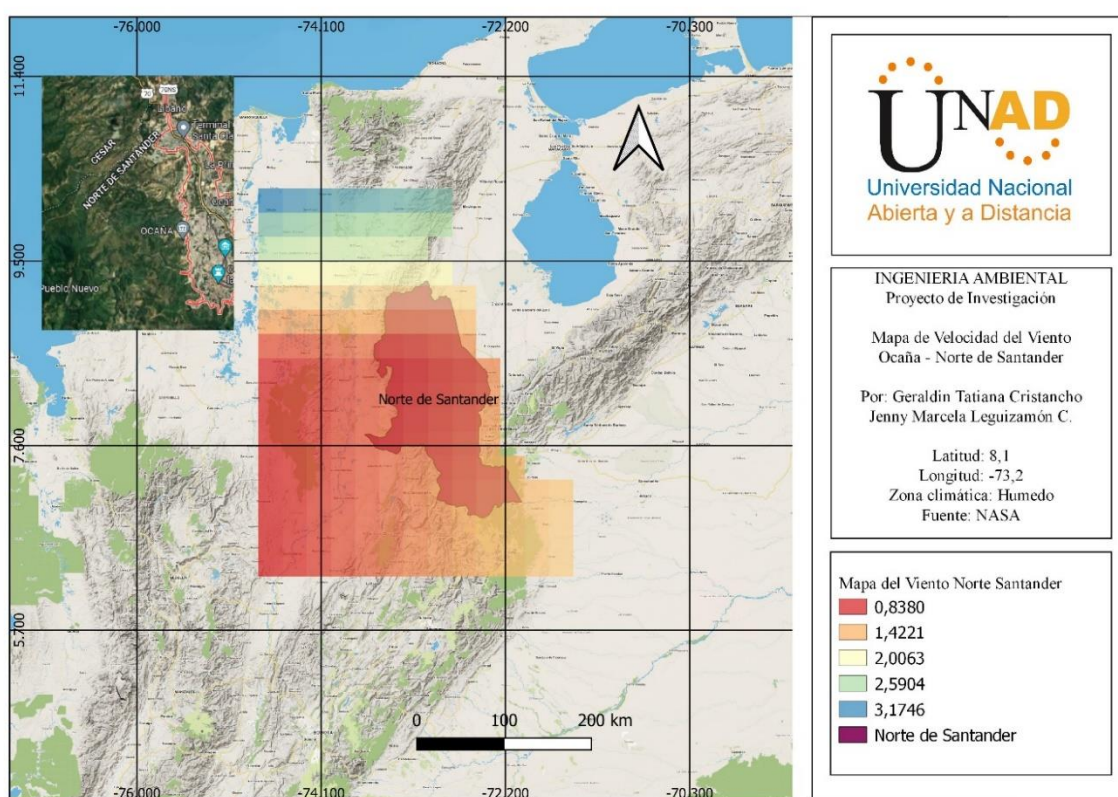
## *Ocaña – Norte de Santander*

En base a los datos de velocidad del viento obtenidos desde el portal de *Giovanni NASA* procesamos a través de la herramienta QGIS para obtener el mapa de la zona que encontramos en la figura 25. Ocaña es un municipio colombiano ubicado en la zona occidental del departamento de Norte de Santander sobre la cordillera Oriental, es la segunda ciudad del departamento, según las proyecciones del DANE tiene aproximadamente 100.000 habitantes y

está situado a  $8^{\circ} 14' 15''$  Latitud Norte y  $73^{\circ} 2' 26''$  longitud Oeste, su altura sobre el nivel del mar es de 1.202 m y la superficie del municipio es 463km, los cuales representan 2,2% del departamento. La temperatura promedio es de  $22^{\circ}$ . C y presenta precipitaciones entre 800 y 2.500mm anuales.

### Figura 25

*Mapa velocidad del viento Norte de Santander, agosto 2022*



*Fuente. Autoría propia*

### **Análisis de Instalación y Factibilidad**

Para realizar la simulación en RETScreen definimos la ubicación de la posible instalación del parque eólico, tal como se relaciona en la figura 27. Los datos con los que trabaja RETScreen son medidos a una distancia de 10m sobre el suelo. Estos datos meteorológicos tienen fuentes satélites de la NASA y estaciones en Suelo, de la estación

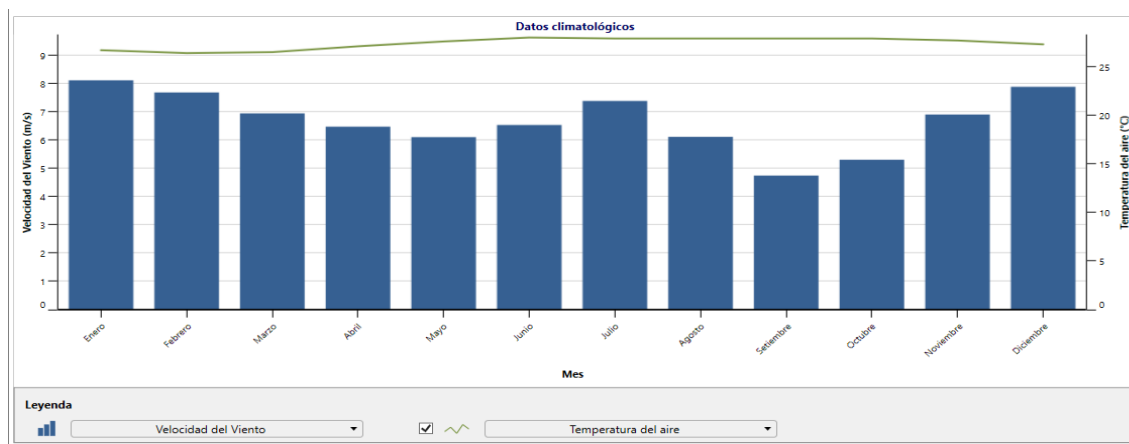
meteorológica más cercana, que crean una tabla con parámetros como la temperatura del aire, la del suelo, la humedad relativa, velocidad del viento y la radiación solar, proporcionando valores tanto anuales como mensuales.

**Velocidad del viento:** Para conocer el primer factor determinante frente a la factibilidad del proyecto eólico en cada departamento analizamos las variables *velocidad del viento* (m/s) y *temperatura del aire* (°C) que se conectan; en el caso del corregimiento de Galerazamba, Bolívar se evidencian datos relacionados proporcionalmente, pues por encima de los 20°C tenemos los meses de enero a abril con mayor velocidad del viento que están respectivamente por encima de los 3 m/s. Así mismo, los meses que presentan velocidades del viento sobre los 2 m/s están en una temperatura del aire por debajo de 15°C. Entonces para una temporada de 12 meses tenemos un promedio de 2,7 m/s de velocidad del viento anual. Cabe resaltar que, en estudios anteriores, Galerazamba tiene un potencial eólico por encima de lo que arroja el software utilizado en este proyecto, tal como lo relaciona el estudio del Atlas del viento 2006 (UPME, 2006) en donde indica un promedio de 5,9 m/s; otro estudio reportado por (Ricardo & Venecia, 2011) arrojó datos en velocidad del viento promedio de 5,2 m/s y exponía el sector como una promesa para el desarrollo de proyectos eólicos; sin embargo, a la fecha no registra el desarrollo de algún proyecto.

Por otra parte, San Andrés está entre los 16 lugares de Colombia con mayor intensidad del viento lo cual indica que es factible instalar y aprovechar este recurso, el corregimiento de San Luis como muestra la figura 26 presenta velocidades persistentes y superiores a los 4 m/s, se observa que el mes con mayor velocidad del viento es enero con 8m/s y oscila entre 20° a 25° y el mes con menos velocidad del viento es septiembre que estaría en promedio de 4 a 5 m/s y con una temperatura de aire de aproximadamente 15° C, estos datos son medidos a 10m respecto al suelo, entonces el promedio anual del viento nos arroja en 6,7 m/s.

## Figura 26

*Representación de la variación mensual velocidad del viento vs. temperatura en la región de San Luis – San Andrés*



*Fuente.* (RETSscreen, 2022)

Una importante característica que se aprecia en el gráfico es que no existe probabilidad del viento de cero (0). Esto es debido a que la forma matemática de la función de distribución de Weibull asigna una probabilidad de cero cuando no hay ocurrencia del fenómeno. (Viogiatzis & Torr, 2004)

Respecto al municipio de Ocaña – Norte de Santander tenemos que están al margen de los 18°C los meses de enero a marzo con mayor velocidad del viento en un promedio de 2,2 m/s que se va reduciendo gradualmente el resto del año, con un pequeño incremento sobre diciembre de 1,8 m/s, para lo que tenemos un promedio anual final de 1,6 m/s en velocidad del viento para esta zona. Sin embargo, al igual que Bolívar, el estudio del Atlas del viento en 2006 arrojó valores cercanos a los 3,3 m/s.

## Instalación

### *Especificaciones del aerogenerador seleccionado*

**Tabla 2**

### *Especificaciones del aerogenerador seleccionado*

<b>Modelo del aerogenerador</b>	<b>Nordex 1300 kW</b>
Potencia Nominal (kW)	1300
Altura del buje (m)	60
Diámetro del rotor (m)	60
Área del barrido ( $m^2$ )	2828
Número de palas	3
Velocidad de conexión (m/s)	3
Velocidad nominal (m/s)	15
Velocidad de corte (m/s)	25
Precio (\$ COP)	1.952.797.200

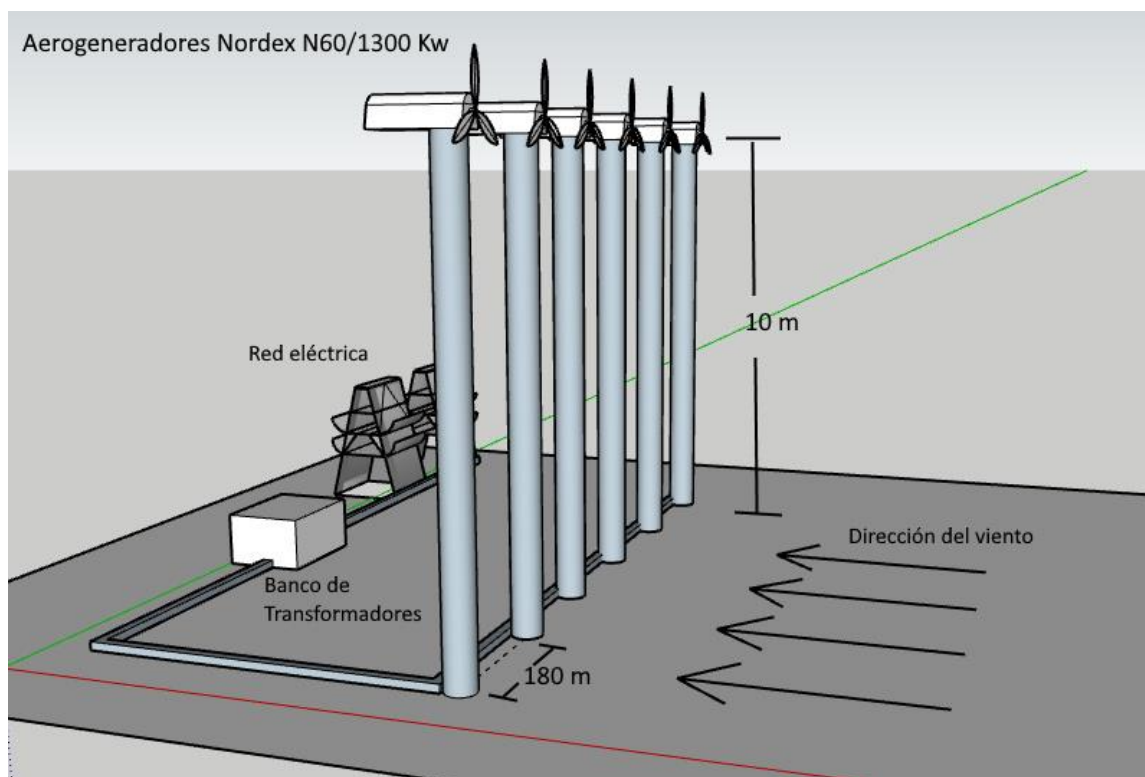
*Fuente:* (Ricardo & Venecia, 2011)

### *Esquematización del modelo eólico propuesto*

Se pueden elegir diferentes modelos profesionales a largo plazo para realizar un análisis de viabilidad técnica y financiera de proyectos energéticos potenciales. De hecho, el procedimiento de selección depende principalmente de muchos factores, como los datos de entrada disponibles, la posibilidad de acceder libremente y la complejidad del sistema. En general, las FER, incluidos los proyectos de parques eólicos, hasta ahora han sido fácilmente aplicables para el nivel en la red, incluidos los sistemas eólicos de red central y de red aislada. En este trabajo, la aplicabilidad de la red del parque eólico propuesto se investiga y se muestra en la Figura 27 que propone un área de 4,2 ha. Por lo tanto, siempre se debe aplicar y requerir una metodología precisa que comprenda un análisis en profundidad de los beneficios.

**Figura 27**

*Esquematación del sistema eólico propuesto*



*Fuente.* Autoría propia

De hecho, en la actualidad, existen varios modelos disponibles para realizar un análisis de viabilidad técnica y financiera de proyectos energéticos potenciales. Se elige RETScreen, una herramienta de concientización sobre energía limpia, apoyo a la toma de decisiones y desarrollo de capacidades. RETScreen utiliza un sistema computarizado con algoritmos matemáticos integrados y un enfoque de arriba a abajo. La herramienta de energía RETScreen requiere información menos detallada y menos potencia computacional (CANMET, 1996). Por ejemplo, otros modelos como HOMER, PLEXOS y Energy PLAN, usan una distribución horaria durante un período de año completo que requiere (8760-8784) valores individuales, mientras que RETScreen Expert usa los valores mensuales promedio o anuales. Para cerrar las brechas en la implementación de tecnología de energía limpia,



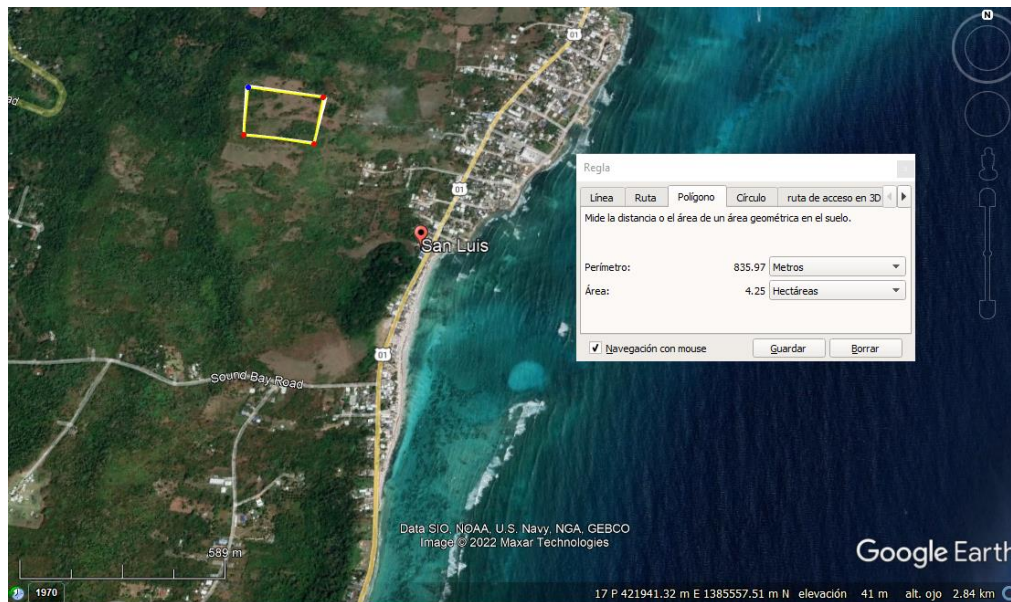
especialmente en la etapa de viabilidad preliminar, se mejoraron las últimas características del modelo RETScreen Expert 8 y se puede analizar rápidamente la viabilidad de múltiples opciones de plantas de energía eólica (escenarios), en condiciones reales del sitio que conducen a generar el menor coste posible combinando diferentes aerogeneradores y tecnologías.

### ***Factibilidad***

Se evaluó la factibilidad del parque eólico para las regiones de San Luis – San Andrés, Galerazamba – Bolívar y Ocaña – Norte de Santander, de acuerdo al esquema registrado en la figura 27, con una capacidad instalada de 7,8 MW a través de 6 aerogeneradores de 1.300 kW c/u que producirá anualmente 22.548 MWh de electricidad exportada a la red en cada parque eólico propuesto. Para ello se seleccionó el aerogenerador Nordex N60/1300 pues se tuvo en cuenta su potencial nominal, la trayectoria de la marca fabricante y el costo de kWh de energía instalada, sobre el cual se realizó una evaluación económica y ambiental. Los aerogeneradores están compuestos por un rotor de 60m de diámetro y un generador instalado sobre torre de 10m de altura, la distribución se realiza en “*filas alineadas*” con dirección al Noreste y una distancia entre cada aerogenerador de 180m, por lo que se determinó que el espacio requerido para su implementación debe tener un área de 4,25 ha distribuidas en un polígono de 861,76m de perímetro como se puede observar en las figuras 28, 29 y 30 respectivamente, medida desde la herramienta Google Earth. Cabe resaltar que las familias que se beneficiarían de cada proyecto eólico en los diferentes departamentos serían aproximadamente 15.400 sobre un factor de capacidad de 33%.

**Figura 28**

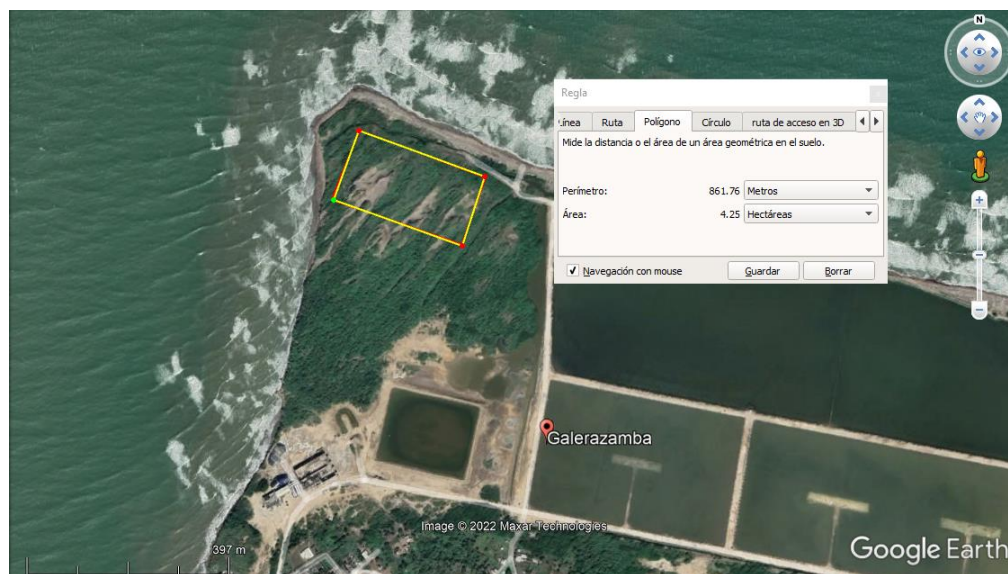
*Área de montaje potencial parque eólico en San Luis – San Andrés*



*Fuente. Google Earth, 2022*

**Figura 29**

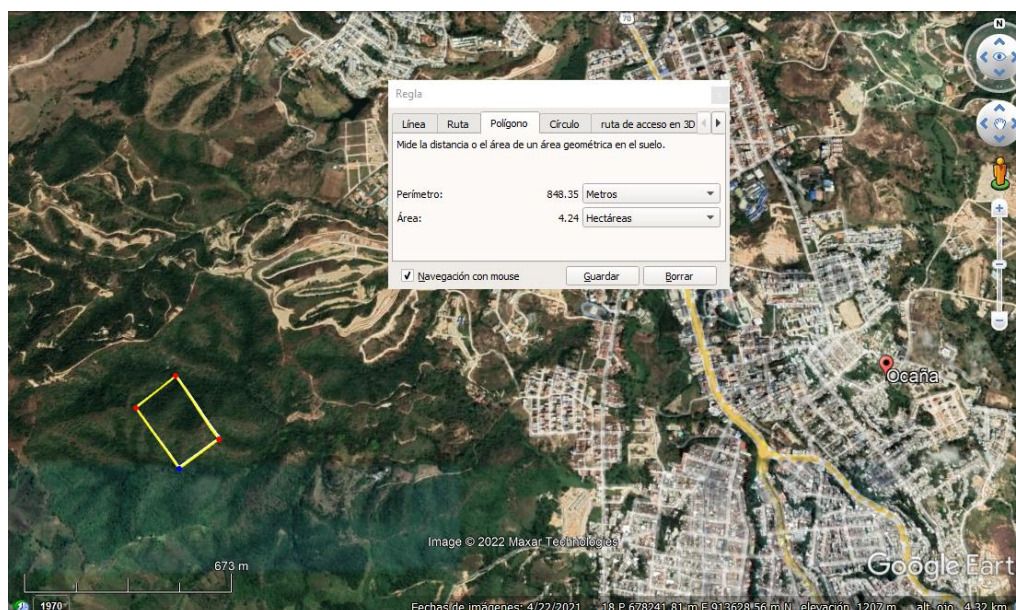
*Área de montaje potencial parque eólico en Galerazamba – Bolívar*



*Fuente. Google Earth, 2022*

**Figura 30**

*Área de montaje potencial parque eólico en Ocaña – Norte de Santander*



*Fuente.* Google Earth, 2022

## Evaluación Financiera

Algunos de los parámetros financieros considerados en la simulación fueron ubicados de acuerdo a los valores reportados por RETScreen tales como, la relación de la deuda y tasa de reinversión. Otros en su mayoría fueron ubicados manualmente con datos de fuentes bibliográficas aplicados para Colombia, según el **LCOE** (Costo nivelado de la electricidad, por sus siglas en inglés) correspondiente a la valoración económica del costo del sistema de generación de electricidad que incluye todos los costos a lo largo de la vida útil del proyecto que desglosaremos a continuación: la inversión inicial, operación y mantenimiento, el costo de producción y costo de venta, entre otros. (Hernández, 2015)

**Costo de Producción:** Con el fin de tener un análisis basado en datos reales y actuales de los que se dispone, se ha modificado el valor en base al costo de producción de energía, que según (Padinger, 2021) para Colombia está en 532,07 COP/kWh, lo que para efectos de

ingresar datos al software estamos hablando de 0,16 CAD/kWh, el cual se ingresa en dólares canadienses pues la versión libre de este software no incluye la opción del cambio a la moneda local del lugar relacionado en el proyecto.

**Costo de Venta:** Este valor en el software hace referencia a la “tarifa de exportación” (Linderman, 2018), la cual utilizamos para definir los costos de operación y mantenimiento y que para el presente proyecto de investigación hemos utilizado los valores de las empresas de servicios públicos de cada departamento a agosto 2022:

**San Andrés:** Encontramos un costo de venta en 0,33 CAD según la empresa de Servicios Públicos Sociedad Productora de Energía de San Andrés y Providencia (SOPESA, 2022); ya que el costo unitario de (\$/kWh) está en 1113,54 COP.

**Bolívar:** Según datos de (Afinia, 2022) el costo unitario calculado aumentó en 2,16% estableciendo un valor por \$/kWh de 898,48 COP, es decir que en RETScreen registramos para esta zona un costo de venta por 0,27 CAD.

**Norte de Santander:** De acuerdo a los registros de Centrales Eléctricas de Norte de Santander (CENS, 2022) la tarifa de energía en el mercado regulado es de 850,3 CP/kWh, equivalentes 0,26 CAD/kWh.

Esta fase del análisis también permite comparar los costes de producción de energía en \$/kWh de las diferentes tecnologías de generación para unas determinadas condiciones de financiación y operación. Para ello, se ubicó el punto de referencia en el mapa de la herramienta. (Dávila Martín et al., 2019).

**Costos Iniciales:** CAPEX: Total de la inversión de capital. Representan la suma del estudio de factibilidad, desarrollo, ingeniería, sistema eléctrico de potencia y balance del sistema; que para este caso nos apoyamos en los estudios realizados en el año 2021 para la instalación del parque Guajira 1 con una inversión inicial superior a los 75.000 millones de

pesos para una capacidad instalada de 20MW (LaRepública, 2022), y a partir del estudio sobre las estrategias para el desarrollo de proyectos eólicos en Albania (Loren et al., 2021) con su estudio de caso que propone una capacidad instalada de 27MW y un costo inicial de 187.316 millones COP, que nos permitió definir unos costos iniciales por cada proyecto instalado sobre 40.436 millones COP, que corresponden a 12.378.600 CAD.

**Costos de Operación y Mantenimiento:** OPEX: gastos operativos. Corresponden a la diferencia entre el costo de generación de energía por kWh vs. el costo de venta por kWh de cada departamento, este % se aplica a los ingresos y ahorros anuales totales del proyecto; teniendo en cuenta que los costos de operación y mantenimiento son los gastos necesarios para que un proyecto pueda ser aplicado (FAO, 2022). Entonces tenemos:

**Tabla 3.**

*Costos de Operación y Mantenimiento para proyecto eólico propuesto en cada región*

<b>Región</b>	<b>Costo Producción VOP/kWh</b>	<b>Costo Venta (COP/KwH)</b>	<b>% O y M</b>	<b>Ingresos y ahorros anuales totales (COP)</b>	<b>Costos O y M anuales (COP)</b>
San Andrés	532,07	1.113,54	48%	11.997.142.459	5.656.533.706
Bolívar		898,48	59%		6.956.007.665
Nte. Santander		850,3	62%		7.312.726.007

*Fuente.* Autoría propia

**Pérdidas de Transmisión y Distribución:** Tomamos el dato que aconseja el software del 7% pues vemos que la tendencia de participación en el nivel de pérdidas de energía ha ido decreciendo según XM para 2003 tenía un 25% de participación, luego 2004 con 24%, 2005 con 21, 2006 con 18% y el último reporte lo tenemos con indicadores del Banco Mundial con un 11% según (AIE, 2014).

**Tasa de escalamiento de exportación de electricidad:** De acuerdo a la UPME las posibilidades de Colombia para exportar electricidad están un poco restringidas debido a la recesión en Venezuela y al bajo crecimiento de los países socio-comerciales vecinos como Perú y Ecuador, por lo tanto, se estima un 4% para la tasa de escalamiento, de acuerdo al reporte del Plan Energético Nacional de Colombia: ideario 2050 (UPME, 2015).

**Tasa de inflación:** El Índice de Precios al Consumidor (IPC) para 2022 en Colombia registra con una inflación de 10,84% siendo este el 100% de la participación que tienen las diferentes divisiones tales como bienes y servicios, alimentos y bebidas, transporte, salud, entre otras; y en donde el grupo de electricidad, gas y otros combustibles tiene su contribución con un 7,6% (DANE, 2022).

**Tasa de descuento:** El artículo 1 de la Resolución CREG 025 de 2020 estableció los valores de la tasa de descuento donde se espera que para el 2022 en adelante se aplique un 11,82% (CREG, 2022)

**Relación de la deuda:** Corresponde al porcentaje del costo inicial solicitado como préstamo, el cual será de un 70%, con el escenario de fondos propios de los departamentos en un 30%.

**Tasa de interés:** Según el Banco Mundial la Tasa de Interés activa (%) para Colombia al año 2021 corresponde a 9,3% (FMI, 2021).

## **Variables**

Para esta sección elegimos el nivel 2 que desglosa la información financiera incluyendo la tasa de escalamiento de exportación de electricidad. Por tanto, relacionamos los parámetros financieros generales aplicables a los parques eólicos de cada región de acuerdo a lo expuesto en la tabla 4. Respecto al factor de planta calculamos según la proyección

tentativa de un funcionamiento del parque eólico con una máxima capacidad de 8 horas, teniendo en cuenta la ubicación del proyecto, lo que alcanza un porcentaje del 33%.

**Tabla 4**

*Resumen financiero potencial proyecto eólico en San Andrés, Bolívar y Norte de Santander*

<b>Parámetros generales</b>		
Tasa de Inflación	%	7,6%
Tasa de Descuento	%	11,82
Tasa de Reinversión	%	9
Tiempo de vida del proyecto	año	20
<b>Finanzas</b>		
Costos iniciales totales	\$ COP	40.436.572.034
Relación de deuda	%	70%
Deuda	\$ COP	28.305.600.424
Capital	\$ COP	12.130.971.610
Tasa de interés de la deuda	%	9,3%
Duración de la deuda	año	10
Pagos de la deuda	\$/año COP	4.468.994.826
<b>Ingresos por exportación de electricidad (anuales)</b>		
Electricidad exportada a la red	MWh	22.548
Tarifa de exportación de electricidad	\$/kWh COP	537,65
Ingresos por exportación de electricidad	\$ COP	11.785.157.351
Tasa de escalamiento de exportación de electricidad	%	4

*Fuente.* Autoría propia

### **Viabilidad Financiera**

Con la herramienta RETScreen definimos la viabilidad financiera de cada proyecto por medio de indicadores como los son el VPN y el TIR, así como el flujo de efectivo neto y ahorros anuales totales. (Rodas, 2020) Los flujos de caja anuales para el año 1 representan los costos anuales totales y/o los pagos de la deuda, así como el ahorro anual total y/o los ingresos obtenidos durante el primer año tras la implementación del sistema del caso

propuesto. Los costos anuales totales son calculados por el modelo y representan los costos anuales incurridos para operar, mantener y financiar la instalación del proyecto. Esto corresponde a la suma de los costos (o ahorros) de operación y mantenimiento, el costo del combustible y los pagos de la deuda. Hay que tener en cuenta que los costos anuales totales incluyen el reembolso de la parte "principal" de la deuda, que no es, estrictamente hablando, un costo, sino una salida de efectivo. Estos costos se describen por cada departamento a continuación.

*San Luís – San Andrés*

**Tabla 5**

*Viabilidad Financiera del potencial proyecto eólico en San Luis – San Andrés*

<b>Costos – Ahorros – Ingreso</b>	
<b>Costos Iniciales</b>	<b>\$ COP</b>
Costo inicial fondos departamento 30%	28.305.600.424
Crédito 70%	12.130.971.610
<b>Costos iniciales totales</b>	<b>40.436.572.034</b>
<b>Flujo de Caja Anuales – Año 1</b>	
Costos O y M	5.656.533.706
Pago de la deuda – 10 años	4.468.994.826
<b>Costos anuales totales</b>	<b>10.125.528.532</b>
<b>Ahorros e ingresos anuales totales</b>	
Ingresos por exportación de electricidad	11.785.157.351
<b>Flujo efectivo neto anual – Año 1</b>	
Flujo de efectivo neto anual	1.659.632.085
<b>Viabilidad Financiera</b>	
TIR antes de impuestos - capital	16,7%
VPN (Valor Presente Neto)	4.990.963.266
Repago - capital	7,2 año
Ahorros anuales en ciclo de vida	660.660.662

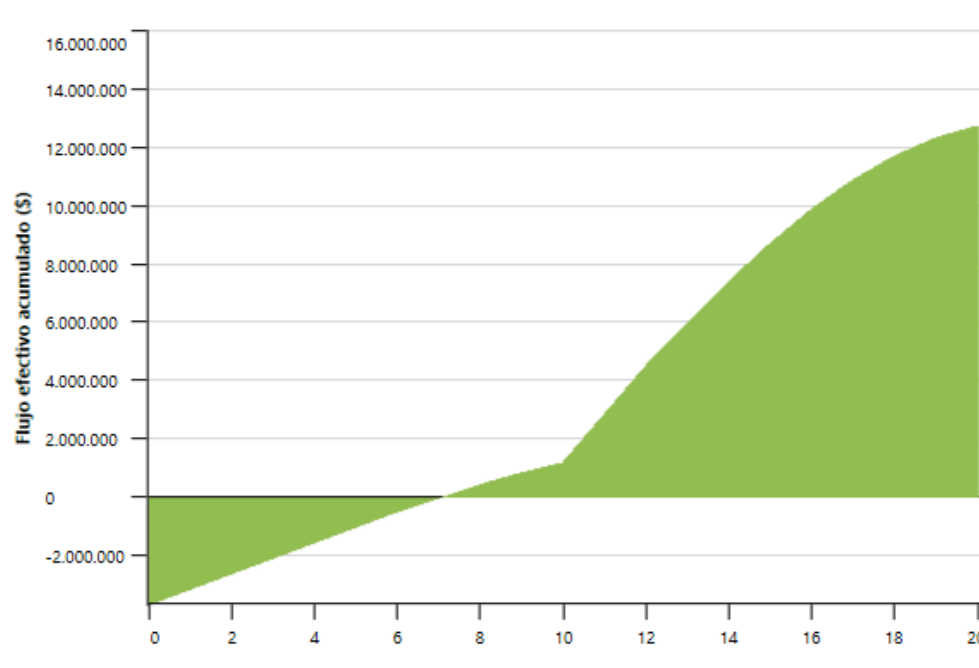
Fuente. Autoría propia



Teniendo en cuenta que, si la tasa interna de rentabilidad es igual o mayor que la tasa de descuento requerida para el proyecto, este se considerará probablemente aceptable desde el punto de vista financiero (asumiendo el mismo riesgo). Si es inferior a la tasa de rendimiento requerida, el proyecto suele rechazarse. Entonces observamos según la tabla 5 que tenemos la TIR sobre 16,7% es decir 4,9 puntos por encima del 11,82 de la tasa de descuento, y a su vez, un VPN de 4.990.963.266 COP como resultado de la diferencia entre los valores de entrada y salida de efectivo asociadas al proyecto propuesto.

### Figura 31

*Flujo efectivo acumulado proyecto eólico San Luis – San Andrés*



*Fuente.* RETScreen, 2022

Por su parte, el retorno de la inversión o también conocido como “equity payback” nos indica el tiempo en que tarda la recuperación de la inversión inicial, teniendo en cuenta los flujos de caja de los fondos propios, pero también del apalancamiento (nivel de la deuda); entonces, vemos en la figura 31 que para el tiempo de vida del proyecto que son 20 años, la recuperación de la inversión se daría para el año 7,2 lo que permitiría reinversiones y mejoras

en diferentes momentos del resto de la vida útil del proyecto; es por ello que determinamos viabilidad positiva financieramente para implementar el proyecto eólico en San Luis – San Andrés.

***Galerazamba – Bolívar | Ocaña – Norte de Santander***

**Tabla 6.**

*Viabilidad Financiera del potencial proyecto eólico en Bolívar y Norte de Santander*

<b>Costos – Ahorros – Ingreso</b>		
<b>Costos Iniciales</b>	<b>Galerazamba</b>	<b>Ocaña</b>
	<b>Bolívar</b>	<b>Norte de Santander</b>
	<b>\$ COP</b>	<b>\$ COP</b>
Costo inicial fondos departamento 30%	28.305.600.424	
Crédito 70%	12.130.971.610	
<b>Costos iniciales totales</b>	40.436.572.034	
<b>Flujo de Caja Anuales – Año 1</b>		
Costos O y M	6.956.007.665	7.312.726.007
Pago de la deuda – 10 años	4.468.994.826	
<b>Costos anuales totales</b>	11.425.002.491	11.781.720.833
<b>Ahorros e ingresos anuales totales</b>		
Ingresos por exportación de electricidad	11.785.157.351	
<b>Flujo efectivo neto anual – Año 1</b>		
Flujo de efectivo neto anual	360.158.125	3.439.784
<b>Viabilidad Financiera</b>		
TIR - capital	Negativo 0,85%	Negativo -4,4%
VPN (Valor Presente Neto)	-12.792.024.271	-17.673.626.579
Repago - capital	Ninguno	Ninguno
Ahorros anuales en ciclo de vida	-1.693.294.928	-2.339.477.791

*Fuente. Autoría propia*

Tal como lo registramos en el enunciado para San Andrés, al ser menor la TIR sobre la tasa de descuento es el primer indicador para rechazar un proyecto. Observamos precisamente a Bolívar en una TIR de 0,85% y a Norte de Santander de -4,4% sobre la tasa de descuento del 11,82%, partiendo de aquí encontramos tanto el VPN como el ahorro anual del ciclo de vida de los proyectos en los dos departamentos con un periodo de amortización negativo lo que nos indica que los costes anuales incurridos son mayores que los ahorros anuales generados. En cuanto al tiempo de recuperación, ninguno de los dos proyectos lograr una estabilidad dentro de los 20 años de vida útil del proyecto. Por lo anterior, no se considera financieramente viable la implementación del proyecto eólico propuesto para Galerazamba - Bolívar y Ocaña - Norte de Santander.

### **Componente Ambiental**

En este módulo del software calculamos la cantidad de gases contaminantes que no llegan a la atmósfera al usar energías limpias para la generación de electricidad o las emisiones que pueden producir otras fuentes energéticas tradicionales en la generación de la misma cantidad de energía que el proyecto estudiado. (Dávila Martín et al., 2019).

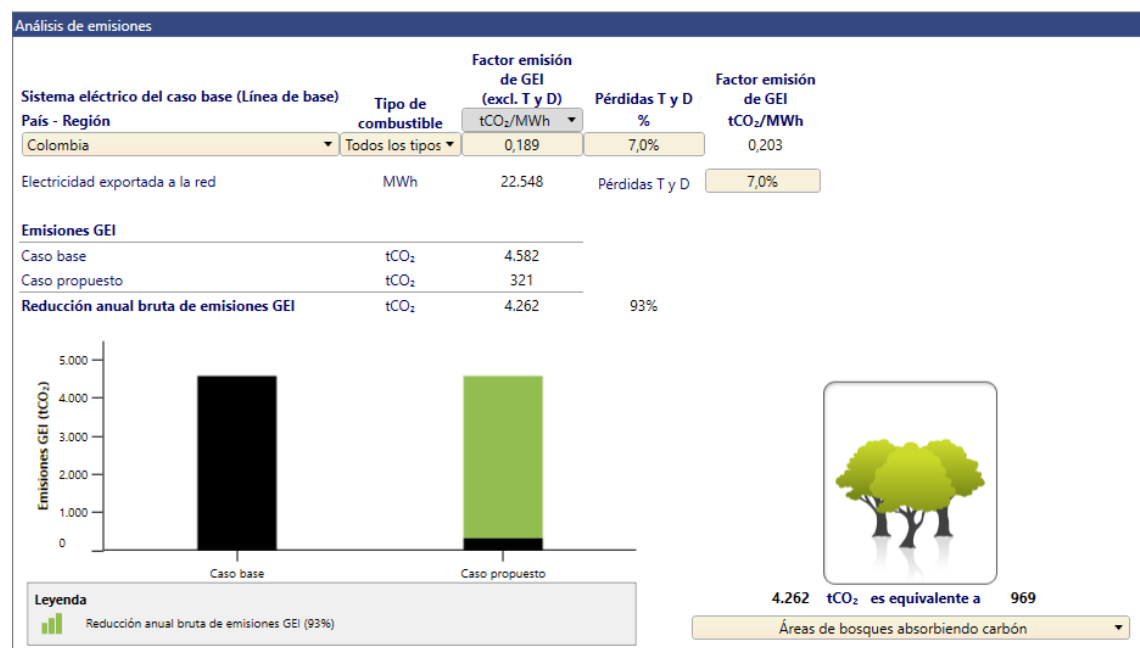
En el presente proyecto se eligió el nivel 1, pues a pesar de ser datos generales no altera la información económica, al contrario, permite entender con más claridad el impacto en el uso de fuentes de energía renovables en vez del uso de otras fuentes contaminantes. En las opciones será necesario agregar la ubicación y el tipo de combustible para comparar con la fuente renovable. Así tendremos una aproximación de las emisiones que permita analizar de forma general la contaminación causada por fuentes energéticas convencionales frente a las renovables. (Dávila Martín et al., 2019).

**Factor de Emisión GEI:** Este factor permite calcular la cantidad e intensidad de emisiones en la producción de energía eléctrica para un periodo anual del Sistema

Interconectado Nacional, que para Colombia en 2020 según (UPME, 2020) corresponde a  $0,203 \text{ tCO}_2\text{MWh}$

**Figura 32**

*Equivalencia reducción de emisiones contaminantes San Andrés*



Fuente. RETScreen, 2022

En la Figura 32 es posible observar la reducción anual bruta de emisiones GEI en un 93% que corresponde a 4.262 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> evitadas por año; este resultado se obtiene como sustracción del caso base (4.582) frente al caso propuesto (321) según el factor de emisión de  $0,203 \text{ tCO}_2\text{MWh}$  y la electricidad exportada a la red que para las tres regiones arroja 22.548 MWh. Así mismo, se puede entender que  $4.262 \text{ tCO}_2\text{MWh}$  es igual a 969 ha de bosques absorbiendo carbón, lo que ilustra fácilmente el impacto del aprovechamiento de estas fuentes de energía limpia.

A pesar de conocer que al implementar energías renovables disminuiría la producción de emisiones de GEI con respecto a la generación de la misma cantidad de energía por parte

de otras fuentes convencionales, esta producción limpia de energía no tendría ningún beneficio económico.

### Análisis de Sensibilidad y Riesgo

Este análisis de sensibilidad lo realizamos sobre el retorno de capital (repago), la TIR antes de impuestos del capital o de los activos, el VPN y los costes de producción de energía. Por ello, ingresamos al software el rango de sensibilidad, que representa un porcentaje de la forma en la que podrían variar los valores en cada parámetro. Respecto a esto, es necesario comentar que el rango de variación establecido para los parámetros a estudiar en este análisis es igual al 50 % en todos los casos a excepción de la relación de deuda, cuyo valor sólo puede moverse dentro de un rango del 25 %, ya que en caso contrario se superaría su valor máximo del 100 % (IDUS, 2019). El sentido positivo o negativo de la desviación estándar que toma el indicador representa la relación entre este y dicho parámetro. Por ejemplo, la tarifa de exportación de electricidad presenta una desviación negativa, lo que indica que, si este disminuye, el VPN también lo hará. Por medio de este análisis de sensibilidad y riesgo se estima el 25% como rango de sensibilidad para especificar el máximo porcentaje de variación y se eligió el año 7 como valor umbral, de acuerdo a la figura 33 Zona San Luis – San Andrés, pues fue la única región viable para el desarrollo del proyecto.

### Figura 33

*Parámetro de riesgo proyecto eólico San Luis – San Andrés*

Parámetro	Unidad	Valor	Rango (+/-)	Mínimo	Máximo
Costos iniciales	\$	12.378.600	25%	9.283.950	15.473.250
Operación y Mantenimiento	\$	1.731.600	25%	1.298.700	2.164.500
Electricidad exportada a la red	MWh	22.548,24	25%	16.911,18	28.185,30
Tarifa de exportación de electricidad	\$/MWh	160,00	25%	120,00	200,00
Relación de deuda	%	70,0%	25%	52,5%	87,5%
Tasa de interés de la deuda	%	9,30%	25%	6,98%	11,63%
Duración de deuda	año	10	25%	8	13
Mediana	año	6,2			
Nivel de riesgo	%	10%			
Mínimo en intervalo de confianza	año	2,5			
Máximo en intervalo de confianza	año	12,9			

Fuente. Google Earth, 2022

Los valores de los parámetros costos iniciales, operación y mantenimiento, electricidad exportada a la red, tarifa de exportación de electricidad, relación de deuda, tasa de interés de la deuda y duración de deuda, fueron estimados en su opción mínima y máxima por RETScreen, lo que nos permite determinar un nivel de riesgo del 10% lo cual muestra un intervalo de confianza con mínimo de 2,5 años y máximo de 12,9 años dentro del cual se espera que caiga el indicador financiero; es decir, la probabilidad de que el indicador financiero quede fuera de este intervalo de confianza.

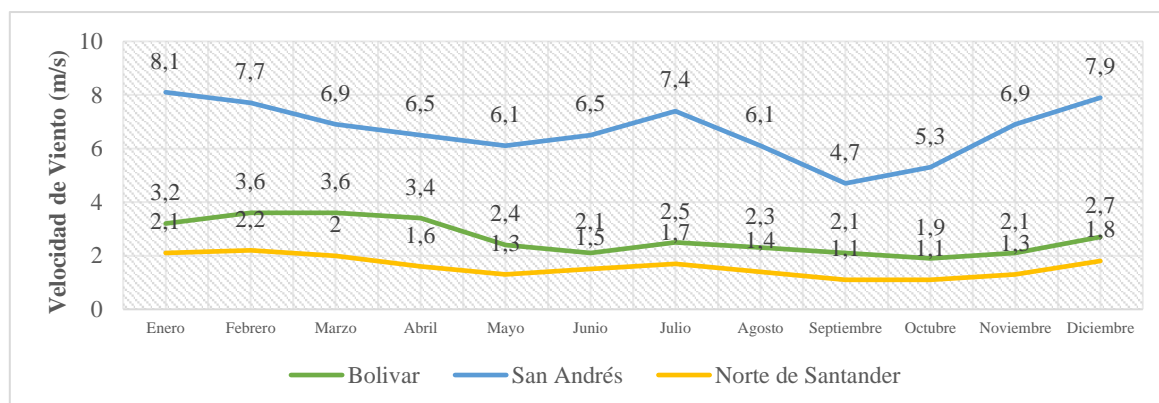
## Comparativas

### *Temperatura del aire vs. velocidad del viento*

En la figura 34 encontramos un comparativo de las tres regiones estudiadas donde se puede analizar que San Andrés es el departamento con mayor velocidad del viento con un promedio de 6,7 m/s marcando una significativa diferencia frente a los otros dos departamentos estudiados, que reportan velocidades del viento tan bajas que inclusive doblan en diferencia con San Andrés; como es el caso de Galerazamba - Bolívar con un promedio de 2,7 m/s y Norte de Santander de 1,6 m/s siendo la zona con velocidades del viento más bajas.

**Figura 34**

### *Comparativo Velocidad del Viento Bolívar, San Andrés y Norte de Santander*

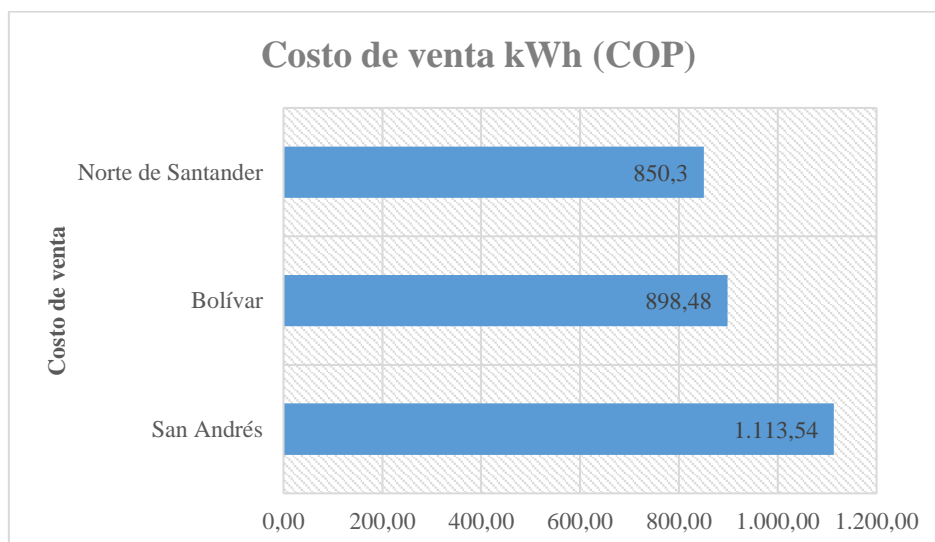


*Fuente.* Autoría propia

### Costo de venta de electricidad por departamento

**Figura 35**

Comparativo costo de venta electricidad en Norte de Santander, Bolívar y San Andrés



Fuente. Autoría propia

Las tarifas de venta de electricidad para cada territorio son diferentes; por ello, acudimos a la información contenida en las páginas web de las empresas de servicios públicos de cada departamento encontrando el costo de venta de electricidad a agosto 2022 para el nivel 1 industrial y comercial supervisado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas. Entonces, tenemos que en San Andrés el costo de venta de la energía corresponde a 1.113,54 COP kWh, muy por encima de las demás regiones que, como observamos en la figura 35 están sobre los 850 a 900 COP kWh. Según (EL\_TIEMPO, 2010) San Andrés tiene las tarifas de electricidad más caras del país debido a que no está interconectada, además de las diferentes situaciones que presenta como apagones, racionamientos y la inestabilidad en el voltaje, sumado al huracán Iota que azotó la isla en 2020 durante plena emergencia sanitaria; situaciones que para regularse deben acudir a incrementos en los diferentes sectores. Por ello, analizamos que la implementación de un parque eólico en San Andrés contribuiría como solución para cumplir con el ODS 7 garantizando energía asequible para toda la comunidad,

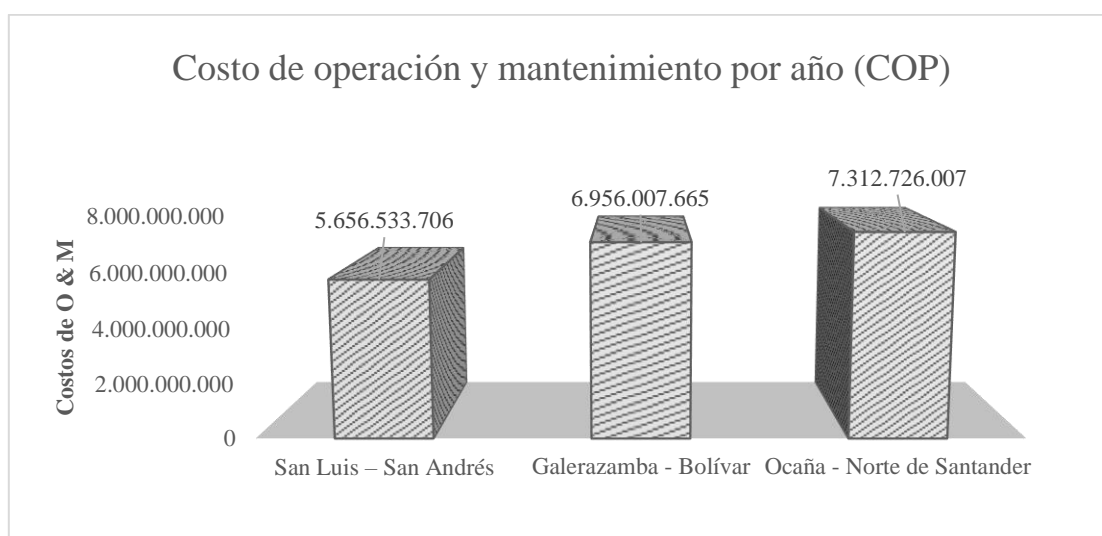
y así mismo, permitiría el desarrollo, social, económico y ambiental del departamento; sin contar que por su privilegiada posición geográfica tendría también potencial para proyectos eólicos offshore.

### **Costos O & M anuales**

Observamos en la figura 36 que para Ocaña – Norte de Santander los costos de Operación y Mantenimiento son los más altos de las regiones estudiadas con un valor de 7.312.726.007 COP anuales para el proyecto; esto obedece a su costo de venta en relación al costo de producción, requiriendo un 62% de los ingresos y ahorros anuales totales del proyecto, lo que dificulta su viabilidad. Situación que repite Bolívar con una participación del 59%. Por último, tenemos a San Andrés con un 48% de costos de operación y mantenimiento al tener una tarifa de venta más alta que las demás regiones, esto corresponde así mismo al 14% de los costos iniciales, lo que proyecta al departamento como viable para implementar proyectos eólicos.

### **Figura 36**

*Comparativo de costos O&M por año para proyecto eólico en San Andrés, Bolívar y Norte de Santander*



*Fuente. Autoría propia*



## **Factibilidad ambiental vs. viabilidad financiera**

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y los valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada "cut-in speed", y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada "cut-out speed" (CECU, 2017)

Teniendo en cuenta esta y otras referencias consultadas que exponen una factibilidad ambiental en proyectos eólicos cuando las velocidades del viento superan los 4 m/s. Entonces, relacionando la literatura frente a nuestros resultados encontramos a Bolívar con 2,7 m/s y Norte de Santander con 1,6 m/s respecto a la velocidad del viento infiriendo que no clasificarían como factibles meteorológicamente para el aprovechamiento efectivo en un proyecto eólico. Por otro lado, encontramos a San Andrés con una velocidad del viento promedio de 6,7 m/s, que al implementar un parque eólico funcionando en su capacidad máxima por 8 horas diarias, tendría un factor de planta del 33% que beneficiaría con electricidad exportada a la red a aproximadamente 15.400 familias.

Respecto a la viabilidad financiera el modelo calcula el Valor Presente Neto (VPN) del proyecto, que es el valor de todos los flujos de caja futuros, descontados al tipo de descuento, en la moneda de hoy. El VPN está relacionado con la tasa interna de rentabilidad (TIR). El VPN se calcula, pues, en un momento 0 que corresponde a la unión del final del año 0 y el principio del año 1. Según el método del VPN, el valor actual de todas las entradas de efectivo se compara con el valor actual de todas las salidas de efectivo asociadas a un proyecto de inversión. La diferencia entre el valor actual de estos flujos de caja, denominada

VPN, determina si el proyecto es, en general, una inversión financieramente aceptable. Los valores positivos del VPN son un indicador de un proyecto potencialmente viable. Al utilizar el método del valor presente neto, es necesario elegir una tasa de descuento de los flujos de caja al valor actual. Por lo anterior, los resultados del análisis financiero tanto para la TIR, como el VPN y el tiempo de recuperación determinaron valores negativos para los departamentos de Bolívar y Norte de Santander; diferente a San Andrés que permite un ahorro anual en ciclo de vida por 660.660.662 COP con un tiempo de recuperación al año 7,2 en un proyecto de 20 años de vida útil.

Finalmente, inferimos para el presente proyecto de investigación que el sector de San Luis en el departamento de San Andrés es la región que cuenta con las condiciones meteorológicas, técnicas y financieras para la implementación de proyectos eólicos.

### **Análisis San Andrés vs. Guajira I**

Este proyecto de investigación evaluó la factibilidad técnica, económica y ambiental al proponer la instalación de un parque eólico en diferentes departamentos de Colombia como San Andrés, Bolívar y Norte de Santander. Por lo anterior, con el fin de aterrizar los resultados presentados realizamos un análisis comparativo entre el departamento viable que en este caso es San Luis – San Andrés y el parque eólico *Guajira 1* el cual queda ubicado en el corregimiento de Uribia, en el Cabo de la Vela – Guajira, que tiene una capacidad instalada de 20MW, cuenta con 10 aerogeneradores de marca Vestas, los cuales están distribuidos a lo largo de 5,5 hectáreas y abastece energía para 33.295 familias. (Portafolio, 2022)

El parque eólico Guajira I está ubicado en la Alta Guajira, el atlas de la energía eólica de Colombia destaca la intensidad de los vientos en este lugar lo que la convierte en una región óptima para la generación energética, sus vientos alcanzan rangos entre los 5 m/s y 11m/s durante todo el año y para el caso de investigación San Luis- San Andrés tiene un promedio de

aproximadamente 6,1 m/s lo que nos permite ver que son datos cercanos y por lo tanto son zonas factibles para el desarrollo de parques eólicos.

La electricidad exportada a la red depende de las condiciones del viento como de la tecnología integrada, en este caso se tienen dos modelos de aerogeneradores que operan según la clasificación IEC, en el caso del parque eólico Guajira 1 instalaron aerogeneradores del fabricante Vestas V136-3.45MW y la clase del viento es: IEC IIIA / IIB y para el caso de San Andrés el aerogenerador del estudio es Nordex N60/1300 y su clase de viento es: IEC la (BIDt III). Colombia se caracteriza por presentar velocidades muy altas en la parte de la península de la Guajira, estas van reduciéndose a medida que se introduce más en el continente, aclarando que las regiones costeras como es el caso de San Andrés también poseen velocidades del viento que permitirían su aprovechamiento.

La central eólica Guajira crea valor con energías verdes, generando beneficios económicos con fuentes renovables, con rentabilidad social y ambiental, a través de una matriz limpia y confiable, la entrada en operación de esta central eólica es significativo en la medida en que genera confianza para continuar en la senda de producción de electricidad a través de energías alternativas, que son un activo natural del país dada su posición geográfica y condiciones climáticas. Es importante resaltar que Guajira I es el segundo parque eólico en construirse en Colombia - luego de 17 años desde el piloto realizado por EPM con el parque eólico Jepírachi, también ubicado en la Guajira - siendo actualmente el más grande de todo el territorio nacional. (Guajira360, 2017)

A raíz de los diferentes estudios sobre el potencial eólico en Colombia se ha logrado determinar que la zona de la alta Guajira presenta gran potencial de generación eléctrica a partir del recurso del viento, habiendo suficiente para suplir el doble de la demanda nacional, es por esta razón que la mayoría de proyectos sobre energía eólica están siendo empleados en esta parte del territorio como el parque Guajira 1, sin embargo existen distintas zonas del

país que cuentan con altas velocidades de viento durante gran parte del año, las cuales pueden ser igualmente aprovechadas como es el caso de San Luis – San Andrés.

El parque Guajira 1 lleva menos de un año en funcionamiento y la inversión fue superior a \$75.000 millones de pesos, que genera excelentes ingresos y ahorros; cuenta con la participación de ISAGEN, empresa del sector privado de generación y comercialización de energía. Frente al aspecto social aún hay desaciertos manifestados por las comunidades indígenas que sienten incumplimiento en sus derechos y algunas excluidas de las consultas y convenios de uso de su territorio para la construcción de las torres, de redes subterráneas y aéreas, instalaciones varias y caminos para el tránsito de los nuevos ocupantes (Posso, 2022), se espera que San Andrés tenga mayor aceptación ya que el huracán Iota provocó una destrucción masiva y este proyecto puede ser la oportunidad de ayudar al progreso del departamento, generando empleo, reconocimiento y promoviendo un desarrollo ambiental, social y económico.

## Conclusiones

Analizando la factibilidad técnica, económica y ambiental al proponer potenciales proyectos de generación eólica en los departamentos de Bolívar, San Andrés y Norte de Santander mediante el uso del software RETScreen Expert, se puede concluir que la región que cuenta con las condiciones óptimas en los diferentes aspectos para la implementación de un proyecto eólico es San Luis – San Andrés, ya que la velocidad del viento se mantienen en un promedio de 6,7 m/s durante todo el año; así mismo, financieramente la TIR por encima de la tasa de descuento en 5 puntos para esta zona de San Andrés permite un VPN positivo, lo que paralelamente logra un periodo de recuperación en 7,2 años incrementando su viabilidad en referencia a los 20 años de vida útil del proyecto.

El parque eólico propuesto de 7,8 MW, está conformado por 6 aerogeneradores Nordex N60/1300 y demandaría una inversión inicial de 40.436.572.034 COP, que exportaría para el caso de San Andrés 22.548 MWh anuales, energía suficiente para beneficiar cerca de 15.400 familias. Por tanto, es bastante conveniente instalar centrales eólicas para amortiguar la demanda energética de la red principal y así tener un impacto positivo para el medio ambiente. Al producir electricidad por medio de energías alternativas se estaría desplazando los métodos de generación energética con combustibles fósiles y por ende se reducirían las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Es posible observar la reducción anual bruta de emisiones GEI en un 93% que corresponde a 4.262 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> evitadas por año; este valor es igual a 969 ha de bosques absorbiendo carbón, lo que ilustra fácilmente el impacto del aprovechamiento de estas fuentes de energía limpia.

## Recomendaciones

Aprovechar los programas como RETScreen Expert, QGis, Google Earth Pro, Sketchup que facilitan el diseño, ubicación, factibilidad de posibles proyectos de energías alternativas, obteniendo resultados positivos o negativos, que ayudaran a desistir o emprender con mayor voluntad un proyecto.

Tener en cuenta que la altura de instalación de los aerogeneradores también marca diferencia a la hora de alcanzar mayores velocidades del viento, por eso se recomienda la instalación de los aerogeneradores por encima de 60m con el fin de aumentar la producción de energía.

El software RETScreen contiene tutoriales digitales como manual paso a paso, videos para el manejo en varios idiomas aplicables a diferentes proyectos de energías renovables y casos de estudios base que permiten un aprovechamiento adecuado de la herramienta.

Los datos meteorológicos de Galerazamba – Bolívar en el programa RETScreen arroja velocidades del viento diferentes a las presentadas en este proyecto de investigación, teniendo en cuenta que la fuente de datos puede variar a otros estudios, en este caso el software tomó datos de las bases satelitales de la NASA. Otros estudios refieren (Ricardo & Venecia, 2011) velocidades del viento que superan los 5 m/s en todo el año, especialmente los tres primeros meses que pueden alcanzar intensidades promedio superiores a 8 m/s.

## Bibliografía

- Acciona. (2020). *¿Qué beneficios tiene la energía eólica?*  
<https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/>
- AEE. (2020). *La eólica en el mundo - Asociación Empresarial Eólica*. aeeolica.  
 Retrieved 2022 <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>
- Afinia. (2022). *Costo unitario (\$/kWh) – Agosto 2022 Bolívar*. ElectricaribeSA.  
<https://energiacaribemar.co/tu-energia/>
- AIE. (2014). *Transmisión de energía a eléctrica y pérdidas en la distribución (% de producción) - Colombia | Data*.  
<https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2014&locations=CO&start=1971&view=chart>,
- Andrea, M. C. P. (2013). *Energía eólica: ventajas y desventajas de su utilización en Colombia*. Retrieved 2022  
<https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/10602/Monograf%C3%ada.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arriols, E. (2022). *Ventajas y desventajas de la energía eólica*. Title -- A to Z.  
 Retrieved 2022 <https://www.ecologiaverde.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica-1085.html>
- Bank, W. (2013). *The World Bank Annual Report 2013*.  
<https://doi.org/http://hdl.handle.net/10986/16091>
- Barliza, G., Barliza, R., & Kammerer, M. (2019). *Tendencia tecnológica de la Energía Eólica*. Retrieved 2022  
<https://repositoryinst.uniguajira.edu.co/bitstream/handle/uniguajira/305/35.%20Tendencia%20tecnol%C3%B3gica%20%20energ%C3%Ada%20e%C3%B3lica%20-web-.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- BlueFloat. (2022, 2022-05-03). *Vientos Alisios el proyecto eólico marino más importante en Colombia | Resumen de privacidad*. <https://www.bluefloat.com/es/vientos-alisios-el-proyecto-eolico-marino-mas-importante-en-colombia/>
- Canarias. (2008). *Energías Renovables y Eficiencia Energética*. Retrieved 2022  
<http://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>
- CECU. (2017). *La Energía que nos Une - Cómo funciona Energía Eólica*.  
<https://cecu.es/laenergiaquenosune/index.php/como-funciona>
- CENS. (2022). *Tarifas de energía mercado regulado Nte. Santander*.  
[https://www.cens.com.co/Portals/0/TarifasdeEnergia/Tarifas2022/Tarifa\\_CENS\\_202208.pdf?ver=2021-04-07-171142-360](https://www.cens.com.co/Portals/0/TarifasdeEnergia/Tarifas2022/Tarifa_CENS_202208.pdf?ver=2021-04-07-171142-360)
- COCIER. (2018). *Norte de Santander tiene potencial para generar más energía*. Retrieved 2022  
<https://www.cocier.org/index.php/es/noticias-de-cocier/327-colombia-departamento-del-atlantico-fomenta-la-fotovoltaica-en-la-industria-lechera>
- Colombia, C. d. (1973). *Ley 23 Por el cual se conceden facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones*. Retrieved 2022  
[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=9018](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=9018)
- Colombia, C. d. (1994). *Ley 143 Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética*. Retrieved 2022  
[https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/667537/Ley\\_143\\_1994.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/667537/Ley_143_1994.pdf)

Colombia, C. d. (2014). *Ley N.1715 Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*. Retrieved 2022 <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/22602-11506.pdf>

Colombia, M. d. (2021). *El municipio de Santa Catalina*. Retrieved 2022 <https://www.municipio.com.co/municipio-santa-catalina.html>

Colombia, P. d. I. R. d. (2011). *Decreto 3573 Se crea la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales –ANLA– y se dictan otras disposiciones*. Retrieved 2022 [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=64920](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=64920)

Colombia, P. d. I. R. d. (2015). *Decreto 1623. Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas*. Title -- A to Z. Retrieved 2022 [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=66410](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=66410)

Constituyente, A. N. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Retrieved 2022 from <https://pdba.georgetown.edu/Constitutions/Colombia/colombia91.pdf>

CORPOEMA. (2010). *Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia*. Retrieved 2022 <https://bdigital.upme.gov.co/flip/index.jsp?pdf=/bitstream/handle/001/994/Vol%201%20Plan%20Desarrollo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CREG. (2022). *Resolución 102 002 MAR 2022*. [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/b3b71c20a8d1a2590525881400739244/\\$FILE/Creg102%20002.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/b3b71c20a8d1a2590525881400739244/$FILE/Creg102%20002.pdf)

César. (2013, 2013-08-25). *Energía eólica “Made in San Andrés” - The Archipiélago Press*. <https://thearchipelagopress.co/energia-eolica-made-in-san-andres/>

d’Aragon, D. I. (2020). *Las obras de los parques eólicos de El Portillo y El Cabezo provocan 'daños irreversibles' en su relieve y su fauna*. Retrieved 2022 <https://arainfo.org/las-obras-de-los-parques-eolicos-de-el-portillo-y-el-cabezo-provocan-danos-irreversibles-en-su-relieve-y-su-fauna/>

Dávila Martín, J., Abella Monserrat, R., Torralba Román, M. d. G., & Fluidos, U. d. S. D. d. I. A. y. M. d. (2019, 2019). *Instalación de las primeras turbinas bulbo en Andalucía. Pequeñas centrales*. <https://idus.us.es/handle/11441/92204>

Energía, M. d. M. y. (2014). *Decreto 2469 Establece los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración*. Retrieved 2022 <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/36864-Decreto-2469-02Dic2014.pdf>

Energía, M. d. M. y. (2017). *Resolución N. 167 Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas*. Retrieved 2022 <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/01819ded6512c5010525820c0073dfad?OpenDocument>

EnergíasRenovables. (2020). *Eólica - El segundo parque eólico del país llega tras 16 años de parón - Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias*. El periodismo de las energías limpias. <https://www.energias-renovables.com/eolica/electnor-reactiva-la-instalacion-de-parques-eolicos-20200916>

FactorEnergía. (2018). *Energía eólica: cómo funciona y sus ventajas | factorenergia*. factorenergia. Retrieved 2022 <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-eolica/>

FAO. (2022). *4. COSTOS DE PRODUCCION*. <https://www.fao.org/3/v8490s/v8490s06.htm#TopOfPage>

FMI. (2021). *Tasa de interés activa (%) - Colombia | Data*. Retrieved 2022 <https://datos.bancomundial.org/indicador/FR.INR.LEND?locations=CO>



- Guajira360. (2017, 2017-05-08). *Energía Eólica de La Guajira para Colombia*. GUAJIRA360. <https://guajira360.org/energia-eolica-de-la-guajira-para-colombia/>
- Hernández, N. (2015, 2021-03-12). *Que es el costo nivelado electrico (LCOE)* (página 2). Retrieved 2022 <https://www.monografias.com/trabajos105/que-es-costo-nivelado-electrico-lcoe/que-es-costo-nivelado-electrico-lcoe2>
- Hindawi. (2014). *Figure 2 | The Wind Energy Potential of Kurdistan, Iran*. Retrieved 2022 <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2014/323620/fig2/>
- HistoriaInventos. (2014). *Aerogenerador*. Retrieved 2022 <http://historiainventos.blogspot.com/2014/07/aerogenerador.html>
- IDUS. (2019, 2019). *Depósito de Investigación de Sevilla*. <https://idus.us.es/handle/11441/92204>
- INDEC. (2022). *Índice de Precios al Consumidor. Julio 2022*. Retrieved 2022 [https://www.indec.gov.ar/uploads/informesdeprensa/ipc\\_08\\_222F36DA2F1A.pdf](https://www.indec.gov.ar/uploads/informesdeprensa/ipc_08_222F36DA2F1A.pdf)
- Intereléctricas. (2021). *Energía Eólica, la apuesta de Bolívar*. Retrieved 2022 <https://interelectricas.com.co/blog/en-colombia-energia-eolica-la-apuesta-de-bolivar-b1812.html>
- Interior, M. d. (2003). *Decreto 2755 Por medio del cual se reglamenta el artículo 207-2 del Estatuto Tributario*. Retrieved 2022 [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=10683](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=10683)
- IPCC. (2011). *Informe Especial sobre las fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. Retrieved 2022 [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren\\_report\\_es-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren_report_es-1.pdf)
- IRENA. (2022a). *Estadísticas de Energía Renovable*. Retrieved 2022 [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA\\_Renewable\\_energy\\_statistics\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2022.pdf)
- IRENA. (2022b). *IRENA – International Renewable Energy Agency*. <https://www.irena.org/>
- Jiménez, L. (2019). *EVOLUCIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA Y SU IMPLICACIÓN PARA LA AGENDA 2030*. Retrieved 2022 [https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/38527/JimenezArevaloLeidyJulie\\_th2021.pdf](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/38527/JimenezArevaloLeidyJulie_th2021.pdf)
- Jones-Langley, J. (2022, 2022-06-15). *The Renewables 2022 Global Status Report in 150 words - REN21*. REN21. Retrieved 2022 <https://www.ren21.net/the-renewables-2022-global-status-report-in-150-words/>
- Linderman, J. (2018). *Análisis de Prefactibilidad para implementación de micro-turbinas para generación eléctrica*. Retrieved 2022 <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/47182/3560900260971UTFSM.pdf?sequence=1>
- Loren, M., Bebi Elena, A. M., Konomi, I., Bartocci, P., Evis, B., Matilda, S., . . . Ermonela, R. (2021). *The Future Strategies of the Wind Power Development in Albania: Case Study: “Qafe Thane,” Pogradec, Albania*. [https://www.researchgate.net/profile/Ardit-Gjeta/publication/352344606\\_THE\\_FUTURE\\_STRATEGIES\\_OF\\_THE\\_WIND\\_POWER\\_DEVELOPMENT\\_IN\\_ALBANIA\\_CASE\\_STUDY\\_QAFE\\_THANE\\_POGRADEC\\_ALBANIA/links/60d18df9458515dc179cadf8/THE-FUTURE-STRATEGIES-OF-THE-WIND-POWER-DEVELOPMENT-IN-ALBANIA-CASE-STUDY-QAFE-THANE-POGRADEC-ALBANIA.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ardit-Gjeta/publication/352344606_THE_FUTURE_STRATEGIES_OF_THE_WIND_POWER_DEVELOPMENT_IN_ALBANIA_CASE_STUDY_QAFE_THANE_POGRADEC_ALBANIA/links/60d18df9458515dc179cadf8/THE-FUTURE-STRATEGIES-OF-THE-WIND-POWER-DEVELOPMENT-IN-ALBANIA-CASE-STUDY-QAFE-THANE-POGRADEC-ALBANIA.pdf)
- MinAmbiente. (2016). *Resolución 1312 Adopta los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de proyectos de uso de fuentes de energía eólica continental y se toman otras*

determinaciones. Retrieved 2022

<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/18995913/Res.+MADS+1312+11-08-2016+ToR+EIA+Pys+E%C3%B3licos+continentales.pdf/2de2127d-d0a5-4953-8462-8de862cd6f36>

Nacional, G. (1974). *Decreto 2811 Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Retrieved 2022

[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=1551](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=1551)

Ortiz, W. (2008). *Análisis y Modelamiento de la calidad de un Sistema de Generación Eólica*. Retrieved 2022

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9915/u336191.pdf?sequence=1>

Oviedo-Salazar, J. L., Badii, M. H., & Serrato, A. G. O. L. (2015). *Historia y Uso de Energías Renovables*. Retrieved 2022 [https://www.spentamexico.org/v10-n1/A1.10\(1\)1-18.pdf](https://www.spentamexico.org/v10-n1/A1.10(1)1-18.pdf)

Padinger, G. (2021, 2021-09-24). *¿Cuál es el costo de la electricidad en un mundo afectado por el cambio climático?* @CNNEE. Retrieved 2022

<https://cnnespanol.cnn.com/2021/09/24/costo-electricidad-mundo-afectado-cambio-climatico-orix/>

Planeación, D.-D. d. (2018). *Las 16 grandes apuestas de Colombia para cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Retrieved 2022 <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Las-16-grandes-apuestas-de-Colombia-para-cumplir-los-Objetivos-de-Desarrollo-Sostenible.aspx>

Portafolio. (2022). *Empieza a funcionar Guajira 1: así es este nuevo parque eólico*. Retrieved 2022 <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/guajira-1-empieza-a-funcionar-este-nuevo-parque-eolico-560814>

Posso, C. G. (2022). *Guajira 1. Las verdades ocultas del único parque eólico instalado - "renovables Sí, pero no Así", dicen comunidades*. Title -- A to Z. Retrieved 2022 <https://indepaz.org.co/guajira-1-las-verdades-ocultas-del-unico-parque-eolico-instalado-renovables-si-pero-no-asi-dicen-comunidades/>

Público, M. d. H. y. C. (2022). *Decreto 895. Modifica la normativa sobre el acceso a incentivos a la generación de energía eléctrica con fuentes no convencionales*. Retrieved 2022

<https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%20895%20DEL%2031%20DE%20MAYO%20DE%202022.pdf>

Público. (2021). *Más de cien grandes aves y rapaces protegidas mueren en diez meses en un parque eólico de Navarra*. Retrieved 2022 <https://www.publico.es/politica/cien-grandes-aves-rapaces-protegidas-mueren-diez-meses-parque-eolico-navarra.html>

RECON, C. (2020). *7. Energía asequible y no contaminante*. Retrieved 2022 <https://www.reconcolombia.org/objetivos-de-desarrollo-sostenible/7-energia-asequible-y-no-contaminante/>

REN21. (2017). *RENEWABLES 2017 GLOBAL STATUS REPORT*. Retrieved 2022 <https://ren21.net/gsr-2017/>

REN21. (2019, 2019-05-27). *What are the current trends in renewable energy?* - REN21. REN21. Retrieved 2022 <https://www.ren21.net/what-are-the-current-trends-in-renewable-energy/>

RenewableEnergies. (2022). *Eólica - Colombia cuantifica en 50.000 megavatios su potencial eólico marino - Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias*. Eólica - Colombia cuantifica en 50.000 megavatios su potencial eólico marino - Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias. <https://www.energias-renovables.com/eolica/colombia-cuantifica-en-50-000-megavatios-su-20220508>

Republica, C. d. l. (1993). *Ley 99 Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio*

*ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.* Retrieved 2022

[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=297](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=297)

Republica, C. d. I. (2020). *Ley N. 2036 Promueve la participación de las entidades territoriales en los proyectos de generación de energías alternativas renovables y se dictan otras disposiciones.* Retrieved 2022

<https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%202036%20DEL%2027%20DE%20JULIO%20DE%202020.pdf>

Republica, C. d. I. (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.* Retrieved 2022

[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=166326](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=166326)

RETSscreen\_Expert. (2018). *Aprendizaje en línea de RETScreen.* Retrieved 2022

<https://www.youtube.com/channel/UCqHe3nICfKGgfCpuKMcEKVw>

RevistaEspacios. (2018). *Panorama Energías Renovables en el Mundo.* Retrieved 2022 <http://www.revistaespacios.com/a18v39n34/a18v39n34p10.pdf>

Ricardo, L., & Venecia, Y. (2011). *Estudio y Evaluación del Recurso Eólico en Colombia para su Aprovechamiento como Fuente de Energía Eléctrica.* Retrieved 2022 <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/57/ESTUDIO%20Y%20EVALUACION%20DEL%20RECURSO%20EOLICO%20EN%20COLOMBIA%20PARA%20SU%20APROVECHAMIENTO%20COMO%20FUENTE%20DE%20ENERGIA%20EOLICA.pdf>

Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2022). *Renewable Energy.* @OurWorldInData. <https://ourworldindata.org/energy>

Robles, C., & Rodríguez, O. (2018). *Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia.* *Revista Espacios.* Retrieved 2022, <https://www.revistaespacios.com/a18v39n34/a18v39n34p10.pdf>

Rodas, M. R. M. (2020). *Estudio de la aplicación de generación distribuida con fuentes renovables de energía en la comunidad de Molleturo.* Retrieved 2022 <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/34455/1/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n.pdf>

Rueda-Bayona, J. G., Guzman, A., Eras, J. J. C., Silva-Casarin, R., Bastidas-Arteaga, E., & Horrillo-Caraballo, J. (2019). *Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology.* *Journal of Cleaner Production*, 220, 529-543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.174>

Sanchez, M. G., Assaf, J. C. M., & Mantilla, N. J. A. (2021). *Implementation of renewable energies as a guarantee of the fundamental right to a healthy environment in Colombia.* *Revista Ces Derecho*, 12(2), 87-106. <https://doi.org/10.21615/cesder.6163>

SOPESA. (2022). *Costo unitario prestación kWh Nivel 1.* <https://sopesa.com/>

Sosapanta, J. (2020). *Energía eólica en Colombia: panorama y perspectivas bajo la triple cuenta de resultados.* Retrieved 2022 <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/38193/jcsosapantas.pdf?sequence=1>

Sostenible, M. d. A. y. D. (2016). *Resolución 1283. Establece el procedimiento y los requisitos que deben tenerse en cuenta a la hora de expedir el certificado de beneficio ambiental por invertir en proyectos de fuentes no convencionales de Energías Renovables...* Retrieved 2022

[https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/resoluciones/resolucion\\_1283\\_agt\\_2016.pdf](https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/resoluciones/resolucion_1283_agt_2016.pdf)

UPME. (2006). *Atlas del Viento Colombia y Energía Eólica de Colombia.* Retrieved 2022

[https://bdigital.upme.gov.co/flip/index.jsp?pdf=/bitstream/handle/001/22/Upme\\_362\\_Atlas%20de%20viento%20y%20energia%20eolica.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://bdigital.upme.gov.co/flip/index.jsp?pdf=/bitstream/handle/001/22/Upme_362_Atlas%20de%20viento%20y%20energia%20eolica.pdf?sequence=4&isAllowed=y)

UPME. (2015). *Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050*. Retrieved 2022 [https://www1.upme.gov.co/Documents/PEN\\_IdearioEnergetico2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/Documents/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf)

UPME. (2020). *CÁLCULO DEL FACTOR DE EMISIONES DE LA RED DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA PARA 2020*. Retrieved 2022 [https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos\\_normativos/Documento\\_Tecnico\\_FE\\_2020.pdf](https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/Documento_Tecnico_FE_2020.pdf)

UPME. (2022). *Plan de acción Indicativo del PROURE 2022-2030*. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PROURE.aspx>

UPME, U. d. P. M. E.-. (2018). *Resolución N. 000703 Establece el procedimiento y los requisitos para obtener la certificación que avala los proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), con miras a obtener el beneficio de la exclusión del IVA*. Retrieved 2022

[https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24144926/Resolucion\\_703\\_2018.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24144926/Resolucion_703_2018.pdf)

Viogiatzis, & Torr. (2004). *Reconstructing Relief Surfaces*. Retrieved 2022 <http://george-vogiatzis.org/publications/bmvc2004.pdf>