



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Complementariedad energética entre los recursos eólico y solar para la región Caribe colombiana**

**Guillermo Antonio Bonilla Prado**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y arquitectura  
Departamento de eléctrica, electrónica y computación  
Manizales, Colombia  
2020

# **Complementariedad energética entre los recursos eólico y solar para la región Caribe colombiana**

**Guillermo Antonio Bonilla Prado**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería – ingeniería eléctrica**

Directora:

Ph.D. Belizza Janet Ruiz Mendoza

Codirectora:

Ph.D. Luisa Julia Salazar Gil

Línea de Investigación:

Fuentes de energía renovables

Meteorología energética

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Potencia, Energía y Mercados - GIPEM

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y arquitectura

Departamento de eléctrica, electrónica y computación

Manizales, Colombia

2020



# **Energy Complementarity between wind and solar resources for the Colombian Caribbean region**

**Guillermo Antonio Bonilla Prado**

Thesis presented in partial fulfillment of the requirement for the degree of:

**Master on electrical engineering**

Supervisor:

Ph.D. Belizza Janet Ruiz Mendoza

Advisor:

Ph.D. Luisa Julia Salazar Gil

Investigation line:

Renewable energy sources

Energy Meteorology

Investigation group:

Investigation group on power, energy and markets - GIPEM

National University of Colombia

Faculty of engineering and architecture

Department of electrical, electronic and computing

Manizales, Colombia

2020

“Mientras el corazón late, mientras el cuerpo y alma siguen juntos, no puedo admitir que cualquier criatura dotada de voluntad tiene necesidad de perder la esperanza en la vida.”

Julio Verne

*Dedico este trabajo a mis padres, y a la vida razones que son el pilar fundamental para el apoyo en el logro de cada uno de mis objetivos.*

*A mis hermanos, por su compañía, consejos, comprensión y cariño que me han dado.*

## Agradecimientos

A mi tutora, Dra. Belizza Janet Ruiz Mendoza por apoyar la propuesta inicial de este trabajo de tesis, como siendo una guía en el proceso de investigación, a mi cotutora Dra. Luisa Julia Salazar Gil por su acompañamiento en la realización de éste, siendo el resultado de trabajo conjunto, que, sin sus aportes en cada paso de este proceso, no hubiese sido posible culminarlo.

Por las fuentes de información utilizadas en este documento, especialmente a los datos procedentes del sistema de recepción satelital de datos del IDEAM Hydras3, a la información suministrada por medio magnético y el aporte en recursos financieros en marco del proyecto de investigación Complementariedad de Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia CFNCE publicado a través de Colciencias y cofinanciado también por la UPME. Además, a la base de datos del repositorio portal web de la Universidad Nacional de Colombia, SINAB, por permitirme acceder al estado del arte de la información científica referencia de este proyecto.

A mis compañeros de trabajo y demás docentes del Grupo de Investigación en Potencia, Energía y Mercados (GIPEM), por su ánimo y consejos en el transcurrir del proyecto.

## Resumen

Aplicar una metodología estadística que permita evaluar el grado de complementariedad entre los recursos eólico y solar presentes en la región Caribe en un horizonte temporal de 5 años (2014-2018). Basados en datos (2014 – 2018) de radiación solar global y velocidad del viento medidos en tierra por medio de las Estaciones Meteorológicas Automáticas Satelitales (EMAS) pertenecientes a la red de estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se realiza una caracterización mediante un análisis descriptivo con el propósito de obtener un valor representativo de cada variable, se calculan los promedios diarios y mensuales de las series temporales para evaluar la correlación de cada recurso por separado como la correlación conjunta, para lo cual se utilizó un método estadístico basado en el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson. Las series temporales establecidas permiten comprender que la correlación de los recursos por separado o mediante la combinación de éstos, se presenta mayor cantidad de coeficientes de correlación cercanos a -1 cuando se analizan los recursos en conjunto, lo que significa que cuando un recurso aumenta el otro se reduce, correlacionándose inversamente entre sí en sus disponibilidades. Obteniendo que tanto la distancia entre los puntos de mediciones como la resolución temporal modulan la complementariedad que presenta el recurso eólico y solar de la región Caribe, por lo que se obtiene una disponibilidad continua de los recursos al tener en cuenta el aprovechamiento en conjunto de estos.

Palabras clave: Fuentes de energía renovable; energía solar; energía eólica; complementariedad energética; correlación; diversificación.

## Abstract

Apply a statistical methodology that allows assess the degree of complementarity between the wind and solar resources present in the Caribbean region in a time horizon of 5 years (2014-2018). Based on data (2014 - 2018) of global solar radiation and wind speed measured on the ground by means of the Automatic Satellite Meteorological Stations (EMAS) from the network of meteorological stations of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), a characterization is carried out through a descriptive analysis in order to obtain a representative value of each variable, the daily and monthly averages of the time series are calculated to evaluate the correlation of each resource separately as joint correlation, for which it was used a statistical method based on the calculation of Pearson's correlation coefficients. The determined time series allow us to understand that the complementarity of the resources separately, such as by combining them, presents a greater number of correlation coefficients close to -1 when the resources are analyzed together, which means that when a resource increases the other is reduced, complementing each other in their behaviors. Both the distance between the measurement points and the temporal resolution modulates the complementarity presented by the wind and solar resources of the Caribbean region, consequently continuous availability of resources is obtained by considering a joint utilization.

Keywords: Renewable energy sources; solar energy; wind energy; energy complementarity; correlation; diversification.

# Tabla de contenido

## Contenido

AGRADECIMIENTOS .....	VI
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
TABLA DE CONTENIDO .....	IX
LISTA DE FIGURAS .....	XI
LISTA DE TABLAS .....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	XV
SÍMBOLOS .....	XV
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>XV</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES.....	6
2.1. JUSTIFICACIÓN.....	6
2.2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	13
2.3. OBJETIVO GENERAL .....	14
2.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
3. ESTADO DEL ARTE.....	15
3.1. ANTECEDENTES.....	15
3.1.1. Estudios de complementariedad a nivel mundial.....	15
3.1.2. Complementariedad regional en Suramérica .....	17
3.1.3. Estudios de complementariedad en Colombia.....	18
3.2. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA.....	23
3.2.1. Contexto del Caribe Colombiano.....	24
3.2.2. Características climáticas del Caribe .....	27
3.2.3. La región Caribe Colombiana y su sistema eléctrico .....	30
3.3. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE PEARSON .....	34
4. METODOLOGÍA .....	37
4.1. RECOPIACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS BASES DE DATOS PARA LAS SERIES DE VELOCIDAD DEL VIENTO Y RADIACIÓN SOLAR GLOBAL .....	41

---

4.2.	ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	42
4.3.	SERIES DE TIEMPO PARA LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL .....	46
4.4.	SERIES DE TIEMPO PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO .....	53
4.5.	CÁLCULO DE COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE PEARSON.....	59
4.6.	ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR.....	60
4.6.1.	Estimación de la energía eólica .....	61
4.6.2.	Estimación de la energía solar.....	62
5.	RESULTADOS.....	64
5.1.	CORRELACIÓN DIARIA ENTRE LOS RECURSOS VELOCIDAD DEL VIENTO Y RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN LA REGIÓN CARIBE DE COLOMBIA .....	64
5.1.1.	Correlación diaria de la radiación solar global para los puntos de medición de la región Caribe	65
5.1.2.	Correlación diaria de la velocidad del viento para los puntos de medición en la región Caribe	68
5.1.3.	Correlación diaria entre las series de velocidad del viento y la radiación solar global para los puntos de medición en la región Caribe .....	70
5.2.	CORRELACIÓN MENSUAL ENTRE LOS RECURSOS VELOCIDAD DEL VIENTO Y RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN LA REGIÓN CARIBE DE COLOMBIA .....	75
5.2.1.	Correlación mensual de la radiación solar global para los puntos de medición en la región Caribe	75
5.2.2.	Correlación mensual de la velocidad del viento para los puntos de medición en la región Caribe	78
5.2.3.	Correlación mensual entre las series de velocidad del viento y la radiación solar global para los puntos de medición en la región Caribe .....	81
5.3.	ENERGÍA EÓLICA ESTIMADA .....	87
5.4.	ENERGÍA SOLAR ESTIMADA .....	94
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	100
6.1.	CONCLUSIONES .....	100
6.2.	RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS .....	103
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	106

# Lista de figuras

Figura 1.	Participación por tecnología en la matriz de generación de energía eléctrica de Colombia.	7
Figura 2.	Valores del índice Oceánico de El Niño.....	7
Figura 3.	Emisiones de CO2 para Colombia en el período de años comprendido entre 1990 a 2018.	9
Figura 4.	Curva de producción nacional de reservas de gas.....	10
Figura 5.	Mapa de ubicación geográfica de la Región Caribe Colombiana .....	25
Figura 6.	Zona de Convergencia Intertropical – ZCIT en julio y enero.....	29
Figura 7.	Sistema de Transmisión Nacional actual con énfasis en la región Caribe.....	32
Figura 8.	Ejemplos de series de datos con diferente grado o tipo de correlación. ....	35
Figura 9.	Diagrama esquemático de la metodología implementada en el estudio. ....	40
Figura 10.	Localización geográfica de las EMAS en la región Caribe de la red del IDEAM.....	45
Figura 11.	Series de tiempo para los promedios diarios de la radiación solar global en el horizonte de análisis de 5 años (2014-2018). ....	48
Figura 12.	Series de tiempo para los promedios mensuales de la radiación solar global en el horizonte de análisis de 5 años (2014-2018). ....	50
Figura 13.	Valores del índice Oceánico de El Niño.....	51
Figura 14.	Series temporales de los promedios diarios de la velocidad del viento para el horizonte de análisis de 5 años (2014-2018). ....	55
Figura 15.	Series temporales de los promedios mensuales de la velocidad del viento para el horizonte de análisis de 5 años (2014-2018). ....	57
Figura 16.	Curva de potencia característica de aerogenerador vestas v80 de 2 mw de potencia nominal. 61	
Figura 17.	Matriz de coeficientes de correlación para los promedios diarios de la radiación solar global para todos los puntos de medición en la región caribe. ....	66
Figura 18.	Series temporales de los promedios diarios de radiación solar global para las emas con comportamientos complementarios. ....	67
Figura 19.	Matriz de coeficientes de correlación para los promedios diarios de la velocidad del viento para todos los puntos de medición en la región caribe. ....	68
Figura 20.	Series temporales de los promedios diarios de velocidad del viento para las emas con comportamientos complementarios. ....	69
Figura 21.	Matriz de coeficientes de correlación para los promedios diarios de la velocidad del viento y la radiación solar global en todos los puntos de medición en la región caribe. ....	71
Figura 22.	Series de tiempo escaladas de los promedios diarios de la velocidad del viento y la radiación solar global para las estaciones con comportamiento mejor correlacionado ( $0 < r < 1$ ). ....	72

Figura 23.	Series de tiempo escaladas de los promedios diarios de la velocidad del viento y la radiación solar global para las estaciones con comportamiento más complementario ( $0 < r < -1$ ). .....	73
Figura 24.	Mapa geográfico con la distribución de los coeficientes de correlación para los promedios diarios entre la velocidad del viento y la radiación solar global. ....	74
Figura 25.	Matriz de coeficientes de correlación para los promedios mensuales de la radiación solar global en todos los puntos de medición en la región caribe. ....	76
Figura 26.	Series temporales de los promedios mensuales de radiación solar global para las emas con comportamientos complementarios. ....	77
Figura 27.	Matriz de coeficientes de correlación para los promedios mensuales de la velocidad del viento en todos los puntos de medición en la región caribe. ....	79
Figura 28.	Series temporales de los promedios mensuales de la velocidad del viento para las emas con comportamientos complementarios. ....	80
Figura 29.	Matriz de coeficientes de correlación para los promedios mensuales de la velocidad del viento y la radiación solar global en todos los puntos de medición en la región caribe. ....	81
Figura 30.	Series de tiempo escaladas de los promedios mensuales de la velocidad del viento y la radiación solar global para las estaciones con comportamiento mejor correlacionado ( $0 < r < 1$ ). ....	82
Figura 31.	Series de tiempo escaladas de los promedios mensuales de la velocidad del viento y la radiación solar global para las estaciones con comportamiento más complementario ( $0 < r < -1$ ). ....	84
Figura 32.	Mapa geográfico con la distribución de los coeficientes de correlación para los promedios mensuales entre la velocidad del viento y la radiación solar global. ....	86
Figura 33.	Rosa de vientos con resultados de porcentaje de incidencia de la velocidad del viento por sector direccional de la ema la paulina. ....	87
Figura 34.	Distribución de probabilidad weibull para la velocidad del viento para la ema la paulina. ....	88
Figura 35.	Rosa de vientos con resultados de energía eólica teórica generada para el sitio de la ema la paulina. ....	89
Figura 36.	Gráfica con valores de extrapolación de ley exponencial de hellman para velocidades del viento a diferentes alturas y sectores direccionales de la ema la paulina. ....	90
Figura 37.	Rosa de vientos con resultados de energía eólica teórica generada para el sitio de la paulina para una turbina de viento vestas de capacidad nominal de 2 mw. ....	91
Figura 38.	Rosa de vientos con resultados de energía eólica teórica generada para el sitio de paici para una turbina de viento vestas de capacidad nominal de 2 mw. ....	92
Figura 39.	Rosa de vientos con resultados de energía eólica teórica generada para el sitio de incoder para una turbina de viento vestas de capacidad nominal de 2 mw. ....	93
Figura 40.	Emplazamiento del sistema solar fv 285 kwp modelado para el estudio. ....	94
Figura 41.	Producciones normalizadas (por kwp instalado) para la ema carmen de bolívar. ....	95
Figura 42.	Proporción o índice de rendimiento para la ema carmen de bolívar. ....	96
Figura 43.	Producciones normalizadas (por kwp instalado) para la ema incoder. ....	96
Figura 44.	Producciones normalizadas (por kwp instalado) para la ema toromana. ....	97
Figura 45.	Combinación de curvas de producción para la energía eólica y solar. ....	98

Figura 46. Curva de demanda nacional de energía eléctrica para el año 2015..... 99

## Lista de tablas

Tabla 1. Participación promedio regional respecto a la demanda nacional de energía eléctrica. ....	30
Tabla 2. Capacidad instalada (ci) de la región caribe colombiana por tipo de recurso [mw]. ....	31
Tabla 3. Lineamientos adoptados para interpretar los coeficientes de correlación de pearson r. ....	36
Tabla 4. Lista de emas seleccionadas para el estudio de correlación ubicadas en la región caribe. ....	45
Tabla 5. Cantidad y porcentaje de observaciones de las emas seleccionadas .....	47

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos

Símbolo	Término
°C	Grados Centígrados
kWh/m <sup>2</sup>	Cantidad de Energía por unidad de área
m/s	Unidad de rapidez
W	Unidad de potencia
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
Gt	Gigatonelada
Mt	Megatonelada
R(r)	Coefficiente de correlación
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinación
kWp	Kilovatio pico
kWac	Kilovatio nominal o <i>altern current</i>

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
COP	Conferencia de las Partes
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ZNI	Zona No Interconectada
PAS	Planes de Acción Sectoriales
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovables
ENOS	El Niño Oscilación Sur
EMAS	Estación Meteorológica Automática Satelital
XM	Expertos en Mercados
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IEA	International Energy Agency
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CORPOEMA	Corporación de la Energía y Medio Ambiente

---

EPM	Empresas Públicas de Medellín
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NCAR	National Centers for Atmospheric Research
ENFICC	Energía Firme para Cargo por Confiabilidad
MERRA	Modern-Era Retrospective analysis for Research and applications
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
SCADTA	Sociedad Colombo Alemana de Transporte Aéreo
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
PIB	Producto Interno Bruto
QBO	Oscilación Quasi-biennial
TNA	Índice del Atlántico Norte Tropical
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical
STN	Sistema de Transmisión Nacional
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
GIPEM	Grupo de Investigación en Potencia, Energía y Mercados
CC	Corriente continua
FV	Fotovoltaico

## 1. INTRODUCCIÓN

El mundo en su afán de detener el avance del calentamiento global propuso políticas internacionales, comenzando por la Conferencia de las Partes o COP que tuvo su primera versión en Berlín en 1995, donde los países que participan se reúnen anualmente con el fin de realizar un análisis de los avances sobre los compromisos asumidos por los países miembros. Fue hasta 2015 en la COP21 conocida como La Conferencia Climática de París que, por primera vez en más de 20 años de negociaciones de la ONU, se planteó lograr legalmente un acuerdo vinculante y universal sobre el clima, con el objetivo principal de mantener el calentamiento del mundo por debajo de 2°C (Sustainable Innovation Forum, 2015). En ese contexto, Colombia se comprometió a contribuir con el objetivo global de imponer estrategias y medidas para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% en comparación con las emisiones proyectadas para 2030, a pesar de que el país es responsable de solo el 0,46% de las emisiones globales (García Arbeláez, Barrera, Gómez, & Suárez Castaño, 2015).

Colombia en la COP21 se propuso abordar la problemática del cambio climático de la forma más balanceada posible, incluyendo la mitigación, adaptación y los medios de implementación, por lo cual asumió diferentes compromisos a través de los Planes de Acción Sectoriales (PAS), identificando acciones claves en los diferentes sectores a corto, mediano y largo plazo. Uno de esos sectores es la base de este estudio, el sector energético, que en el PAS se aborda mediante la promoción de la eficiencia energética en todos los sectores de producción a través de energías renovables no convencionales y una gestión más eficiente de la energía (García Arbeláez et al., 2015). En línea con esta acción, el Congreso de la República emitió la Ley 1715 el 13 de mayo de 2014, con la cual se busca integrar la energía no convencional, particularmente la energía renovable, en el mercado eléctrico colombiano y las Zonas No Interconectadas (ZNI), con el fin

de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar la seguridad del suministro y promover la eficiencia energética (Hoyos Gómez, 2016).

Las principales fuentes que conforman el parque de generación de energía eléctrica de Colombia actualmente, está conformada por plantas hidroeléctricas con una participación del 67,96%, seguido por las plantas térmicas con una contribución del 29,47%(UPME, 2021), lo que evidencia la alta dependencia del recurso hídrico, poniendo al país en riesgo regular de escasez y altos precios dada la necesidad de la intervención de la capacidad instalada de generación térmica. Adicional a la hidrodependencia que presenta el país y teniendo presente como modelo los países desarrollados donde la tendencia de crecimiento se le asocian la inversión en proyectos de avances tecnológicos, permitiendo el amplio desarrollo e implementación de otro tipo de fuentes de energía, siendo el fin último el de fortalecer y diversificar la matriz energética (Ballenilla García de Gamarra, 2005; Corte, Sierra, & Valencia, 2015), por lo que Colombia se plantea la necesidad de una diversificación de la matriz de generación, centrando el interés en otros tipos de fuentes de energía de naturaleza renovable no convencional. Para ello, la entidad nacional encargada de planificar el sistema eléctrico, la Unidad de Planificación Minero Energética (UPME) dentro de sus estudios incluidos en los planes de expansión, incorporó la evaluación en diferentes escenarios en los que agrega las Fuentes No Convencionales de Energías Renovables (FNCER), desplazando la energía generada por las plantas térmicas de acuerdo a lo presentado en los escenarios 9, 10 y 11 del Plan de expansión 2014-2028 (UPME, 2015), (UPME, 2019b).

La UPME, en el Plan Energético Nacional 2020-2050, planteó dos escenarios, el primero titulado **el “escenario 266”**, que analiza el impulso a las fuentes no convencionales de energía, tanto en la generación de electricidad como en sectores de consumo, direccionando los esfuerzos en la **incorporación de tecnologías más limpias y eficientes**. El **segundo escenario o nombrado “nuevas apuestas”**, en el que se **plantearon los retos de llevar el sistema energético al límite, buscando la mayor penetración de fuentes renovables**, permitiendo electrificar la economía, con ello la política de eficiencia energética apuntaría a una fuerte incorporación de nuevas tecnologías y de energéticos más limpios (UPME, 2019b).

Buscando cumplir con los escenarios planteados por los planeadores del sistema eléctrico de Colombia, se han explorado las fuentes energéticas de origen renovable, obteniendo como

---

resultado que el país tiene un gran potencial para el desarrollo de FNCER donde destaca la región Caribe con el potencial de energía eólica, exhibiendo valores máximos de velocidades del viento que varían alrededor de los 5 m/s en el centro y sur de la región, en cuanto el potencial solar incidente en la península de La Guajira presentando con una radiación solar anual de 6,0 kWh/m<sup>2</sup> y diez horas diarias de sol en promedio (UPME & IDEAM, 2005), y el potencial de biomasa, con una producción anual sobre los 5 Mt de bagazo de caña de azúcar, 457.000 toneladas de cascarilla de arroz y un total de 29 Mt de biomasa de residuos provenientes de la agricultura (Castillo, Castrillón Gutiérrez, Vanegas-Chamorro, Valencia, & Villicaña, 2015; Radomes & Arango, 2015).

La diversidad de recursos energéticos que presenta la región Caribe, desde una perspectiva a gran escala, en el ejercicio de la generación de energía eléctrica, éstos se pueden convertir en competidores para el abastecimiento de la demanda con respecto a otros tipos de fuentes. Haciendo referencia solamente a la disponibilidad del potencial eólico de la región, la cual es 10 veces más que la disponibilidad que posee los recursos hídricos de la tierra (Qin, Li, & Xiong, 2011)

Basado en el potencial para desarrollar las FNCER en Colombia, este estudio se centra en el análisis del potencial de energía eólica y solar, fundamentado en los resultados de la primera subasta de FNCER a través de la UPME, donde se asignaron responsabilidades de generación a ocho proyectos con una capacidad efectiva total de 1.298 MW de capacidad instalada, 5 de ellos eólicos y 3 solares (UPME, 2019a), resaltando la importancia de este trabajo.

Según el Informe de Registro de Proyecto de Generación de Electricidad presentado por la UPME con corte al 31 de diciembre de 2020 (UPME, 2020a), se encuentran registrados un total de 325 proyectos vigentes en diferentes etapas de avance, de los cuales 20 corresponden a proyectos eólicos y 220 a proyectos solares, representando estos últimos un gran avance y mayor importancia en materia del desarrollo del recurso. Para la región Caribe, se reportan en total 107 de los 325 proyectos reportados en todo el país, representando cerca de 33% de los proyectos a nivel nacional, los cuales se distribuyen en 22 para el Atlántico (1 proyecto eólico y 21 solares), 3 proyectos eólicos y 17 solares en Bolívar, 13 proyectos solares en Cesar, igual que en Cesar en

Córdoba solo se registran proyectos solares sumando en total 16 proyectos, para La Guajira se registraron 13 proyectos eólicos y 4 solares, en Magdalena solo se registran 5 solares y por último en Sucre se reportaron 10 proyectos con aprovechamientos solares. En cuanto a la capacidad instalada de los proyectos registrados, se destaca el departamento de La Guajira con 3.320 MW distribuidos en el aprovechamiento de las diferentes FNCER, seguido del departamento del Magdalena con 1.667 MW, en el tercer lugar se ubica el departamento del Cesar con 983 MW registrados, luego se encuentra Atlántico con una potencia de 931 MW, le sigue Bolívar con 711 MW, en Córdoba se registran 358 MW y por último se ubica Sucre con 125 MW de capacidad instalada registrada, sumando en total 8.095 MW la capacidad instalada total para los proyectos reportados en la UPME en la región Caribe, teniendo en cuenta que para todo el país se registraron en total 16.130 MW distribuidos entre los diferentes tipos de fuentes, por lo que la región Caribe representa cerca del 50% de potencia instalada proyectada para los proyectos eólicos y solares registrados en la UPME, significando ésta en un área clave para el desarrollo y aprovechamiento de este tipo de energías.

Reconocida la región Caribe de Colombia, como un área con alto potencial de recurso eólico y solar, la convierte en objetivo de este estudio. No obstante, identificando los altos valores presentes en el norte del país, esta zona puede ser considerada estratégica para el desarrollo de proyectos eólicos y solares, sin embargo, como señalan los autores del trabajo **“Complementariedades Anuales e Interanuales de Fuentes de Energías Renovables en Colombia”** (Heno, Viteri, Rodríguez, Gómez, & Dyner, 2020) el aprovechamiento de dichos recursos podría no ser una solución definitiva para los efectos adversos producidos por fenómenos de escala global como la fase cálida de El Niño Oscilación Sur (ENOS), aunque dentro del estudio no se realiza la evaluación intra anual, los autores consideran conveniente para futuros estudios ampliar la ventana temporal y así dentro de los análisis incorporar los efectos de los eventos de variabilidad climática de orden superior como el ENOS tanto en su fase cálida como en la fría.

Dentro de la literatura consultada, no se han encontrado estudios de complementariedad para los dos recursos en el país, por ello se plantea identificar la existencia de posibles comportamientos complementarios entre ellos, de manera de poder obtener una producción

continúa de energía al aprovechar **ambas fuentes al tiempo o identificar un “suavizado”**<sup>1</sup> en sus disponibilidades, por lo que se realizará inicialmente una caracterización de los recursos, evaluando sus disponibilidades, estacionalidades y comportamientos en el tiempo e identificando posibles áreas de aprovechamiento para la conversión a energía eléctrica.

El presente documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: la sección 2 presenta las razones que llevaron a plantear el desarrollo del análisis, las preguntas de investigación, los objetivos específicos y el objetivo general del estudio; la sección 3 ofrece el estado del arte con los antecedentes desde nivel mundial hasta el local, una descripción del área de estudio mediante la caracterización de su clima, topografía y condición de la red eléctrica, finalizando esta sección con una breve descripción de los coeficientes de correlación de Pearson; para la sección 4 se presenta la metodología utilizada en el estudio; en la sección 5 se exhiben los resultados de las correlaciones para las fuentes en evaluación por medio de las matrices de coeficientes, las gráficas o correlogramas de las series de tiempo para las Estaciones Meteorológicas Automáticas Satelitales – EMAS, mapas de correlación y los resultados energéticos estimados, la sección 6 muestra las principales conclusiones del estudio; la sección 7 propone futuros trabajos y consideraciones para tener en cuenta y la sección 8 lista las referencias utilizadas para el estudio.

---

<sup>1</sup> Consiste en un efecto presentado cuando se reduce la variabilidad en las disponibilidades de los recursos cuando se analizan en la dispersión y combinación de éstas.

## 2. ANTECEDENTES

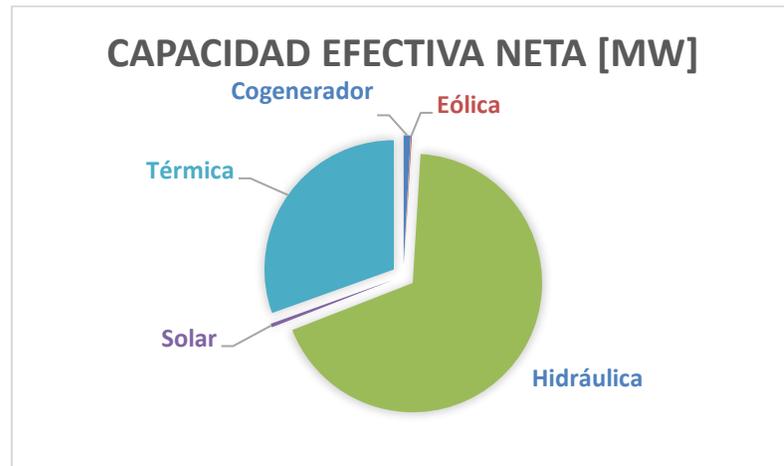
### 2.1. Justificación

La matriz eléctrica colombiana depende en gran medida de la energía hidroeléctrica, la desagregación porcentual indica que la hidroelectricidad tiene una participación del 68,1 %, la generación termoeléctrica de 30,5 %, y el porcentaje restante está constituido por energía eólica con 0,1 %, solar con 0,5 % y cogeneración con 0,9 % como indica la Figura 1. La característica de hidrodependencia de la matriz eléctrica la hace vulnerable ante riesgos climatológicos como el evento El Niño Oscilación del Sur<sup>2</sup>. Durante el fenómeno de El Niño se presenta una disminución en la precipitación y, en consecuencia, en los caudales medios mensuales de los ríos de Colombia, asimismo, se presenta una disminución en la humedad del suelo y en la actividad vegetal (Poveda, Jaramillo, Gil, Quiceno, & Mantilla, 2001; Poveda & Jaramillo, 2000; Poveda, Ramírez, & Jaramillo, 2001). Las anomalías hidro-climáticas presentan alguna variabilidad regional y temporal, que están asociadas a efectos adversos en la agricultura y la generación de electricidad (Poveda, Mesa, & Waylen, 2003).

---

<sup>2</sup> ENSO, por sus siglas en inglés

Figura 1. Participación por tecnología en la matriz de generación de energía eléctrica de Colombia.



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de XM (X M, 2021).

Es así, como en los años 1991 y 1992 se evidenció un evento de El Niño prolongado, según se puede observar en la Figura 2, la cual muestra el Índice Oceánico del Niño<sup>3</sup>, que representa un índice primario del seguimiento al patrón del ENSO, cuyos valores en rojo indican la presencia de la fase cálida del ENSO, evento que dio inicio en el segundo trimestre de 1991 con una duración de un año, afectando significativamente los niveles de los embalses, hasta provocar racionamiento en la producción de electricidad.

Figura 2. Valores del índice Oceánico de El Niño.

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	<b>0.8</b>	<b>1.2</b>	<b>1.5</b>
1992	<b>1.7</b>	<b>1.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.3</b>	<b>1.1</b>	<b>0.7</b>	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1

Fuente:(NOAA, 2021)

Con la intención de no repetir estos hechos, fue necesario el incremento en la generación térmica donde se construyeron nuevas plantas en la década de 1990. Durante los años 1993-2000, la composición del parque generador pasó de un 80 % de participación hidráulica y 20 % térmica, a

<sup>3</sup> ONI por sus siglas en inglés.

un 68 % y 32 % respectivamente (OCHOA, 2001) que a hoy día estos porcentajes siguen muy similares.

Frente a los fenómenos climatológicos que tienen un impacto negativo en el sector eléctrico, las instituciones que lo dirigen podrían tomar decisiones que consideren una combinación de recursos energéticos más intensivos en carbón ya que el territorio nacional cuenta con reservas significativas de este mineral, de ese modo suplir la demanda eléctrica que la hidroelectricidad no puede satisfacer. La expansión de la generación eléctrica basada en carbón daría como resultado un incremento en la huella de carbono (Vergara et al., 2010) además de un incremento en los costos por kWh debido a al mantenimiento de las plantas térmicas.

Aunque el porcentaje de participación de la energía térmica en la matriz eléctrica se ha incrementado en los últimos años, Colombia no hace parte del conjunto de países responsables de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> equivalente, de hecho, Colombia ocupa el lugar 40 en el ranking mundial de países que emiten Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Viviana & Castillo, 2019). Las emisiones relacionadas con el sector energético representan el 36 % del total de emisiones. Este porcentaje es causado por el uso de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y por la quema de combustibles en la producción y refinación de petróleo y gas. Entre 1990 y 2006, las emisiones de GEI crecieron anualmente 2,5 % y entre 2006 y 2010 crecieron anualmente 6,3 % (IDEAM et al., 2016), prestando atención al aumento en la generación térmica para el año 1998 debido a la presencia de El Niño 1997-1998 que afectó el comportamiento hidrológico ocasionando reducciones en los caudales de los ríos como también evitando un evento como el ocurrido en 1992 (IDEAM, 1997), además donde los impactos de este fenómeno impulsaron las primeras investigaciones orientadas al análisis de las alteraciones y volúmenes mensuales de las precipitaciones de las diferentes regiones naturales del país (IDEAM, 2007).

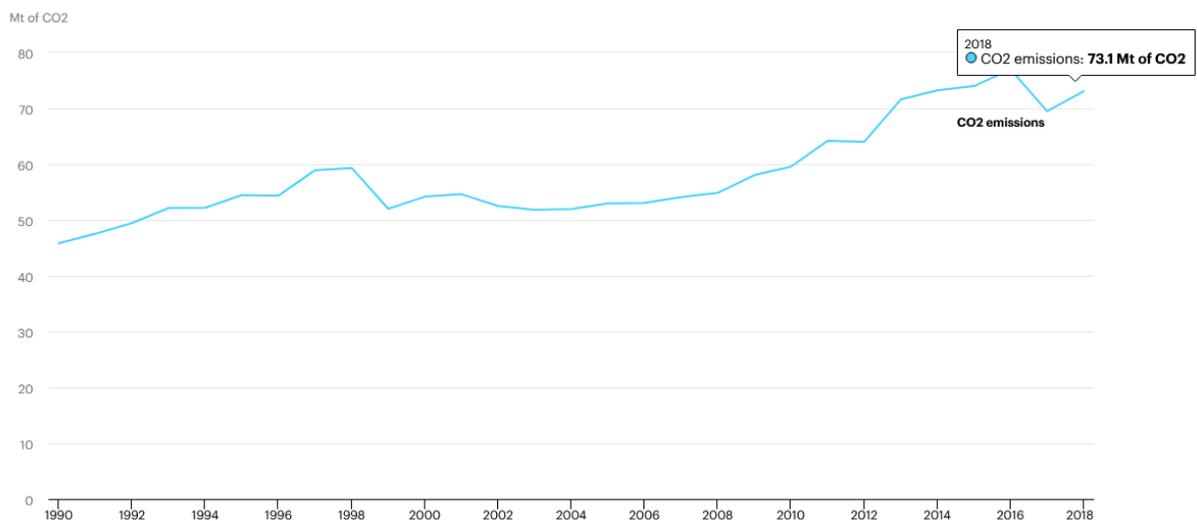
Según la Agencia Internacional de Energía<sup>4</sup>, las emisiones de GEI en Colombia presentaron un aumento de 45,79 Mt de CO<sub>2</sub> en 1990 a 73,1 Mt en 2018, como muestra la Figura 3 (International Energy Agency, 2021). Tal crecimiento indica que el desarrollo económico tiene un efecto directo en el incremento del nivel de emisiones; por lo tanto, las instituciones sectoriales deberán actuar

---

<sup>4</sup> IEA, por sus siglas en inglés

en consecuencia, particularmente, porque los últimos gobiernos han ratificado los compromisos a nivel mundial en la lucha contra el cambio climático. A nivel global las plantas de generación de energía eléctrica a base de carbón fueron las principales responsables del crecimiento de las emisiones en 2018, con un incremento de 2,9 % o 280 Mt, comparado con los niveles en 2017 excediendo los 10 Gt por primera vez. Como un resultado, la generación de electricidad a base de combustión de carbón representó el 30 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (International Energy Agency, 2021).

**Figura 3.** Emisiones de CO<sub>2</sub> para Colombia en el período de años comprendido entre 1990 a 2018.

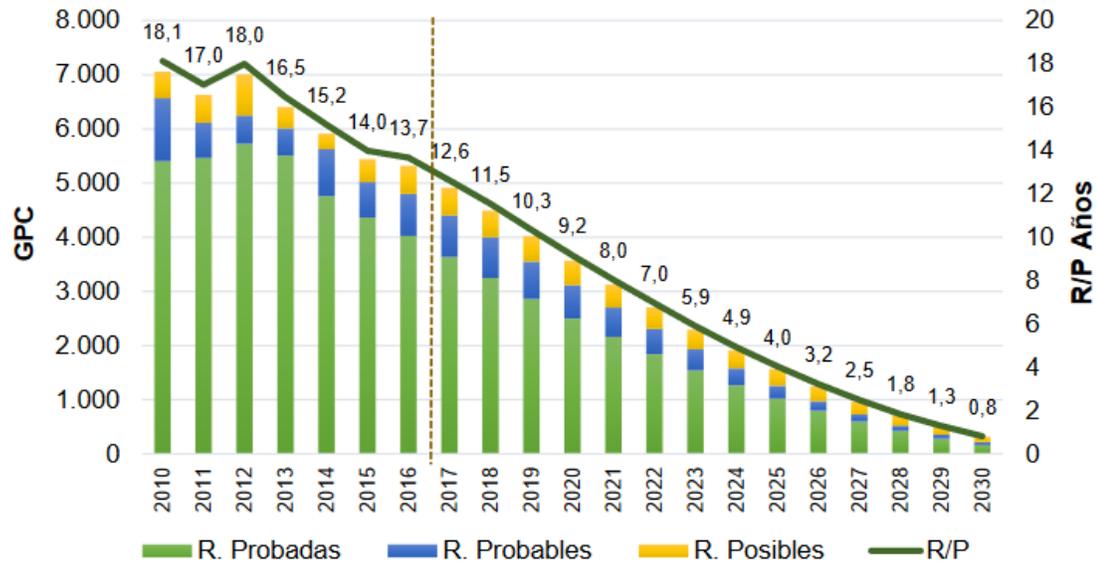


Fuente: (International Energy Agency, 2021).

Si bien las plantas termoeléctricas funcionan con diferentes tipos de combustibles fósiles, siendo el gas natural el más utilizado con una participación de 13,33 % seguido por el carbón con 9,55 % y el diésel con 7,82 %. Esta situación es preocupante porque las reservas de gas natural tienen un horizonte temporal de consumo de seis años. La UPME reportó en 2016 que las reservas de gas natural eran de 5.320,78 GPC (Giga Pies Cúbicos), de las cuales 4.023,67 correspondían a reservas probadas, 774,87 GPC a reservas probables y 522,23 GPC a reservas posibles (UPME, 2017). En 2018, las reservas probadas cayeron en 2,9 %, reduciendo la disponibilidad de las reservas en 1,9 años (Bohórquez Guevara, 2019), además, la curva de explotación de reservas (ver Figura 4)

muestra una disminución notoria de gas natural, donde se estima una relación en las reservas de producción de gas a 2017 de 12,6 años, valor que se reduce a 4 años en 2025 y a 1 año en 2029 (UPME, 2017). Situación que prende las alarmas en cuanto a la afectación de la generación térmica a base de gas como respaldo de la hidráulica en condiciones de baja hidrología o eventos como El Niño, siendo necesario voltear la mirada a combustibles como el carbón, a raíz de las grandes reservas con las que cuenta el país.

Figura 4. Curva de producción nacional de reservas de gas.



Fuente: (UPME, 2017).

Pensar en aumentar la capacidad instalada de generación térmica del país, como una garantía de respaldo de la hidroelectricidad, sería una solución en contravía a los objetivos planteados de Colombia durante el COP21 donde se comprometió a reducir sus emisiones de GEI en un 20 % en el año 2030 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015; United Nations Climate Change, 2015).

Por otro lado, aumentar la capacidad instalada mediante el planeamiento para la construcción de otro tipo de plantas que aprovechan los recursos renovables no convencionales juegan un papel

importante para la resiliencia del parque generador del país como también los aspectos que ya se han mencionado y que podrían desempeñar un rol fundamental para incentivar el desarrollo de energías renovables, tales como la vulnerabilidad ante el cambio climático, donde según modelos existentes, debido a las consecuencias del cambio climático se prevé una disminución en las precipitaciones en diversas áreas de Colombia, esto tendría un impacto negativo en la generación de electricidad mediante centrales hidroeléctricas, ya que disminuirán los caudales afluentes y los volúmenes útiles de las centrales (CorpoEma, 2010; López et al., 2013).

Además de la variabilidad climática también como se mencionó anteriormente, la amenaza que se presenta con periodicidad ante la presencia de El Niño causando grandes sequías por la disminución de las precipitaciones afectando la sensibilidad en los niveles de los caudales de los ríos que fluyen a través de las centrales hidroeléctricas del país, donde se hace necesario un respaldo de la energía térmica pero al mismo tiempo generando el riesgo en el incremento en la huella de carbono, debido a que se espera un aumento en el nivel de emisiones a lo largo del crecimiento de la economía del país, aunque si bien la matriz de generación no es gran emisora de GEI para un futuro debería reducir las emisiones del sector con miras de no utilizar generación térmica mediante la quema de combustibles fósiles. Adicional a los problemas de emisiones que presentan las centrales térmicas, existe prevención sobre la escasez de gas natural en el país, dado que las centrales térmicas funcionan principalmente a gas, hay preocupación en el sector eléctrico sobre un déficit de gas natural en el país (UPME, 2015).

Teniendo en cuenta estos factores que afectan la matriz de generación de energía eléctrica del país, como directamente la seguridad energética y la disponibilidad ininterrumpida de las fuentes de energía a un precio asequible, donde si nos enfocamos en el largo plazo, surgen dos características inherentes sobre el concepto de seguridad energética que deberían tener las fuentes de energía que pretendan entrar a respaldar la seguridad energética del país. En primer lugar, la confiabilidad en el suministro y por otro lado un precio bajo, lo más competitivo posible y además estable en el tiempo. Es por esto por lo que se hace necesario la diversificación de la matriz de generación de energía eléctrica para así, poder reforzar la seguridad energética y convertir el sistema de energía eléctrica del país en un sistema resiliente.

Con la finalidad de la diversificación de la matriz de energía eléctrica, surge el interrogante de qué otras fuentes energéticas que no acarreen los problemas antes mencionados puedan ser utilizados para incluirlos dentro del portafolio de generación del país, los cuales cumplan los características de confiabilidad en el suministro y bajos precios, para ello y como objetivo de este estudio, las fuentes energéticas renovables no convencionales como la energía eólica y la solar aparecen en contexto con una ventaja significativa en cuanto la complementariedad que puede existir con la energía hidráulica durante los períodos de la presencia de El Niño y otros fenómenos que ponen en riesgo la hidrología del país, donde menos precipitaciones podrían complementarse con fuertes vientos y altos niveles de radiación solar que hacen presencia en la región Caribe colombiana.

Así mismo, al estudiar las disponibilidades de los recursos renovables para la determinación de sus posibles comportamientos complementarios, aborda el panorama para el estudio de sus series de tiempo con el fin de identificar y establecer las estacionalidades, para luego realizar los análisis y obtener los pronósticos a lo largo del tiempo siendo esta información un insumo clave para los perfiles de generación de las plantas que aprovechen este tipo de fuentes variables.

## 2.2. Preguntas de Investigación

- ¿De qué modo la distribución temporal, geográfica, estacional e interanual de los recursos eólicos y solares se complementan en territorio de la región Caribe colombiana?
- ¿Cómo es el comportamiento de los recursos eólico y solar sobre el Caribe comprendido entre el horizonte de análisis?
- ¿Se puede reducir la variabilidad que presentan los recursos renovables no convencionales al estudiar una ventana temporal más amplia?
- ¿Al estudiar los datos históricos de las fuentes energéticas en una escala temporal horaria puede contribuir a una construcción de pronósticos como insumo primordial para las plantas de generación que utilicen este tipo de fuentes?
- **¿Es posible “suavizar” la curva de producción energética si se aprovechan conjuntamente las fuentes eólica y solar en lugar de emplear cada fuente por separado?**
- ¿Cómo es la producción de energía eólica y solar teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos naturales para el territorio de La Guajira colombiana?
- ¿Es posible que la complementariedad de la energía eléctrica generada mediante los recursos solares y eólicos contribuya a la demanda nacional?
- ¿puede ser la complementariedad más fuerte si se analizan períodos de tiempo más amplios?

### 2.3. Objetivo general

- El principal objetivo es aplicar una metodología que permita analizar el grado de complementariedad entre los recursos eólicos y solares de la región Caribe colombiana para un horizonte temporal comprendido de 5 años. Los análisis están basados en datos meteorológicos medidos *in-situ* mediante EMAS para velocidades de viento y radiación solar global de las estaciones pertenecientes a la red de estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM ubicadas a lo largo y ancho de la región Caribe.

### 2.4. Objetivos específicos

- Caracterizar la disponibilidad de los recursos eólicos y solares con los que cuenta la región Caribe de Colombia a distintas escalas de tiempo a partir de información obtenida por las EMAS pertenecientes a la red de estaciones del IDEAM.
- Analizar la posible complementariedad a diferentes escalas de tiempo (intra-anual e inter-anual) entre los recursos eólicos y solares.
- Dar respuesta a las necesidades de generación de energía eléctrica en momento de baja hidrología, también, comprender cómo la diversificación de la matriz energética se refleja directamente en la seguridad energética del país.
- Aplicar modelos para estimar la energía eólica y solar que pueden ser generada de los recursos existentes en la región Caribe.

## 3. ESTADO DEL ARTE

### 3.1. Antecedentes

Dentro de la literatura consultada, en los últimos años algunos estudios han sido llevados a cabo por diferentes investigadores de diferentes latitudes con la intención de conocer las relaciones que pueden llegar a tener los recursos eólicos y solares, además de su contribución en la canasta de generación de energía eléctrica. Esto, dado a que son recursos con fuentes inagotables en el tiempo como también amigables con el ambiente. A continuación, una breve descripción de los últimos y más relevantes estudios científicos encontrados en la literatura sobre el objeto del estudio son presentados desde el nivel mundial hasta llegar a los estudios realizados a nivel regional:

#### 3.1.1. Estudios de complementariedad a nivel mundial

De los estudios de complementariedad entre el recurso solar y eólico se destacan, a nivel mundial Yi Li *et al.* Donde presentan un análisis de la complementariedad entre los recursos eólico y solar correlacionados con la demanda de electricidad para dos zonas costeras en Australia; confirmando que las áreas costeras de Australia están expuestas a fuertes vientos y combinando los recursos eólicos y solares pueden proveer un mejor emparejamiento con la demanda de electricidad. Los autores de esta investigación llegaron a la conclusión de que los patrones de viento muestran valores altamente consistentes durante la noche y la mañana, mientras el recurso solar garantiza un pico de durante la tarde, además concluyen también que el nivel de complementariedad depende profundamente sobre la locación (Li, G. Agelidis, & Shrivastava, 2006).

Otro estudio realizado en cinco sitios distribuidos en la Isla Córcega ubicada en el Mediterráneo, por Gilles Notton *et al.* Donde tienen como objetivo mostrar un estudio preciso del potencial de energía renovable antes de implementar un sistema de energía renovable híbrido de energía fotovoltaica/eólica para locaciones remotas. El potencial de energía eólica y solar para la isla son exhibidos y la complementariedad de estos dos recursos es discutida. Mostrando cómo los sistemas híbridos son una buena opción para implementar en lugares remotos por su alto desempeño aprovechando ambos recursos, en lugar de considerar sistemas solares fotovoltaicos o sistemas eólicos por separado (Notton, Diaf, & Stoyanov, 2011).

Joakim Widén, miembro de IEEE llevó a cabo un estudio en 2011 para un escenario futuro en Suecia con las correlaciones a gran escala de energía solar y eólica utilizando datos climáticos cubriendo un periodo de ocho (8) años con una resolución horaria; Widén destaca la importancia de estudiar la variabilidad temporal, coincidencia y correlaciones entre las fuentes energéticas. El autor del estudio demostró cómo la energía eólica y solar son correlacionadas negativamente en todas las escalas de tiempo a una escala nacional, desde una resolución horaria hasta la anual, pero que la correlación es más fuerte para totales mensuales debido a las variaciones sistemáticas y opuestas en la disponibilidad estacional; y que además, combinando los dos tipos de energéticos se reducen las variaciones totales en términos de desviación estándar, pero que hora a hora la variabilidad es siempre alta con una gran cantidad de participación de energía solar debido las rápidas fluctuaciones que se presentan con este recurso . Asimismo, el estudio reveló un efecto de suavizado en la salida agregada resultante de la dispersión de las unidades de generación de energía solar, pero más bajo que el de la energía eólica dada la variabilidad sistemática del recurso solar (Widen, 2011).

Por último y no menos importante, de la Universidad de Waterloo en Canadá, (Hoicka & Rowlands, 2011) quienes desarrollaron un estudio de la complementariedad de los recursos eólicos y solares cuestionando si dichos recursos en ciertas locaciones de Ontario sirven para **“suavizar” la producción de energía disminuyendo los picos cuando se analizan las producciones de cada recurso por separado, además de comprender cómo este “suavizado” puede mejorar si se dispersan estos recursos a lo largo de diferentes regiones geográficas y por último si**

**incrementando el número de locaciones de energía solar y eólica “suaviza” la producción de energía.** Donde para resolver dichos interrogantes utilizaron datos de mediciones horarias de irradiancia solar y velocidades del viento del conjunto de datos de energía e ingeniería climáticos canadienses (CWEEDS, por sus siglas en inglés) para un horizonte temporal de tres (3) años (2003-2005) utilizados para derivar unos índices adimensionales para cuatro ubicaciones en Ontario (Toronto, Wivb arton, Sault Ste. Marie y Ottawa). Estos índices fueron utilizados para desarrollar tres métodos de análisis: (1) representación gráfica; (2) rango por percentil; y (3) utilizando un máximo teórico como un indicador por capacidad. Esta investigación concluyó que **la combinación de energía solar y eólica dentro de las ubicaciones y entre dos ubicaciones mejora el “suavizado” en la producción de energía, en comparación de cuando cada recurso se produce por sí solo;** además, se mejora aún más una vez que se combinan más de dos recursos y dos ubicaciones.

### 3.1.2. Complementariedad regional en Suramérica

A nivel regional (Latinoamérica) (Schmidt, Cancelli, & Pereira, 2016) evaluaron cómo grandes cantidades de producción de electricidad renovable pueden mantenerse en el sistema eléctrico brasileño, mientras se reducen los riesgos hidrológicos debido a su matriz energética hidro dependiente. Se enfocaron en una perspectiva a largo plazo simulando un horizonte temporal de 36 años de producción de energía renovable de datos meteorológicos, evaluando las características estadísticas de diferentes portafolios, y utilizando un modelo de optimización, balanceando el suministro y demanda mensual en diferentes portafolios tecnológicos. Donde los resultados de aplicar el modelo indican que adicionar la energía solar fotovoltaica y la eólica al sistema, podría disminuir la necesidad del soporte de la energía térmica y el riesgo de deslastre de carga, además, como la variabilidad total del suministro renovable decrece significativamente en comparación a un escenario que adiciona solo hidroenergía al sistema.

Otros autores como (Chaer et al., 2014) llevaron a cabo un estudio de complementariedad para la Fundación Julio Ricaldoni, en el territorio de Uruguay; donde se tuvo como objetivos principales, analizar las complementariedades de los recursos eólico, solar e hidráulico en su

aplicación a la generación de energía eléctrica. El trabajo presenta entonces un modelado estocástico de los recursos con énfasis en captar las variabilidades inherentes de estos recursos y sus complementariedades. Con dichos modelos se realizó una expansión óptima del sistema de generación con base a parques de energía eólica, solar y centrales de generación a gas naturales en el horizonte 2020 - 2040.

### 3.1.3. Estudios de complementariedad en Colombia

Por último, a nivel nacional y debido a que los estudios que se han adelantado sobre los recursos renovables en Colombia, concretamente en el departamento de La Guajira, no incluyen el componente solar, en ninguno de estos, además, que se han centrado en esa zona en específico, se ha pensado en incluir el recurso solar y ampliar la zona de estudio a toda la región Caribe dentro de la investigación. Siguiendo una breve descripción de los últimos y más relevantes estudios científicos encontrados sobre los recursos energéticos en el país y en el orden cronológico:

Un estudio realizado por Franco y Dyner, de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, se enfocaron más a la economía de los mercados de energía que sobre la complementariedad misma, modelaron un portafolio de generación eólica, hidráulica y térmica con datos de EPM para el año 2004 (FRANCO BARRERA & DYNER R., 2004). Los investigadores determinaron que las compras de energía en el mercado spot disminuirían considerablemente para EPM, especialmente en las ocurrencias de El Niño, debido a la alta producción de energía eólica en La Guajira en periodos con baja generación hidráulica.

El primer trabajo sobre la complementariedad como objeto principal de estudio, se encontró en El Banco Mundial mediante un estudio realizado por Vergara et al. En 2010 (Vergara et al., 2010) con la finalidad de proveer a los operadores del mercado de energía en Colombia un panorama de la energía eólica en el país. Entre algunos otros análisis, una examinación de complementariedad fue llevada a cabo. Los datos de producción horaria tomados de XM entre

2004 y 2009 para el parque eólico Jepírachi, fueron combinados con datos horarios de viento de una estación meteorológica cercana (Puerto Bolívar, @ 10m, 1986 - 2008) para realizar una regresión de la generación de energía del parque eólico. Velocidades de viento medias mensuales fueron calculadas y graficadas después con caudales medios mensuales de cuatro (4) ríos, ubicados en diferentes regiones del país y con diferentes patrones intra-anales. Llegando a la conclusión de que la operación conjunta de las plantas de energía eólica e hidroeléctricas exhiben una fuerte complementariedad, que no es recompensada en el actual sistema regulatorio adoptado por Colombia.

En 2010, la compañía consultora colombiana CORPOEMA (Corporación de la Energía y Medio Ambiente) desarrolló un extenso estudio con tres (3) reportes. En el tercer reporte (CorpoEma, 2010), juntas complementariedades de los recursos eólicos y solares fueron cortamente exhibidas. En el lado eólico, y basado en una gráfica mostrada por EPM (donde la energía eólica mensual del parque eólico Jepírachi es presentada con la disponibilidad mensual del recurso hídrico en la cuenca Magdalena-Cauca), el estudio menciona como las velocidades de viento en La Guajira son grandes de enero a abril. Basado en datos de XM, esto también indica como el pico de potencia producida por el parque eólico (a las 3:00 p.m.) está entre el pico secundario (a las 11:00 a.m.) y el pico principal (a las 7:00 p.m.) de la demanda de energía nacional diaria. En el lado solar, el estudio de CORPOEMA establece que no hay información disponible sobre el recurso solar interanual para Colombia. Sin embargo, basados en dos mapas de la insolación solar diaria (uno para la media anual y uno para la media de enero), el estudio señala cómo los incrementos del recurso solar en algunas áreas en enero, podría contribuir a la matriz de generación de energía eléctrica. Además, también menciona cómo la energía solar lograría asistir al pico secundario de la demanda nacional diaria, debido al comportamiento sinusoidal natural de la energía solar, pero no al pico principal.

En 2011 Ealo Otero realizó mediante su tesis de maestría en La Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (EALO OTERO, 2011), entre algunos otros interesantes análisis y recomendaciones, un detallado estudio de complementariedad llevado a cabo por primera vez. Se mencionan unos pasos de interés de este estudio: se obtuvo la información de velocidades del viento de la estación meteorológica Puerto Bolívar y los caudales medios mensuales de 14 ríos,

para luego calcular los coeficientes de correlación de Pearson's entre esta información. Luego, también se utilizaron datos del Reanálisis NCEP/NCAR5 para un punto en La Guajira, posteriormente calculando los coeficientes de correlación entre éste y la estación Puerto Bolívar. **Similarmente como el primer punto de partida, los coeficientes de correlación de Pearson's entre los caudales medios mensuales de seis (6) ríos fluyendo mediante cinco (5) plantas hidroeléctricas y un (1) proyecto de ISAGEN y las velocidades de viento medias mensuales de Puerto Bolívar fueron encontrados.**

En 2012, Robinson et al., del Instituto para Estudios de Energía de Oxford, publicó un artículo donde la correlación entre velocidades de viento en la estación Puerto Bolívar y la anomalía de la temperatura de la superficie del mar (El Niño) fue analizada consiguiendo un coeficiente de correlación mensual de 0,274. Además, el estudio concluye como el cargo por confiabilidad está diseñado para favorecer a las plantas térmicas del país y no a las plantas con fuentes no convencionales de energía. De igual manera, dado a que los costos de la implementación de la energía eólica tienden a disminuir y la necesidad de aumentar capacidad adicional, resulta importante calcular el ENFICC (Energía Firme para Cargo por Confiabilidad) de la energía eólica y de otras fuentes no convencionales de energía. Esto es importante para asegurar que el sistema eléctrico construya una combinación óptima de plantas de energía lo cual no sucede dado si el ENFICC es medido inadecuadamente (Robinson, Riascos, & Harbor, 2012).

Mediante la publicación oficial de plan de referencia de expansión de generación y transmisión 2014-2028 por la UPME, donde la energía eólica en La Guajira es extensamente exhibida. Velocidades de viento horarias de un mástil meteorológico ubicado en la Guajira (@80m, de 2012 a 2014, **propiedad de un proyecto realizado por Jemeiwaa Ka'i) donde comparó los datos de viento de un punto de reanálisis de MERRA en La Guajira. Los coeficientes de correlación horarios y diarios con valores sobre 0,70 fueron encontrados. Además, las velocidades de viento del mástil meteorológico fueron extendidas utilizando el punto de MERRA<sup>5</sup> de 1994 a 2014 y extrapolando a 90 m y 120 m con un coeficiente de Hellman  $\alpha$  de 0,25. Basado en esto, con una**

---

<sup>5</sup> Hace referencia al Análisis retrospectivo de la era moderna para investigación y aplicaciones MERRA (por sus siglas en inglés, The Modern-Era Retrospective análisis for Research and Applications) es un grupo de datos publicado en 2009. Está basado en una versión del sistema de asimilación de datos atmosféricos GEOS-5 que fue congelado en 2008. Con un período de datos de 1979 a febrero de 2016 y producido en una malla de 0.5° x 0.66° con 72 capas. Para más información: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/>

densidad de aire de  $1,15 \text{ kg/m}^3$  y con 15 % de pérdidas, la producción de energía de 474 MW de energía eólica es calculada y graficada contra la generación hidroeléctrica nacional calculada de 2018 a 2028 para mostrar la complementariedad en los meses secos (UPME, 2015).

También se desarrolló un estudio con cuatro reportes para la UPME y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), llevado a cabo por el grupo de consultoría internacional especializado en ingeniería, ciencias ambientales y economía COWI con sede en Lyngby, Dinamarca. El segundo y tercer reporte son interesantes porque estos analizan un parque eólico ficticio de 400 MW en La Guajira (COWI, 2014):

- En el segundo reporte, la velocidad media del viento de una estación meteorológica en La Guajira fue calculada como  $6,1 \text{ m/s}$ . La velocidad media del viento de un mástil meteorológico cercano fue calculada como  $7,5 \text{ m/s}$ . La ecuación entre estos fue encontrada como  $W_{10} = 0,0326 + 0,7423W_{50}$  con un  $R^2$  semanal, coeficiente de determinación de 0,95.
- En el tercer reporte, la complementariedad fue analizada. Caudales mensuales de 26 ríos fueron disponibles por la UPME (1997-2013). Estos fueron agregados en lo que se le llamó un *pool* hídrico nacional y una curva media mensual se obtuvo. Sin embargo, también se tuvieron en cuenta los datos de producción de cuatro (4) plantas hidráulicas disponibles por la UPME (1995-2013). Con esta información se realizaron dos análisis: una comparación entre velocidad de viento y caudales de ríos; y entre energía eólica y energía hidroeléctrica.
- Para el primer análisis, la velocidad del viento en La Guajira fue comparado con el *pool* hídrico nacional en general y un coeficiente de correlación R de -0,18.

El BID basado en la tesis de maestría de John J. Ramírez C. (Ramírez C., 2015), evaluó la complementariedad entre las energías renovables variables como la eólica o la solar y uno de los recursos más abundantes en América Latina, la energía hidroeléctrica, tomando en 2017 el sistema eléctrico colombiano como caso de estudio (Paredes & Ramírez C., 2017). Los autores analizaron la relación entre los patrones estaciones e interanuales de los recursos eólicos y

solares en diferentes regiones y los correlaciona con los recursos hídricos actualmente utilizados para la generación de energía eléctrica en Colombia, obteniendo como resultado a nivel nacional, que los mayores coeficientes de correlación estacionales medios (negativos) se hallaron en los sitios eólicos y solares de las Planicies Orientales y en los sitios solares de la región de Antioquia.

El estudio más reciente encontrado para el país dentro de la literatura consultada fue un reporte llevado a cabo por (Henaó et al., 2020) donde exploraron el grado de complementariedad entre los recursos eólico y solar en Colombia y el sector hidro energético del país en escalas anuales e interanuales. Demostrando así, como los recursos solares y eólicos presentes en la costa Caribe y en la región Andina, complementan el sector hídrico durante temporadas secas del ciclo climatológico anual y las fases cálidas y frías del ENSO.

Ahora, si bien los estudios que se han adelantado en el territorio colombiano se han esforzado por mostrar resultados de la complementariedad del recurso eólico como necesidad de satisfacer los momentos de baja hidrología del país, cabe resaltar que el país no solo cuenta con grandes presencias de vientos, si no también, con radiación solar, pues Colombia al estar ubicado en la zona ecuatorial la incidencia de la radiación solar es casi perpendicular en todo el territorio recibiendo así abundante radiación solar que puede ser aprovechada en casi todo el territorio.

Es por esto, que surge la necesidad de estudiar también el recurso solar, su distribución espacial, la cantidad que puede ser aprovechada energéticamente, además teniendo claro que las tecnologías solares actualmente presentan una reducción en costos considerables comparándolas con los tipos de generación convencional. Dicho lo anterior y teniendo claro que el país cuenta con grandes reservas energéticas de los recursos eólicos y solares, es necesario realizar un estudio de las cantidades, disponibilidades, calidad y distribución de ambos, pero además de la manera en que dichas fuentes energéticas pueden ser

complementarias en un determinado espacio y en el tiempo con la finalidad de reducir la variabilidad que estas presentan. Adicionalmente, los estudios anteriormente señalados de complementariedad en Colombia se han limitado en del departamento de La Guajira por tener amplias reservas de los recursos, en el estudio se ha decidido ampliar el área de estudio a toda la región Caribe colombiana, comprendiendo sus 7 departamentos de la zona continental, con la finalidad de conocer, comprender y analizar los recursos eólicos y solares de un área más amplia, con la intención de tener un mayor espectro de aprovechamiento de éstos.

### 3.2. Descripción de las características de la región Caribe Colombiana

La primera vez que los hombres pudieron ver desde el aire la geografía de la Costa Caribe colombiana fue en la década de 1920, cuando los pilotos alemanes de la recién creada Sociedad Colombo Alemana de Transporte Aéreo (SCADTA), volaron una y otra vez, saliendo del pequeño hidro puerto de Veranillo en Barranquilla, en pequeños Junkers F-13<sup>6</sup>, para explorar estos territorios en todo su esplendor tropical. Los jóvenes alemanes quedaron maravillados con el espectáculo de verde tupido, mares azules, cielos claros, ríos y ciénagas del color del barro y las nieves perpetuas de los picos más altos de la Sierra Nevada de Santa Marta (Boy & Calderón, 1955).

Gracias a los avances tecnológicos de hoy en día, como lo son los satélites que permiten la observación de la geografía, podemos elevarnos cientos de pies sobre la superficie de la Tierra para alzar vuelo desde Barranquilla con el mar Caribe en el horizonte, como lo hacían los frágiles aviones de la SCADTA en la década de 1920, para recorrer la Sierra Nevada y sus enormes y deslumbrantes picos blancos, las extensas llanuras de las sábanas de Bolívar, cuya baja elevación solo se interrumpe por los cerros de los Montes de María, para seguir por tierras cubiertas por ciénagas, caños y ríos de la zona de La Mojana, al sur de Sucre, Bolívar y Córdoba, luego remontar el río Magdalena con dirección norte para seguir hacia las planicies cubiertas de pasto del Cesar

---

<sup>6</sup> Aeronave alemana que llegó al país en 1920 a través de SCADTA y en 1932 fue utilizada por la aviación militar colombiana en el marco del conflicto amazónico

y cruzando hacia la izquierda volar entre la Serranía del Perijá y la Sierra Nevada, para encontrarse finalmente con las desérticas tierras de la media y alta Guajira, donde el verde de las sábanas del Cesar desaparece casi por completo (Meisel Roca & Pérez V., 2006).

Todos estos contrastes de paisajes que maravillaron a los pilotos alemanes en los veinte dieron una primera idea de cómo el Caribe colombiano continental posee un relieve y clima variado en toda su extensión y su aspecto físico, donde la región está constituida por tierras bajas y planas predominantemente, aunque parte del territorio está rodeado por estribaciones de las tres cordilleras. A pesar de tener mayormente tierras bajas y cálidas en parte central y del norte, también cuenta con un gran suministro de agua, especialmente en el sur de la región (Meisel Roca & Pérez V., 2006).

En el siguiente capítulo se contextualiza la región Caribe colombiana continental, exhibiendo la división administrativa, relacionando sus actividades económicas, la geografía, las características climáticas presentes en esta parte del territorio colombiano y el sistema eléctrico actual, siendo estas últimas descripciones claves para el desarrollo del estudio y comprender el comportamiento de las fuentes energéticas.

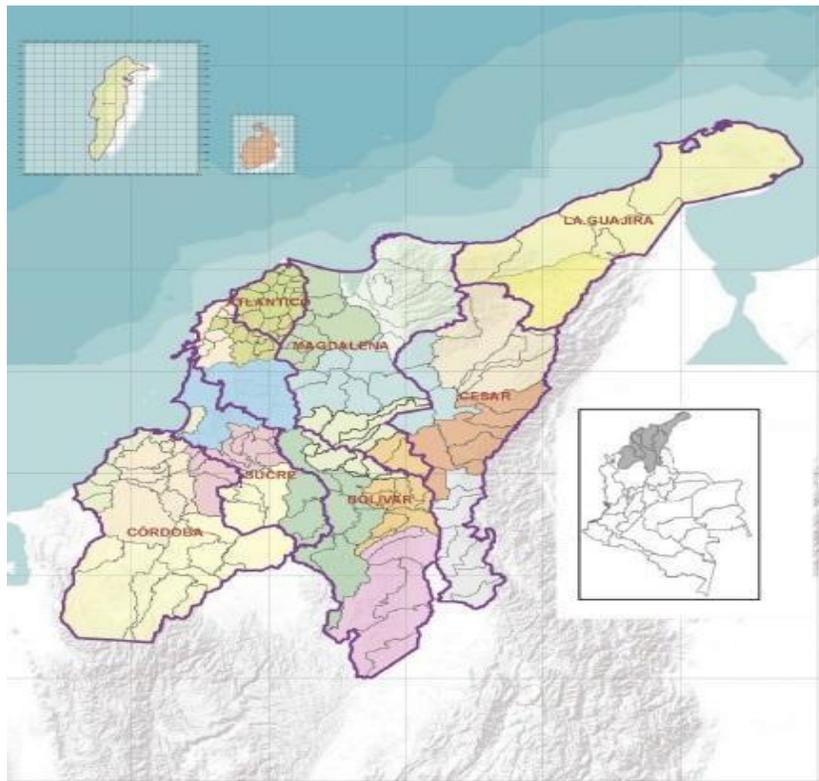
### 3.2.1. Contexto del Caribe Colombiano

El Caribe Colombiano está constituido por ocho (8) departamentos, estos son: Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena y Sucre en la parte continental, y San Andrés y Providencia en el territorio insular. Está ubicada en el norte de Colombia limitando con el océano Atlántico y una parte de Venezuela. Su extensión ocupa 132.244 km<sup>2</sup>, representando 11,6 % de la superficie terrestre del país (Aguilera Díaz, Reina Aranza, Orozco Gallo, Yabrudy Vega, & Barcos Robles, 2013) repartidos en un área continental de 132.218 km<sup>2</sup> y otra insular de 70 km<sup>2</sup> (Figura 5). Además, Colombia posee un área de 536.574 km<sup>2</sup> en el Mar Caribe, que le da el nombre a la región (Observatorio del Caribe colombiano, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD Colombia, & Área de Pobreza y Desarrollo Sostenible, 2005). En esta región, según las proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE es donde habita

el 21,84 % de los colombianos (10.886.173 millones de habitantes según proyecciones del DANE a junio 30 de 2018).

Una característica de Colombia es su diversidad cultural, étnica y racial, geográfica y biológica, solo por citar algunos casos. Sin embargo, en la composición del mosaico ecléctico de identidades de la nación colombiana puede ser que en la región Caribe se encuentre el mayor número de elementos entre ellos (Observatorio del Caribe colombiano et al., 2005). La composición de la población por zonas es 73,9 % localizadas en zonas urbanas y 26,1 % en áreas rurales. En relación con la composición étnica, el 15,7 % de la población son afrodescendientes, el 6,8 % indígena y el 77,5 % no tienen pertenencia étnica, sumando sobre 22 % de la población nacional (Observatorio del Caribe colombiano et al., 2005) 10,7 millones de ciudadanos de acuerdo con las proyecciones del DANE.

**Figura 5.** Mapa de ubicación geográfica de la Región Caribe Colombiana



Fuente: corporación PBA (Corporación PBA, Desarrollo con Cohesión Territorial, & Programa Cohesión Territorial para el Desarrollo, 2014; Poveda & Jaramillo, 2000).

En cuanto a la actividad económica de la región Caribe, las actividades más notables que contribuyen al PIB regional en orden de participación son: en primer lugar, las actividades industriales, donde se resalta la industria manufacturera de sustancias y productos químicos, la producción del coque y los productos del refinamiento del petróleo, adicionalmente también se encuentran la industria de alimentos y bebidas y los minerales no metálicos (Aguilera Díaz et al., 2013) donde la industria contribuyó con el 12,3 % del PIB regional. El segundo lugar, es para las actividades mineras que explotan carbón, sal y ferroníquel. La participación de la minería es del 10 % en el PIB regional; la tercera posición es para las actividades de construcción con una participación de 9,3 %, agricultura con una contribución regional de 7,3 % en 2016 y actividades de servicios con un 5,8 % (Aguilera Díaz, Reina Aranza, Orozco Gallo, Yabrudy Vega, & Barcos Robles, 2017).

En el período comprendido entre 1990 a 2016 el sector terciario siguió siendo el de mayor contribución del PIB regional con 48,8 % promedio anual y un 4,5 % de crecimiento anual. El sector secundario pasó de 20,3 % en 1990 a 26,2 % en 2016 y con una mejora de 3,4 % promedio anual, mientras que el sector primario pasó de 33,0 % en 1990 a 15,1 % en 2016, desde una perspectiva general, esta región contribuye con el 15,2 % del PIB nacional. En conclusión, la tasa promedio de crecimiento económica real anual para el Caribe fue del 3,7 % entre 1996 a 2016. Esta tasa presentó un incremento más alto que la tasa de crecimiento nacional que fue del alrededor de 3,4% (Aguilera Díaz et al., 2017).

Desde el punto de vista orográfico que es uno de los aspectos más importantes para entender el comportamiento económico de un país o región a largo plazo (Virtualopia, 2017), físicamente el Caribe Continental colombiano está formado por una llanura que cuenta con un relieve que va de ondulado a plano, muy cerca al nivel del mar (Armando Galvis, 2009).

El área está caracterizada por tener un macizo de llanuras que se extiende de la Cordillera de los Andes Colombiana, y bordeando la cordillera de la Sierra Nevada de Santa Marta alcanzando los 5.775 metros sobre el nivel del mar (la cual no hace parte de la Cordillera de los Andes) y la Serranía de Perijá llegando a los 3.630 msnm, donde a primera de ellas está localizada en el departamento de Magdalena cubriendo la península de La Guajira para bordear el Mar Caribe y

la segunda está situada en el departamento del Cesar. En el lado oeste de la región también comprende montañas de baja altitud y planicies. Las planicies son predominantes en la región y no superan los 500 msnm. A la región Caribe la atraviesan algunos ríos y donde contiene uno de los más largos pantanos en Colombia. La Ciénaga Grande de Santa Marta entre algunos otros. El principal río es el Magdalena el cual es completamente navegable en la región (Virtualopia, 2017).

En términos de zonificación climática el Caribe Continental se clasifica en promedio como cálido y seco. En esta región del país es donde se presentan los mayores índices de radiación solar y de horas promedio de brillo solar del país, por lo que no es de extrañar que las altas temperaturas sean pues una constante por casi todo el territorio (Armando Galvis, 2009).

### 3.2.2. Características climáticas del Caribe

El clima es afectado por el relieve a través de su efecto sobre la temperatura y la precipitación. En el caso de la temperatura, ocurre interesantes contrastes en el Caribe Continental. En general, el Caribe colombiano está caracterizado por tierras bajas, así el clima predominante es cálido para la mayor parte del territorio, por ejemplo, hacia la parte central de La Guajira las tierras tienden a ser arenosa y arcillosa, en parte debido a que en la zona noroeste los vientos transportan arena fina y limo (Florez, 2003).

Las zonas áridas del norte muestran un comportamiento bimodal, es decir, presenta dos períodos lluviosos y dos períodos secos durante un año. En términos de temperatura, la mayor parte de la región muestra temperaturas medias que varían entre 26°C y 30°C (Hoyos et al., 2017). Los valores más altos se presentan en el norte, en sectores de La Guajira y el valle del Cesar con valores promedio ligeramente superiores a 28°C. La Sierra Nevada de Santa Marta presenta su propio régimen, característico de zonas de alta montaña (IDEAM, 2017c). Basados en niveles de precipitación, la mayor parte de la región Caribe Continental está clasificada como subhúmeda o seca (Armando Galvis, 2009).

Usualmente, la precipitación anual varía entre 300 mm en el nororiente de la península de La Guajira, a ~2000 mm en el sudoeste de la región del Darién cerca de límites con Panamá (IDEAM, 2017c; Jaramillo, Cortés-Duque, & Flórez, 2015). La distribución de la precipitación durante el año para la región del Caribe ha sido fuertemente influenciada por el efecto de la latitud, también por este efecto consecuentemente está expuesta directamente a la radiación solar. Como un resultado, en la región se exhiben grandes variaciones espacialmente de radiación solar. En consecuencia, no hay estaciones climáticas definidas, en contraste con las latitudes más alejadas del ecuador. En esta región, hay dos períodos estacionales determinados por la precipitación y los patrones de los vientos de Alisios en el este (Ortiz-Royero, Otero, Restrepo, Ruiz, & Cadena, 2013).

La variabilidad de la precipitación interanual está relacionada con varias oscilaciones océano-atmósfera, incluyendo El Niño/Oscilación Sur (ENSO), la oscilación Quasi-biennial (QBO) y el Índice del Atlántico Norte Tropical (TNA). En Colombia, las ocurrencias de El Niño (fase cálida del ENSO) está asociada con condiciones secas, particularmente en las regiones del Pacífico y Andina, mientras que La Niña (fase fría) tiene el efecto opuesto (Poveda, Jaramillo, et al., 2001). El QBO implica oscilaciones en los vientos zonales y la temperatura, y muestra un débil efecto no lineal en las precipitaciones del país, pero puede modular la magnitud e intensidad de eventos del ENSO (Mesa, Poveda, & Carvajal, 1997). El TNA refleja anomalías en la temperatura de la superficie del mar en el Atlántico Norte tropical y afecta la precipitación y descargas en el Caribe, particularmente a través de la interacción con eventos del ENSO (Enfield & Alfaro, 1999; Restrepo et al., 2014).

El clima es modulado para una escala anual por el movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Poveda, Waylen, & Pulwarty, 2006). Como se muestra en la Figura 6, los movimientos de la ZCIT producen tres principales estaciones en Colombia: un período seco con fuertes vientos (Diciembre – Abril) algunas veces hasta marzo, un período transicional (Mayo – Julio), y un período de lluvias (Agosto – Noviembre) (Poveda et al., 2006). Estos tres períodos climáticos pueden cambiar en duración e intensidad debido a la influencia del sistema monzón americano, corrientes de viento con bajos niveles atmosféricos y eventos de El Niño y La Niña (Andrade & Barton, 2000).

Figura 6. Zona de Convergencia Intertropical – ZCIT en julio y enero.



Fuente: (Ortiz-Royero et al., 2013).

Cuando los vientos de San Andrés son más fuertes, la estación seca ocurre a lo largo de la costa Caribe, lo cual coincide con los intensos vientos alisios del noreste. El mismo proceso ocurre para el “Veranillo de San Juan”. **A lo largo de toda la costa Caribe, el mes más húmedo del año es octubre,** y los meses más secos son febrero y marzo, sin embargo, existe una fuerte variación espacial de este parámetro (Ortiz-Royero et al., 2013).

En esta región, debido al clima tan seco y la ubicación en el Ecuador, los niveles de radiación solar y las horas promedio de brillo solar son las más altas del país. Por ejemplo, la península de La Guajira muestra un promedio anual de radiación solar de 6,0 kWh/m<sup>2</sup> y 10 horas promedio por día de brillo solar (UPME & IDEAM, 2005). Ambas variables climáticas indican que la península de La Guajira posee significantes recursos energéticos para ser transformados en energía eléctrica. En el norte de la región, los valores máximos de velocidad del viento varían alrededor de 5 m/s o mayores en la parte más hacia el norte de la zona de La Guajira. En el centro y sur de la región Caribe, los valores máximos varían alrededor de 3 m/s (IDEAM, 2017c). Sin embargo, otras condiciones climáticas en la región a menudo hacen que se alcancen velocidades mayores, los vientos alisios en el Mar Caribe son una característica dominante durante el ciclo anual. Si bien estos vientos frecuentemente alcanzan 5-7,7 m/s, las tormentas de verano ocurren menos del 5 % del tiempo y con mayor frecuencia están asociadas a tormentas tropicales o

huracanes. Este régimen es a menudo penetrado por fuertes corrientes de aire frío del norte conocidos como “norteños”. Estos frentes fríos penetran hasta el sur de la costa Caribe de Colombia, lo que fuerza los vientos alisios los suficiente como para causar vendavales (Devis-Morales, Montoya-Sánchez, Bernal, & Osorio, 2017).

### 3.2.3. La región Caribe Colombiana y su sistema eléctrico

En cuanto lo relacionado al sistema eléctrico de la costa Caribe, ésta ha mostrado una tasa de crecimiento significativo de la demanda de energía eléctrica, a razón de su estructura económica, los niveles de cobertura, los crecimientos poblacionales, entre otras. Con base en los estudios adelantados por la UPME en su plan de expansión (UPME, 2018b) y con datos reportados por XM, se presentan en la Tabla 1, mostrando las cinco regiones más representativas dentro del consumo nacional, se encuentra en primer lugar Centro, seguida de Costa Caribe, Noroeste, Valle y Oriente con una participación de 82,4 % del total de la demanda nacional en el período 2002-2016.

Tabla 1. Participación Promedio Regional respecto a la Demanda Nacional de Energía Eléctrica.

	2002-2006	2007-2011	2012-2016	2017-2021	2022-2026	2027-2031
<b>Centro</b>	24, %	25,3 %	24,8 %	25,3 %	25,8 %	26,0 %
<b>Costa-Caribe</b>	19,8 %	20,2 %	22,8 %	24,6 %	25,9 %	27,4 %
<b>Noroeste</b>	15,7 %	14,8 %	14,1 %	13,2 %	12,6 %	11,9 %
<b>Valle</b>	12,6 %	11,5 %	10,9 %	10,3 %	9,6 %	8,8 %
<b>Oriente</b>	9,7 %	10,2 %	10,7 %	10,7 %	11,3 %	11,9 %
<b>CQR<sup>7</sup></b>	5,0 %	4,5 %	4,1 %	3,9 %	3,5 %	3,2 %
<b>Tolima Grande</b>	4,5 %	4,4 %	4,4 %	4,6 %	4,6 %	4,6 %
<b>Sur</b>	3,1 %	3,0 %	2,8 %	2,9 %	2,8 %	2,8 %
<b>CG Existentes<sup>8</sup></b>	4,1 %	4,5 %	4,0 %	3,0 %	2,6 %	2,3 %
<b>Pérdidas</b>	1,6 %	1,6 %	1,5 %	1,6 %	1,3 %	1,2 %

Fuente: UPME. Base de datos XM, 2017 (UPME, 2018b).

<sup>7</sup> Hace referencia a la región que comprende los departamentos de Caldas – Quindío – Risaralda.

<sup>8</sup> Grande Consumidores Existentes, empresas del sector privados con grandes demandas de energía eléctrica.

Dadas las condiciones climáticas de la Costa Caribe, mayormente clima cálido y seco, como también las características de su topografía haciendo que sea una región con una hidrología reducida, presentando solo una participación promedio diaria del 2,6 % respecto al promedio nacional (XM S.A. E.S.P., 2019), hace que dicha región no sea apta para el aprovechamiento del recurso hídrico, pues si bien solo cuenta con la central hidroeléctrica Urrá, con una capacidad instalada de 340 MW distribuida en cuatro turbinas de 85 MW cada una, ubicada en el departamento de Córdoba, aprovechando el embalsamiento de las aguas que fluyen por el río Sinú (EMPRESA URRÁ S.A. E.S.P., 2019).

Aunque no cuenta con gran capacidad instalada del recurso hidráulico, dispone de otras reservas mediante la explotación de gas y carbón, por ello se convierte atractiva para para la generación térmica, ubicando así varias centrales de este tipo con la intención de no elevar los costos que implica el transporte de los combustibles fósiles a otras ubicaciones del país. Es así, como está región cuenta con una capacidad térmica instalada de 2.555 MW distribuidos por tipo de combustible con una participación mayoritaria de gas con 41,98 %, seguida con un 22,57 % de carbón, 14,72 % de ACPM, 10,50 % de agua con solo la central Urrá, 9,60 % de participación de Combustóleo, y por último con una participación muy reducida de fuentes variables se tiene solo 0,07 % de participación del viento (UPME, 2018a). En la Tabla 2 se puede observar la capacidad instalada en la región Caribe distribuida por cada tipo de recurso:

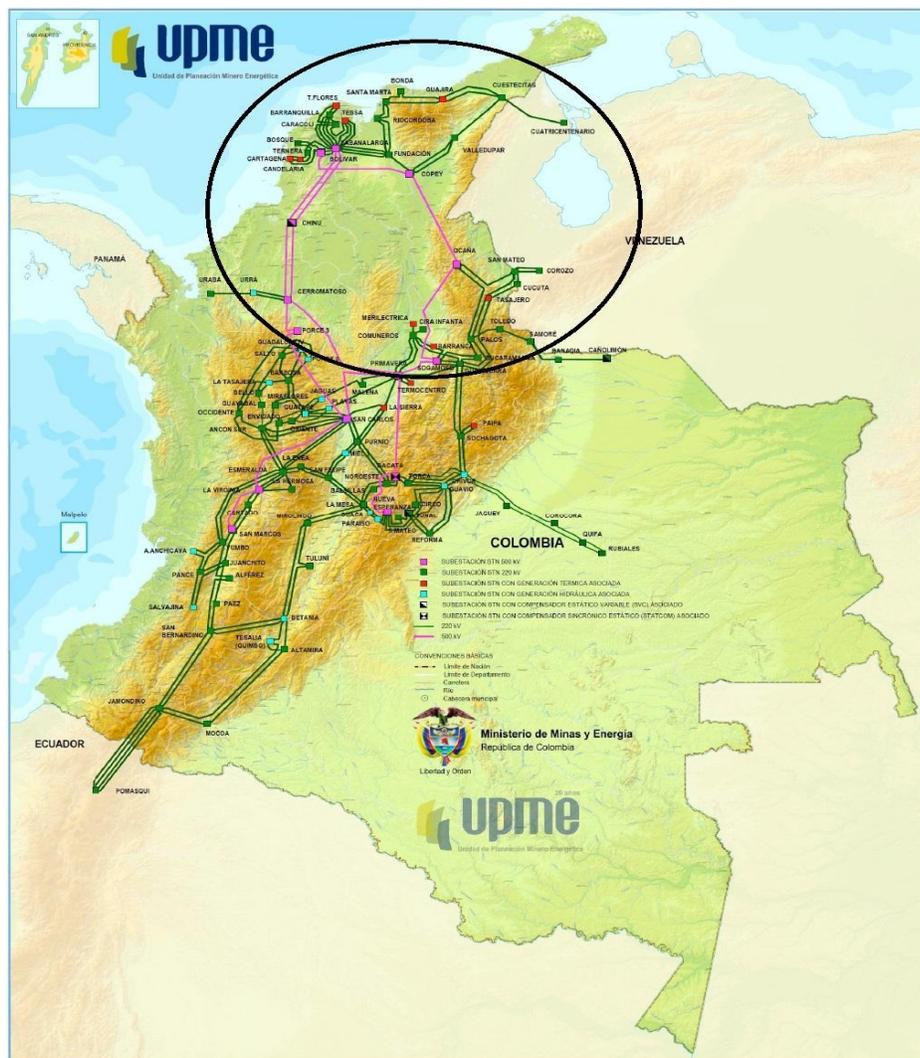
**Tabla 2.** Capacidad Instalada (CI) de la región Caribe Colombiana por tipo de recurso [MW].

	ACPM	AGUA	BIOGAS	CARBÓN	COMBUSTÓLEO	GAS	VIENTO	SOL
<b>ATLÁNTICO</b>	160,0				127,0	1.242		
<b>BOLÍVAR</b>	314,0				182,0	109,8		8,06
<b>CÓRDOBA</b>		340,0		437,0				
<b>GUAJIRA</b>				286,0			18,4	
<b>MAGDALENA</b>			2,3					
<b>SUCRE</b>				3,7				
<b>CESAR</b>								86,2

Fuente: construcción propia con datos tomados de (UPME, 2018a).

La necesidad de transportar toda la energía generada en la región Caribe por medio de sus centrales térmicas hace necesario la existencia de redes de transmisión y subestaciones para poder llevar dicha energía generada hacia los centros de consumo. Para ello, el Caribe cuenta con redes eléctricas y subestaciones a niveles de tensión de 500 kV y 220 kV que hacen parte del Sistema de Transmisión Nacional – STN, interconectando la generación de la costa Caribe con el interior del país mediante las líneas a 500 kV Ocaña – Copey, Copey – Bolívar, Bolívar – Chinú, Chinú – Cerromatoso, Cerromatoso – Porce 3 y Cerromatoso – Primavera (Figura 7).

Figura 7. Sistema de Transmisión Nacional actual con énfasis en la región Caribe.



Fuente: Plan de Expansión de Referencia Generación – Transmisión 2019 – 2033 (UPME, 2020b).

Según datos de la compañía de energía eléctrica quién presta los servicios y es dueña de los activos del sistema eléctrico de la región Caribe, Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P, haciendo presencia en 188 municipios de los 7 departamentos de la región, el sistema eléctrico se compone de 57.815 km de red eléctrica para los niveles de tensión 2 y 3 con 4.679 circuitos y cuenta **además con 230 subestaciones para suplir la demanda de 2'714.042 usuarios** (Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P., 2019).

En lo relacionado con la implementación de generación por medio de fuentes no convencionales de energía, se cuenta con el primer y único parque a la fecha de generación de energía eólica construido en Colombia entre los años 2002 y 2003, y fue inaugurado oficialmente el 21 de **diciembre de 2003, iniciando operación en abril de 2004, lleva como nombre “Jepírachi”** y está ubicado en el municipio de Uribia, en la alta Guajira colombiana. Este parque está conformado por 15 aerogeneradores marca Nordex N60 con una capacidad de 1.300 kW cada uno, para una capacidad instalada total de 19,5 MW de potencia nominal. Los aerogeneradores están compuestos por un rotor de 60 metros de diámetro y un generador instalado sobre una torre de 60 metros de altura. Este parque fue desarrollado por la compañía Empresas Públicas de Medellín E.S.P- EPM como una experiencia piloto que hace **parte del “Programa de investigaciones, proyectos y actividades coordinadas para el desarrollo eólico futuro a gran escala en Colombia”**. El Parque funciona como una planta menor<sup>9</sup> del Sistema Interconectado Nacional – SIN, por tanto, la energía producida por el parque es entregada a éste (EPM E.S.P., 2010).

Respecto al aprovechamiento del recurso solar, la región Caribe cuenta con dos plantas, una menor, que se encuentra ubicada en el municipio de Santa Rosa de Lima, en el departamento de Bolívar y tiene como nombre Celsia Solar Bolívar, cuenta con una capacidad instalada de 8,06 MW y donde fueron instalados 32.000 paneles solares en un área de 12 hectáreas, produciendo energía para abastecer cerca de 7.400 familias (CELSIA, 2018). De otra mano se tiene la planta solar el cuál a la fecha es la planta solar más grande del país, ubicada en el municipio de El Paso, departamento de Cesar, la planta solar El Paso cuenta con 250.000 paneles para una capacidad total instalada de 86,2 MW ocupando un área cercana a las 210 hectáreas. El Paso puede producir alrededor de 176 GWh al año que abastecerían las necesidades energéticas anuales aproximadamente de 102.000 hogares colombianos, cerca de 400.000 mil personas (comparable

---

<sup>9</sup> Se considera como planta menor a una planta con capacidad efectiva menor a 20 MW.

a una ciudad como Valledupar), mientras evita la emisión anual de alrededor de 100.000 toneladas de  $CO_2$  a la atmósfera (Enel Green Power, 2019).

### 3.3. Coeficientes de correlación de Pearson

Para evaluar la complementariedad entre los recursos eólicos y solares que hacen presencia en el territorio de la región Caribe, se emplea el método del coeficiente de correlación producto - momento Pearson (denotado con la letra R en la literatura, en adelante coeficiente de correlación) (Kent State University, 2021). Este estadístico nos puede resumir la medida de asociación lineal y su grado entre los recursos (Orellana, 2001) y es calculado de acuerdo con la Ecuación (1).

Sean  $(X_i, Y_i)$  las observaciones realizadas en cada uno de los  $n$  sujetos de una muestra de tamaño  $n$ . Definimos el coeficiente de correlación muestral de Pearson entre X e Y como:

$$r = \text{Corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{s_X s_Y} \quad (1)$$

Donde:

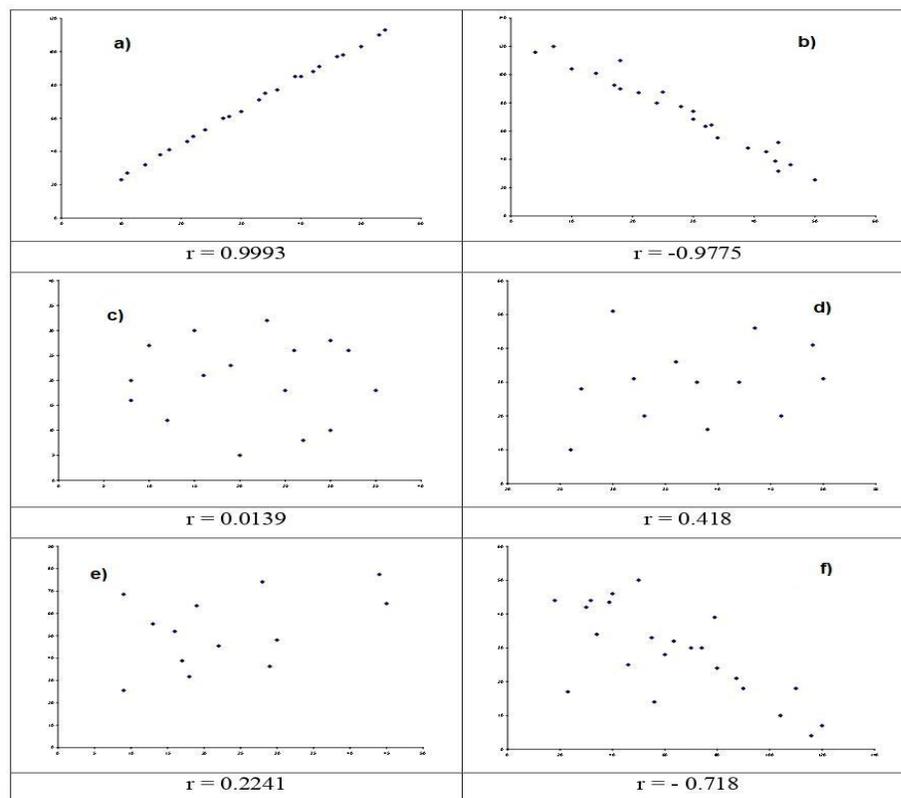
$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_1^n (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y}) \quad (2)$$

$$s_X = \sqrt{\text{var}(x)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^n (x_i - \underline{x})^2} \quad (3)$$

El coeficiente de correlación de Pearson presenta diferentes propiedades, tales como, es independiente de la escala de las magnitudes de las variables, su valor se encuentra entre un rango de -1 a 1, donde el signo del coeficiente indica la dirección de la relación mientras que la magnitud indica la fuerza y un valor de cero (0) indica que entre las dos variables no presenta alguna asociación, es decir, sus comportamientos son totalmente independientes. Un valor positivo del coeficiente indica una asociación positiva o directa, como el valor de una variable aumenta, así mismo aumenta el valor de la otra. Un valor negativo, indica una relación negativa o inversa, como el valor de una variable incrementa, el valor de la otra disminuye (Ramírez C., 2015).

Para comprender mejor el significado de los coeficientes de correlación, un ejemplo esquemático por medio de graficas de dispersión de diferentes grupos de datos con diferentes tipos de correlación son exhibidos en la Figura 8:

**Figura 8.** Ejemplos de series de datos con diferente grado o tipo de correlación.



Fuente: (Orellana, 2001).

Puede observarse que la gráfica a) presenta una alineación de sus puntos con una pendiente positiva, con un valor de coeficiente de correlación cercano a +1, una correlación perfecta positiva, en cambio el cuadrante b) exhibe una pendiente negativa, presentando un comportamiento inverso entre las variables, con un valor cercano a -1 la relación entre estas variables es una correlación negativa. Mientras que las gráficas c) y d) muestran el comportamiento entre las variables con un bajo grado de asociación entre éstas, soportado en los valores del coeficiente de correlación cercanos a 0. Por último, en los gráficos e) y f) si bien presentan cierto grado de relación entre las variables, puede explicarse como que dichas variables si bien son correlacionadas el grado de su asociación es leve o fuerte dependiendo del valor absoluto del coeficiente de correlación.

Para este estudio, las magnitudes más grandes de coeficientes de correlación de Pearson negativos para los puntos de medición son considerados los puntos más complementarios. La magnitud de la complementariedad podría ser categorizada como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Lineamientos adoptados para interpretar los coeficientes de correlación de Pearson R.

<b>Magnitud de asociación</b>	<b>Coeficiente r</b>	
	Positiva	Negativa
<b>Leve</b>	0,1 a 0,3	-0,1 a -0,3
<b>Media</b>	0,3 a 0,5	-0,3 a -0,5
<b>Fuerte</b>	0,5 a 1,0	-0,5 a -1,0

Fuente: tomado de (Laerd statistics, 2021)

## 4. METODOLOGÍA

El estudio de complementariedad surge de diferentes cuestionamientos acerca del comportamiento, disponibilidad y la posible combinación que pueden presentar los recursos energéticos eólicos y solares en la región Caribe colombiana, así mismo, puede dar una visión de **cómo la producción energética gracias al aprovechamiento de estas fuentes puede “suavizarse”** por la combinación de ambos recursos como lo demostraron los autores Joakim Widén, Christina E. Hoicka, Ian H. Rowlands, F. Monforti, T. Huld, K. Bódis, L. Vitali, M. D’Isidoro y R. Lacal-Aránategui (Widén, 2011; Hoicka & Rowlands, 2011; Monforti et al., 2014). Además de reducir la variabilidad que presenta cada fuente si se pretende aprovechar cada una por separado, el análisis de complementariedad puede representar una fuente primaria para los planeadores y operadores del sistema eléctrico en el panorama de desarrollo y aumento de la participación de las FNCER en la matriz energética, de esa manera, se relegaría la generación convencional fósil y los costos de producción altos.

En orden de analizar y comprender la posible relación que guardan los recursos eólicos y solares en la región Caribe, luego de una revisión en la literatura sobre diferentes metodologías que permitan medir el grado de asociación o de complementariedad entre los recursos energéticos renovables, se seleccionó y desarrolló una metodología estadística basada en el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson, la cuál es mayormente utilizada y aceptada respecto a los aprovechamientos en la cuantificación del grado de asociación entre pares de variables renovables (Shaner, Davis, Lewis, & Caldeira, 2018; Monforti et al., 2014; Widén et al., 2015), (de Oliveira Costa Souza Rosa, da Silva Christo, Costa, & Santos, 2020; Jurasz, Beluco, & Canales, 2018; Viviescas et al., 2019), (Silva, Pimenta, Assireu, & Spyrides, 2016). Dicha metodología es aplicada a las series temporales de velocidad del viento y radiación solar global medidas *in-situ*,

considerando las series de los promedios diarios y mensuales para evaluar la complementariedad local a diferentes escalas temporales.

Como paso inicial basados en cinco años de datos (enero 2014 a diciembre de 2018) horarios del recurso solar y diezminutales del eólico se obtuvieron en la región Caribe las variables climáticas radiación solar global en  $W/m^2$  y velocidad del viento en  $m/s$  provenientes de mediciones en campo realizadas por EMAS pertenecientes a la red del IDEAM.

Luego de obtener las mediciones de las variables provenientes de las EMAS, un segundo paso se realizó, donde a las series de la radiación solar global horario para el horizonte de estudio, el personal técnico del IDEAM aplicó una validación consistente en un etiquetado de cada observación y así decidir sobre la inferencia sobre el mismo dato y la certeza en el valor observado. Es así como fueron eliminados los datos registrados en la noche por las EMAS para la radiación solar global.

Con el fin de comprender el comportamiento y la relación de las disponibilidades de cada variable como la evaluación en conjunto de ambas, en diferentes escalas de tiempo, se calcularon los promedios diarios y mensuales para las series de datos de las variables climáticas como tercer paso desarrollado en la metodología.

Previo al cálculo de los coeficientes de correlación y debido al comportamiento característico del ciclo climatológico anual en Colombia, como también dado que las variables a evaluar poseen diferentes unidades de medida, fue necesario realizar un cuarto paso donde las series de tiempo fueron estandarizadas por medio de la ecuación (4), para eliminar el efecto de estacionalidad e identificar el ciclo anual de las variables bajo estudio.

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (4)$$

---

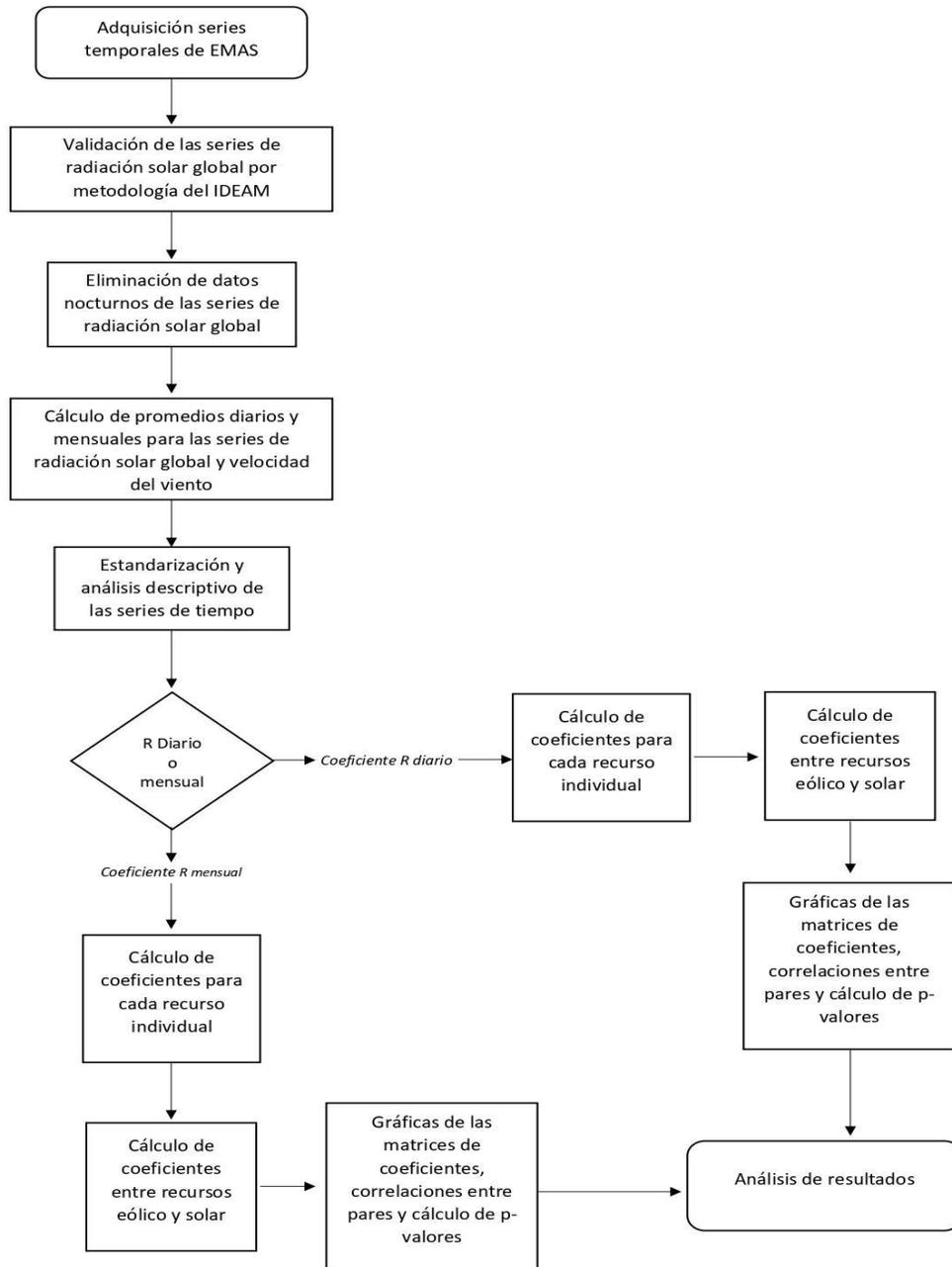
Donde  $x_{ij}$  representa la  $i$ -ésima observación del  $j$ -ésimo mes del año,  $\mu_j$  representa el valor medio del  $j$ -ésimo mes del año,  $\sigma_j$  representa la desviación estándar del  $j$ -ésimo mes del año, y  $z_{ij}$  representa el valor estandarizado asociado a la  $i$ -ésima observación tomada por la estación meteorológica para el  $j$ -ésimo mes del año. En este mismo paso de la metodología, se realizó un análisis descriptivo a las series temporales.

Posteriormente, en el quinto paso de la metodología desarrollada, los coeficientes de correlación eólico-solar son calculados entre los puntos de medición de las variables meteorológicas donde se ubican geográficamente cada EMAS en la región y también se halló la correlación para cada recurso de manera individual al establecer su relación lineal en un área determinada, también conocida como complementariedad espacial (Beluco et al., 2008), o para una gran variabilidad geográfica (de Oliveira Costa Souza Rosa, Costa, da Silva Christo, & Braga Bertahone, 2017), la misma fuente puede complementarse así misma cuando es utilizada en puntos dispersos, dado que se aprovecharía la disponibilidad del recurso para un área específica.

Para realizar una validación a los resultados de las correlaciones calculadas, se hallaron los niveles de significancia para cada matriz de coeficientes de correlación, como también para cada par de series temporales analizadas respecto a los resultados de sus correlaciones, por medio de los  $p$ -valores, esto con el fin de poder comprender y decidir si las correlaciones son significativas.

Por último, por medio de ayudas de gráficos o correlogramas se realiza un análisis de los resultados, consistentes en la interpretación gráfica de cada matriz de coeficientes de correlación, representadas por medio de matrices con escalas de colores para observar la dirección y magnitud de cada coeficiente calculado, y por medio de los gráficos de las series de tiempo para los puntos de mediciones con valores de correlación significativos. El desarrollo del estudio se basó en la metodología planteada en el diagrama esquemático presentado en la Figura 9.

Figura 9. Diagrama esquemático de la metodología implementada en el estudio.



Fuente. Realización propia

#### 4.1. Recopilación y evaluación de las bases de datos para las series de velocidad del viento y radiación solar global

La investigación está basada en el uso de los recursos energéticos, más específicamente en los recursos eólico y solar. Las bases de datos son analizadas en una escala regional, donde el propósito del estudio se centra en la complementariedad local de estos dos recursos energéticos sobre la región Caribe de Colombia. La caracterización de dichos recursos se realiza a través de las variables climáticas radiación solar global y la velocidad del viento.

Los datos de radiación solar y velocidad del viento cubren un período de cinco años (2014-2018). La correlación se calcula solo sobre el área geográfica común de los dos conjuntos de datos, extendiéndose aproximadamente de 6° a 12°N y de 76° a 71° O. Para usos del presente estudio, conocer las observaciones meteorológicas de las variables climáticas de la región del Caribe es clave para el posterior análisis de los potenciales energéticos con los que se cuenta. La adquisición de estos datos se realiza con estaciones meteorológicas en superficie. Utilizando los datos de la red de EMAS del IDEAM, para obtener las observaciones a lo largo y ancho del Caribe colombiano.

Como insumo primordial para el estudio, las observaciones tomadas en tierra juegan el papel clave para la obtención de estas mediciones, por ello los sistemas de medición o captación de las variables deben desempeñar su función de una manera confiable. A continuación, se trata lo relacionado con las estaciones meteorológicas y las series temporales provenientes de las mediciones tomadas por éstas.

## 4.2. Estaciones Meteorológicas

La meteorología es la ciencia encargada del estudio de la atmósfera, sus propiedades y los eventos que esta presenta. Este estudio se basa en el conocimiento de un conjunto de magnitudes o variables meteorológicas, por ejemplo, la temperatura, la presión atmosférica o la humedad; estos varían en el espacio y el tiempo (FECYT, 2004).

Las observaciones meteorológicas, las mediciones ambientales y geofísicas relacionadas son necesarias para la preparación en tiempo real de los análisis meteorológicos, los pronósticos y los avisos meteorológicos extremos, el estudio del clima, en las operaciones locales dependientes del tiempo, para la hidrología y la climatología (World Meteorological Organization, 2008). Algunas otras de las aplicaciones de los datos meteorológicos también incluyen las evaluaciones de riesgos, diseño de estructuras hidráulicas, estimaciones de uso de agua en cultivos, programación de riegos, variables de entrada de cambio climático y modelos hidrológicos, usos de energías renovables activas y pasivas, etc (A.Weiss & J.G. Robb, 1986; Flores, Tapia, & Tapia, 2005; Stephen Del Greco, Michel L. Urzen, & Saeid Ansari, 2005; Steven J. Meyer & Kenneth G. Hubbard, 1992; Younes, Claywell, & Muneer, 2005).

Los registros en tierra de las condiciones climáticas pueden ser el estándar de oro para los datos meteorológicos, pero se mantienen en restricciones específicas. La ausencia de capacidad para llevar un registro de rutina puede generar lagunas o carencias significativas de datos, lo que obliga a los investigadores a excluir los datos de los resultados para los que no tienen medidas coincidentes disponibles, disminuyendo así la potencia estadística. Además, las estaciones meteorológicas suelen estar ubicadas en lugares clave para su uso, principalmente en la aviación o la vigilancia meteorológica de grandes núcleos de población (por ejemplo, aeropuertos y ciudades, respectivamente). Finalmente, las estaciones meteorológicas varían en su precisión y generalmente solo registran un pequeño subgrupo de variables, a menudo solo temperatura, precipitación, presión y velocidad del viento, y mediciones más estrictas técnicamente, como la humedad y la radiación solar (Colston et al., 2018)

Se entiende por estación meteorológica el lugar donde se han realizado observaciones y medidas restrictivas de los diferentes parámetros meteorológicos utilizando instrumentos adecuados para ello, con el fin de establecer el comportamiento atmosférico en diferentes zonas de un territorio (IDEAM, 2018c). Existen diferentes tipos de estaciones meteorológicas, hay observación del clima con el mismo objetivo, variando su ubicación, el tipo de variables que miden, si operan por personal o son totalmente automatizadas, entre otras características. Para este estudio se seleccionaron las EMAS, definidos de acuerdo con el Vocabulario Meteorológico Internacional (O M M, 1992).

Las bases de datos son analizadas en una escala regional, donde el propósito del estudio se centra en la correlación inversa local de los dos recursos energéticos en la región Caribe de Colombia, la caracterización de los recursos se realizó con las variables climáticas radiación solar global y la velocidad del viento.

Los datos de radiación solar global y velocidad del viento cubren un período de cinco años (2014-2018) donde dicho período de estudio se basó en los datos otorgados por el IDEAM en el marco del trabajo **“Complementariedad de Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia”**, llevado a cabo por el Grupo de Investigación en Potencia, Energía y Mercados (GIPEM) de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y las entidades patrocinadoras UPME e IDEAM. La correlación se calcula solo sobre el área geográfica común de los dos conjuntos de datos, extendiéndose aproximadamente de 6° a 12°N y de 76°a 71°O. Para usos del presente estudio, conocer las observaciones meteorológicas de las variables climáticas de la región Caribe es clave para el posterior análisis de los potenciales energéticos con los que se cuenta. La adquisición de estos datos se obtuvo de las estaciones meteorológicas en superficie, provenientes de la red de EMAS del IDEAM, con el fin de obtener el comportamiento a lo largo y ancho del Caribe colombiano.

El país cuenta con 160 EMAS del IDEAM (IDEAM, Fundación Universitaria Los Libertadores, & UPME, 2017) en diferentes clasificaciones (limnigráfica, agrometeorológica, climática ordinaria, climática principal, limnimétrica, estaciones midiendo a nivel del mar, meteorológica especial,

pluviométrica y sinóptica especial) (IDEAM, 2019). Con estas 160 estaciones automáticas el IDEAM realizó un diagnóstico y una validación previa a la información horaria, por lo que se seleccionaron 105 piranómetros<sup>10</sup> para ser calibrados durante los años 2014 y 2015. Se hallaron las constantes de calibración donde posteriormente se les aplicaron a los datos de estos sensores y se aplicó otra validación a esta información, luego realizando una selección de 96 sensores para la elaboración del Atlas de Radiación Solar (IDEAM et al., 2017).

Las 20 estaciones seleccionadas para este estudio están ubicadas entre los 7 departamentos que componen la región Caribe continental, las cuales miden las variables de velocidad del viento y radiación solar global. Para la selección de las EMAS se tuvo en cuenta el análisis previo realizado por el IDEAM con las estaciones implementadas en el Atlas de Radiación Solar, pero una selección y validación extra de las series de tiempo de la radiación solar global fue realizado por personal del IDEAM en el marco del trabajo desarrollado “Complementariedad de Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia”, desarrollado por el grupo de investigación GIPEM.

Para obtener las mediciones del recurso solar, de las 20 estaciones seleccionadas, se tuvieron en cuenta 15 estaciones y para el recurso eólico 13 EMAS, resaltando que hay 8 estaciones midiendo las dos variables como lo son la Universidad Tecnológica de Magdalena, Paici, Fedearroz, La Gran Vía, La Loma Carbones del Cesar, Toromana, Aeropuerto Los Garzones e INCODER. La Tabla 4 muestra el listado de las 20 EMAS del IDEAM con las características de cada una y la Figura 10 presenta la distribución geográfica de las EMAS en el territorio de la región.

---

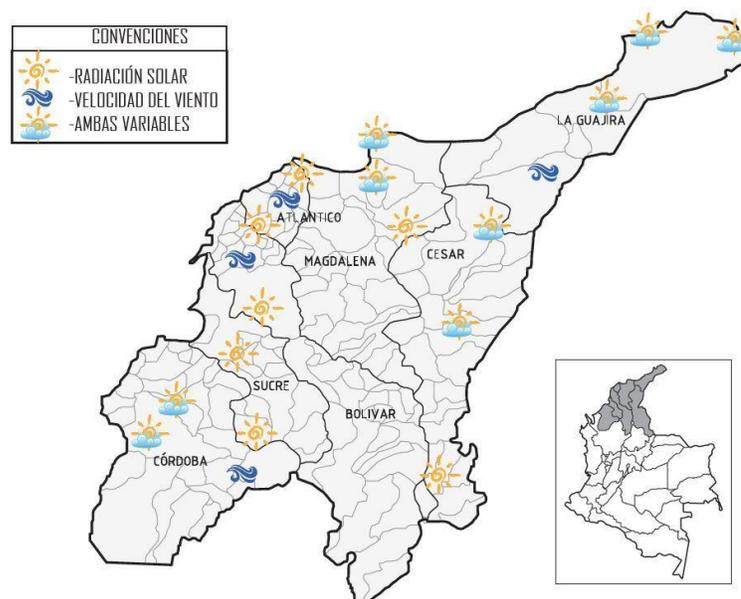
<sup>10</sup> Un piranómetro es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre.

Tabla 4. Lista de EMAS seleccionadas para el estudio de correlación ubicadas en la región Caribe.

Nombre	Categoría	Municipio	Departamento	Altitud	Latitud	Longitud	Fecha instalación
				msnm			
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA - AUT	Climática principal	Santa Marta	Magdalena	7	11°13'23" N	74°11'9,3" W	2007-09-13
PAICI - AUT	Agrometeorológica	Uribí	La Guajira	45	11°35'41,8" N	72°19'32,7" W	2004-10-14
AGUACHICA - AUT	Agrometeorológica	Aguachica	Cesar	103	8°7'24,3006" N	73°34'47,499" W	2005-08-19
SAN MARCOS - AUT	Climática principal	San Marcos	Sucre	31	8°35'48,5988" N	75°8'33,6984" W	2005-10-07
FEDEARROZ - AUT	Climática principal	Valledupar	Cesar	184	10°27'49" N	73°14'53" W	2005-08-16
CARMEN DE BOLÍVAR - AUT	Climática principal	El Carmen De Bolívar	Bolívar	152	9°42'56,6994" N	75°6'23,1006" W	2004-03-01
REPELÓN - AUT	Climática principal	Repelón	Atlántico	10	10°29'24" N	75°7'36,9978" W	2007-09-12
BATALLÓN NO. 6 - AUT	Climática principal	Fundación	Magdalena	1280	10°27'55,299" N	73°55'40,0008" W	2006-02-24
LA GRAN VÍA - AUT	Agrometeorológica	Zona Bananera	Magdalena	30	10°51'0" N	74°8'0" W	2008-10-01
LA LOMA CARBONES - AUT	Climática principal	El Paso	Cesar	60	9°38'26,2" N	73°31'26,2" W	2010-03-02
AEROPUERTO PUERTO BOLÍVAR - AUT	Climática principal	Uribí	La Guajira	10	12°13'27,5" N	71°58'58,4" W	2014-08-21
TOROMANA - AUT	Climática principal	Uribí	La Guajira	144	12°5'0,7" N	71°12'39,4" W	2005-04-18
AEROPUERTO LOS GARZONES	Sinóptica principal	Montería	Córdoba	20	8°49'33" N	75°49'30,5" W	2015-02-06
AYAPEL - AUT	Meteorológica especial	Ayapel	Córdoba	20	8°17'42,2298" N	75°9'52,4016" W	2014-12-11
INCODER - AUT	Agrometeorológica	Montería	Córdoba	37	8°44'49" N	75°54'50" W	2004-11-17
LA PAULINA - AUT	Climática principal	Fonseca	La Guajira	170	10°53'53,3004" N	72°49'42,4992" W	1966-09-14
SABANALARGA - AUT	Climática principal	Sabanalarga (Atlántico)	Atlántico	100	10°38'12,1992" N	74°55'7,9998" W	2013-05-05
SINCERIN - AUT	Climática principal	Arjona	Bolívar	10	10°8'33,2988" N	75°16'41,8008" W	2013-05-04
AEROPUERTO E. CORTISOZ - AUT	Sinóptica principal	Soledad	Atlántico	14	10°55'4,00" N	74°46'46,99" W	2005-05-04
EL TESORO IDEAM - AUT	Agrometeorológica	Morroa	Sucre	168	9°21'25,5" N	75°17'21,3" W	2004-12-01

Fuente: Autor con datos del IDEAM.

Figura 10. Localización geográfica de las EMAS en la región Caribe de la red del IDEAM.



Fuente: Autor con datos del IDEAM.

### 4.3. Series de tiempo para la radiación solar global

La radiación solar es medida directamente utilizando instrumentos llamados radiómetros e indirectamente a través de modelos de estimación matemática que correlacionan la radiación con el brillo solar. Los radiómetros solares como los piranómetros y pirheliómetros pueden ser usados para medir la radiación solar global incidente (directa más difusa). Estos equipos se clasifican de acuerdo con diferentes criterios: el tipo de variable que pretende medirse, el campo de visión, la respuesta espectral, etcétera. El sensor que mide la radiación solar global en todas las estaciones meteorológicas satelitales del IDEAM es el piranómetro CM11 de la compañía alemana Adolf Thies GmbH & Co. KG (IDEAM et al., 2017). Las mediciones tomadas por las estaciones tienen una frecuencia de medida en minutos y suman o almacenan la información en nivel horario (IDEAM et al., 2017).

Estos radiómetros son los implementados en las EMAS que fueron seleccionadas para el estudio, de las cuales se obtuvieron las series de datos para el horizonte de análisis con una frecuencia de las mediciones en minutos que luego suman o almacenan la información a nivel horario.

Luego de realizar un filtrado de los datos entre las 6:00 y 18:00 horas correspondientes al ciclo diurno de la radiación solar, fueron construidas 30 series de tiempo para los 15 puntos de medición del recurso solar. De esta manera, a las series horarias de la radiación solar global se calcularon sus promedios diarios y mensuales para realizar el análisis utilizando el software estadístico R-CRAN, observando los resultados en el horizonte de cinco (5) años.

A pesar de que el período de tiempo bajo estudio fue seleccionado para minimizar el riesgo de pérdida de datos, y debido a que algunas de las EMAS entraron en operación en el año 2014, en algunos casos se presentan brechas. Al realizar un análisis de la cantidad de datos de cada estación en el horizonte de cinco (5) años, la estación con la mayor cantidad de datos fue Fedearroz con un 93 % de datos completos, donde se puede observar en la Tabla 5 los porcentajes y cantidad de datos de cada estación.

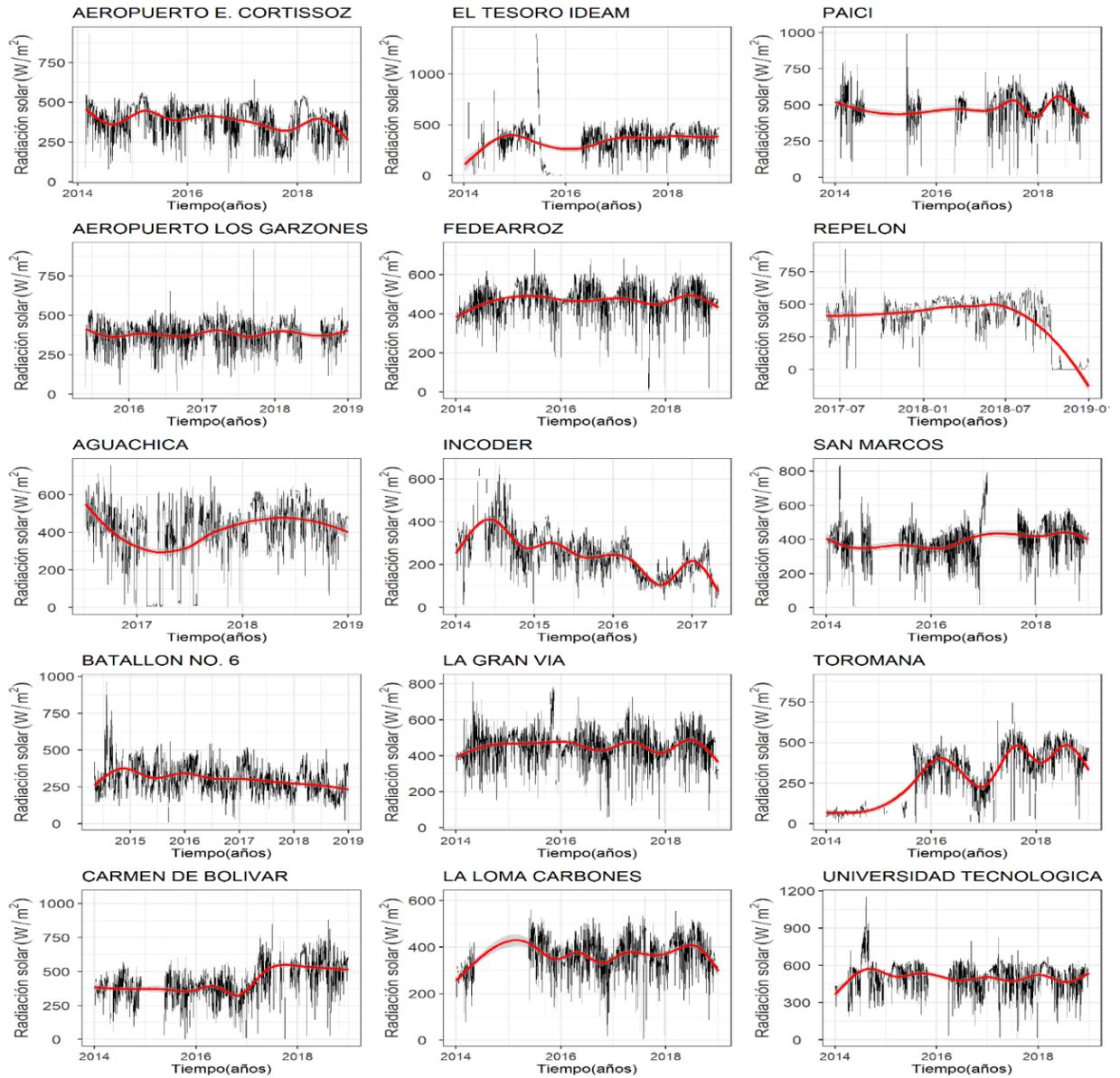
Tabla 5. Cantidad y porcentaje de observaciones de las EMAS seleccionadas

Nombre	Número de observaciones		Porcentaje llenado [%]		Variable Medida	
	Radiación Solar	Velocidad Viento	Radiación Solar	Velocidad Viento	Radiación Solar Global	Velocidad Viento
UNIVERSIDAD TECNOLOGICA - AUT	19976	221820	84,2	84,4	X	X
PAICI - AUT	12418	139088	52,3	52,9	X	X
AGUACHICA - AUT	9898		41,7		X	
SAN MARCOS - AUT	16290		68,7		X	
FEDEARROZ - AUT	22256	250171	93,8	95,2	X	X
CARMEN DE BOLIVAR - AUT	18155		76,5		X	
REPOLON - AUT	6473		27,3		X	
BATALLON NO. 6 - AUT	20516		86,5		X	
LA GRAN VIA - AUT	19760	236216	83,3	89,9	X	X
LA LOMA CARBONES - AUT	16706	238697	70,4	90,8	X	X
AEROPUERTO PUERTO BOLIVAR - AUT		175400		66,7		X
TOROMANA - AUT	17738	143582	74,8	54,6	X	X
AEROPUERTO LOS GARZONES	15554	153364	65,6	58,4	X	X
AYAPEL - AUT		174696		66,5		X
INCODER - AUT	13248	140924	55,8	53,6	X	X
LA PAULINA - AUT		252413		96,0		X
SABANALARGA - AUT		175861		66,9		X
SINCERIN - AUT		203819		77,6		X
AEROPUERTO E. CORTISSOZ - AUT	21292		89,7		X	
EL TESORO IDEAM - AUT	16018		67,5		X	

Fuente: Autor con datos del IDEAM.

La Figura 11 muestra la radiación solar global diaria y una línea de tendencia (línea roja) con un 95 % de intervalo de confianza (sombra gris) para los 15 puntos de medición del recurso solar. Dada la cantidad de datos faltantes, el análisis de la estacionalidad del recurso solar en cada punto de medición puede tender a sobreestimar o subestimar dicho comportamiento, ya que existen brechas las cuales pueden ser debido al mal funcionamiento de las EMAS o posibles fallas en los procesos de validación. No obstante, observando las series de las 15 estaciones se tiene que tres de ellas Fedearroz, Batallón No.6 y Universidad Tecnológica, las cuales tienen mayor cantidad de datos en sus series, de acuerdo a la Figura 11, se observa que el primer cuarto del año (EFM) y los meses de junio y julio la radiación solar global presenta un alto valor promedio por encima de los 500 W/m<sup>2</sup> en el caso de Fedearroz y 1100 W/m<sup>2</sup> en la estación Universidad Tecnológica, este comportamiento estacional es igual en todos los años bajo estudio.

Figura 11. Series de tiempo para los promedios diarios de la radiación solar global en el horizonte de análisis de 5 años (2014-2018).

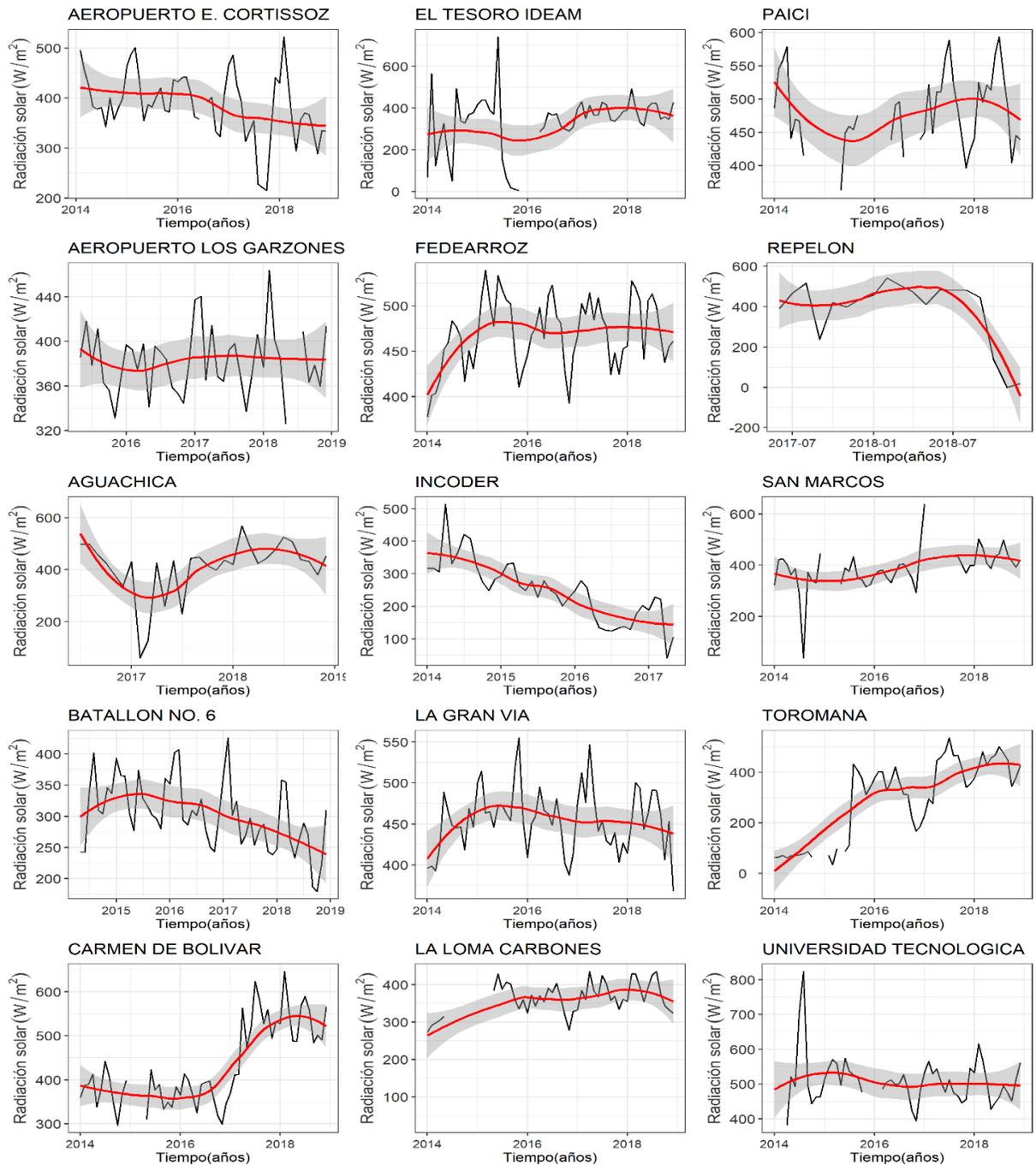


Fuente: Autor con datos del IDEAM

---

En el caso de los promedios mensuales para las series temporales de la Figura 12, puede observarse una menor variabilidad respecto a los promedios diarios debido a las dinámicas del clima de un día, por ejemplo, el rápido desplazamiento de las nubes y otros factores astronómicos. La mayor variabilidad local de la irradiancia solar se debe a la inclinación del eje rotacional de la Tierra con respecto a su órbita, conocido como oblicuidad. Esto causa variación tanto en las horas de brillo solar como en la intensidad de la radiación global incidente (cantidad por unidad de área). Estos factores astronómicos tienen dos características clave: son completamente predecibles y dominan la variabilidad estacional de la irradiancia (Bett & Thornton, 2016).

Figura 12. Series de tiempo para los promedios mensuales de la radiación solar global en el horizonte de análisis de 5 años (2014-2018).



Fuente: Autor con datos del IDEAM

En general todas las series de tiempo de radiación solar global presentaron grandes variaciones, aunque para determinar una tendencia resulta un poco complejo debido a la falta de continuidad en las series. La Universidad Tecnológica tuvo el valor mensual más alto con valores alrededor de 824 W/m<sup>2</sup>. Repelon, Incoder y Batallón No. 6 presentan una línea de tendencia negativa, lo que indica que la irradiancia solar se redujo en estos lugares durante los cinco (5) años en estudio. Aeropuerto Los Garzones, Fedearroz, La Gran Vía y Universidad Tecnológica puede decirse que presentaron menores amplitudes estacionales en los promedios diarios. El valor mensual más bajo de radiación solar global se observó para la estación El Tesoro con un valor de 5,23 W/m<sup>2</sup>.

Para entender el comportamiento de la variable radiación solar global registrada por las diferentes EMAS, se relaciona este con el monitoreo del fenómeno de El Niño y La Niña en Colombia en los boletines publicados 2014 - 2018 por el IDEAM. Al comienzo del horizonte de análisis, en el primer trimestre del año 2014, no hace presencia el ENOS en ninguna de sus fases, sin embargo, históricamente en enero se inicia la primera temporada seca del año en gran parte del país (IDEAM, 2014). Sobre el inicio del segundo trimestre del 2014 se dio inicio a un fenómeno de “El Niño” entre julio y septiembre del 2014, coincidiendo con el Índice Oceánico del Niño (ONI por sus siglas en inglés) el cuál es un índice que representa la medida del ENOS en donde se evidencia la existencia de la fase cálida en rojo y fase fría en azul (ver Figura 13) (NOAA, 2021).

Figura 13. Valores del índice Oceánico de El Niño.

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5

Fuente: NOAA (NOAA, 2021).

Para el segundo año (2015) del horizonte bajo análisis se presentó apoyados en los valores del ONI publicados por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los

Estados Unidos todo el año 2015 presentaron valores positivos evidenciando la presencia de la fase cálida del ENOS, confirmado por las señales del acoplamiento océano-atmósfera registrado por el IDEAM y declarando la presencia del “El Niño” en el país durante del 2015 (IDEAM, 2015b). Para el 2016, la presencia de “El Niño” continuó donde extendió su máxima intensidad entre febrero y marzo, evidenciado en las series de la radiación solar global de la Figura 12, donde se presenta un pico en los niveles de radiación en el primer trimestre del año. Luego a mediados del mismo año se presenta una neutralidad en las condiciones del ENOS, para luego dar paso en el último trimestre de este año a una fase de “enfriamiento” donde el valor del ONI fue de  $-0,8^{\circ}\text{C}$  estando en el umbral de las condiciones de La Niña, lo que se refleja en las series de tiempo de la radiación con una reducción hacia finales del año 2016 (IDEAM, 2016c).

Para el año 2017 ya es neutralizada la presencia del ENOS, sin embargo, se debe tomar en cuenta el comportamiento de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) ya que este influye en esta variable, presentándose dos temporadas de sequía, evidenciado por la presencia de dos picos en los niveles de radiación global en algunas estaciones como Fedearroz, Paíci, La Gran Vía y Batallón No 6. Adicionalmente, el IDEAM reporta para finales de los 2017 valores del ONI de  $-0,8^{\circ}\text{C}$  considerado como un indicador bastante robusto para determinar la fase fría del ENOS (IDEAM, 2017b).

Para el año 2018 continúa el viento de La Niña reduciendo así los niveles de radiación, razón por la cual se presentan las líneas de tendencia negativa en los valores de radiación medidos por las EMAS implementadas en el estudio. Hacia mediados de este año, se presenta una reducción en el valor absoluto del ONI presentando valores de  $-0,4^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, basados en las proyecciones de la NOAA, se evidenció la presencia del inicio a la condición de “El Niño” (IDEAM, 2018b).

#### 4.4. Series de tiempo para la velocidad del viento

Medir el viento superficial es difícil, dado que éste presenta variaciones diurnas y locales dentro de una dinámica de gran escala (IDEAM & UPME, 2017), las variaciones locales son causadas por frentes climáticos en movimiento (Widen, 2011) y la variación diurna del viento superficial también juega un papel muy importante en las circulaciones locales y en algunos eventos meteorológicos asociados a ellas, entre estas circulaciones podemos destacar la brisa mar-tierra y la brisa valle-montaña (IDEAM & UPME, 2017). Pero comprender el comportamiento de las corrientes de viento es una tarea fundamental para los estudios meteorológicos y energéticos. Por lo general, las corrientes de viento son analizadas basadas en dos criterios, su dirección y velocidad, donde las mediciones de estas variables son tomadas *in-situ* o mediante sensores remotos, siendo la segunda una alternativa a las mediciones *in-situ* (Silva et al., 2016). Las técnicas de medición remota del viento con sonido (sodar), luz (lidar) y ondas electromagnéticas (radar) las cuales son poco comunes en las redes meteorológicas de rutina (World Meteorological Organization, 2014), en cuanto a las mediciones *in-situ*, estas suelen realizarse a 10 m de altura con el fin de evitar perturbaciones provocadas por el rozamiento con la superficie (IDEAM & UPME, 2017).

Los datos de velocidad del viento para la región Caribe al igual que con los datos del recurso solar fueron tomados de la red de EMAS del IDEAM. Las series temporales resultantes de las mediciones tomadas por las EMAS tienen una escala temporal diezminutal<sup>11</sup> para el horizonte del estudio de cinco (5) años (2014-2018). De las mediciones obtenidas se conformaron 26 series de tiempo para los 13 puntos de medición del recurso eólico. De esta manera, las series diezminutales de la velocidad del viento fueron promediadas en escalas diarias y mensuales, observando los resultados en todo el horizonte de estudio en la Figura 14 y la Figura 15 respectivamente.

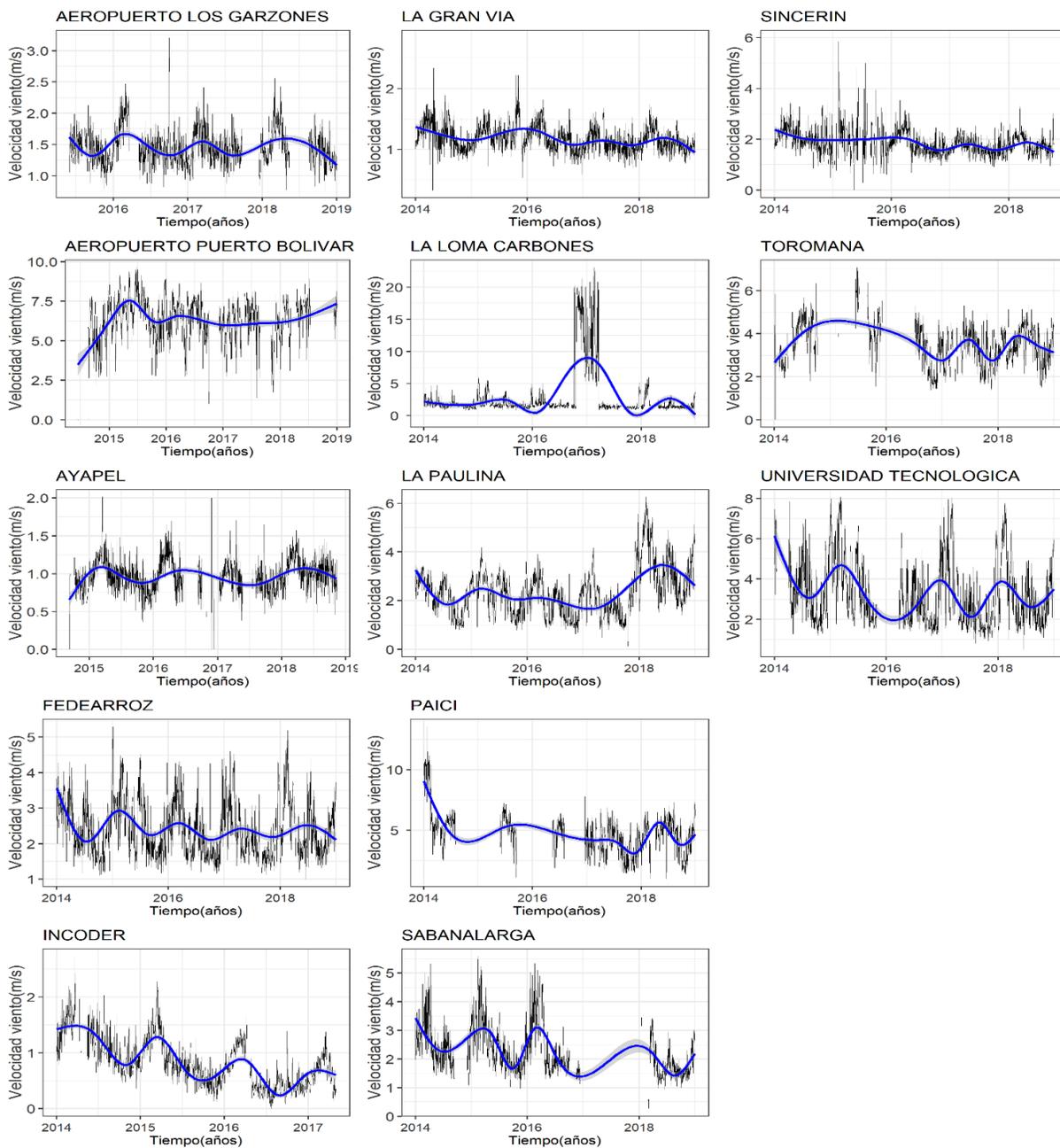
La Figura 14 exhibe los promedios diarios de la velocidad del viento a 10 m de altura y una línea de tendencia (línea azul) con un intervalo de confianza de 95 % (sombra gris) para los 13 puntos de medición. Las estaciones con mayor cantidad de registros son Fedearroz, La Loma Carbones

---

<sup>11</sup> Una medición u observación tomada cada diez minutos.

y La Paulina, esta última estación presenta un 96 % de datos para el horizonte del estudio, con un valor promedio diario de 4 m/s, sin embargo, finalizando el año 2017 y a comienzo del 2018 presentó un incremento con valores alrededor de 6 m/s, posiblemente por el paso de una tormenta tropical o un huracán, dado que estos eventos presentan altas probabilidades de ocurrencia en la región objeto de estudio lo cual se observa con el aumento general de las velocidades promedio del viento (T.F et al., 2013). Además, estos valores pueden presentarse también por mal funcionamiento de los sensores que miden las corrientes de viento. No obstante, de acuerdo con (Ortiz Royero, 2012) el área del Caribe colombiano es mayormente vulnerable a tormentas en el archipiélago de San Andrés, ejemplo de ello lo sucedido en el 2020 con el paso del huracán Iota, el cual alcanzó la categoría 4 al tocar tierra (Cappucci, 2020) dejando a su paso una persona muerta y el 98 % de la infraestructura de la isla de Providencia afectada (El Tiempo, 2020), dicha vulnerabilidad también se presenta en la costa continental.

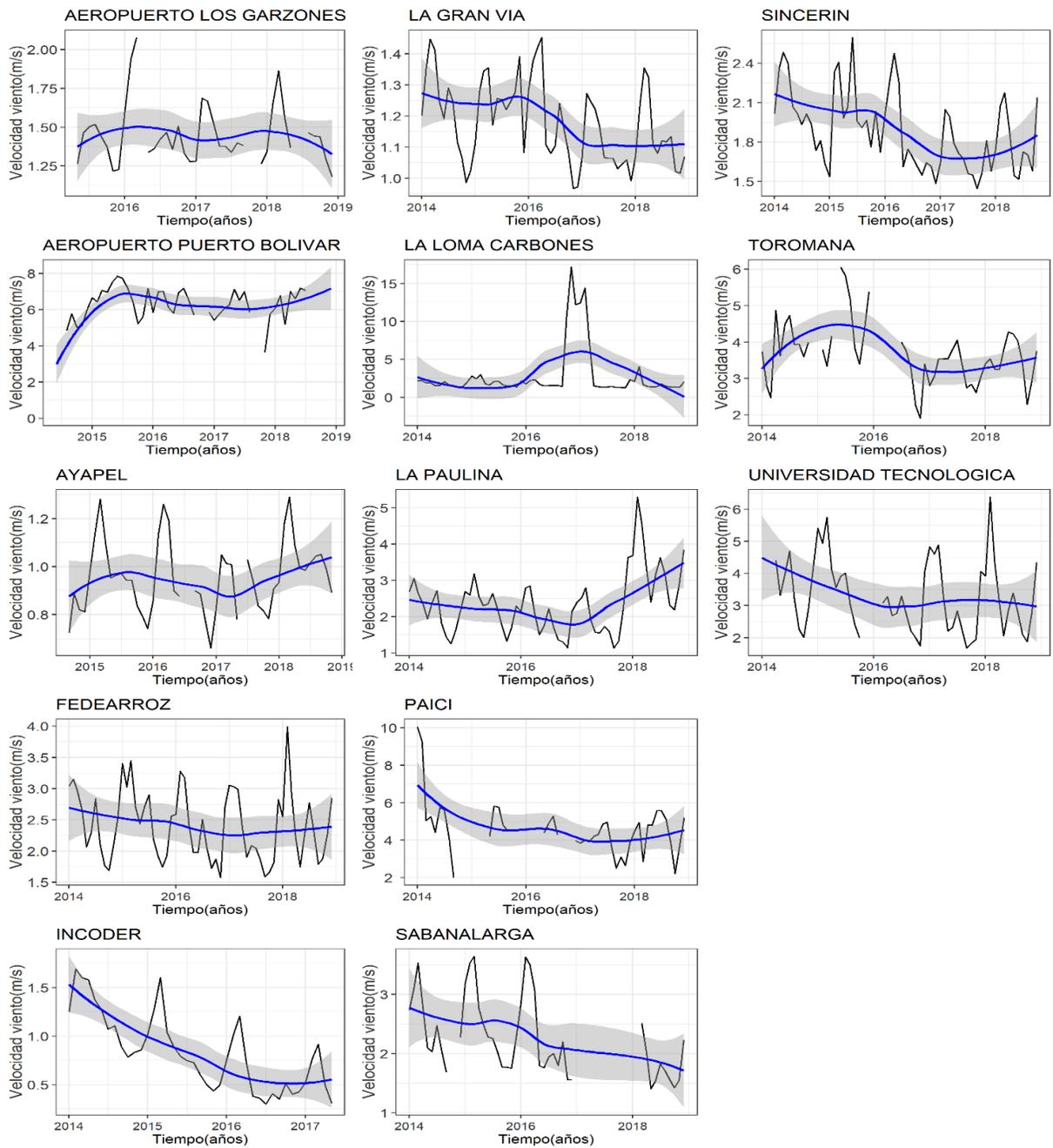
Figura 14. Series temporales de los promedios diarios de la velocidad del viento para el horizonte de análisis de 5 años (2014-2018).



Fuente: Autor con datos del IDEAM.

En lo que respecta a los promedios mensuales, la Figura 15 exhibe las 13 graficas con promedios mensuales de los puntos de medición en los cinco (5) años de recopilación de datos. En las series mensuales de la velocidad del viento Figura 15 se evidencia como se experimenta un ciclo climatológico bimodal en varias series (Hoyos et al., 2017) a razón de la migración meridional de la ZCIT, una elongada zona a lo largo del ecuador donde se forman las nubes convectivas (Henao et al., 2020; Poveda & Mesa, 2000; Poveda et al., 2006), presentándose fluctuaciones para inicios del año 2016 sobre la latitud de 2°N mientras que para diciembre del mismo año las fluctuaciones sobre la latitud fueron entre 7°N - 13°N (IDEAM, 2016b) y la dinámica de las corrientes superficiales controlaron el clima general del Caribe colombiano, determinando así dos períodos climáticos definidos por el rango de las precipitaciones: un período de sequía, el cuál ocurrió de diciembre a marzo caracterizado por el aumento en los vientos alisios del norte concordando con el análisis estacional del viento **realizado por los autores del trabajo “Complementariedades Anuales e Interanuales de Fuentes de Energías Renovables en Colombia”** (Henao et al., 2020) y una fase de lluvias de abril a noviembre. Al finalizar mayo ocurre un corto verano conocido como **“Veranillo de San Juan” (un período transicional originado como una consecuencia de la llegada de los vientos alisios del sureste)** (Departamento de Física y Geociencias, Universidad del Norte et al., 2018).

Figura 15. Series temporales de los promedios mensuales de la velocidad del viento para el horizonte de análisis de 5 años (2014-2018).



Fuente: Autor con datos del IDEAM.

En lo relacionado con los efectos ocasionados por la presencia de eventos de escala global como el ENOS en las disponibilidades de recurso eólico sobre el país y en especial sobre la región Caribe se presenta en el 2014 un debilitamiento de los vientos procedentes del Este por variaciones significativas de presión en el Pacífico Sur, empiezan entonces a predominar de forma anómala vientos del Oeste (IDEAM, 2014), notándose esta afectación en los bajos valores en las corrientes de viento medidas por las estaciones Toromana, La Paulina e Incoder, centrando la atención en La Paulina dado que tiene un 96 % de datos para el horizonte de estudio, con datos para todo el año 2014 identificando el debilitamiento de los vientos medidos con valores por debajo de los 3 m/s. Para el año siguiente el 2015 se presenta una condición similar en los vientos para la región, donde si bien se evidencia poca formación de nubes por la presencia de la fase cálida del ENOS, ésta favorece a los altos niveles de radiación pero debilita los vientos procedentes del Este (IDEAM, 2015b), comportamiento que no varía en las series respecto al año 2014, exhibiendo valores cercanos los 3 m/s, no obstante, esta afectación no tuvo incidencia sobre los puntos de medición ubicados más hacia el extremo norte de la región, donde se encuentran las estaciones Aeropuerto Puerto Bolívar y Toromana, emplazadas en el municipio de Uribia, registrando valores con velocidades superiores a los 6 m/s para el año 2015.

Para el año 2016, donde se evidencia el inicio del evento de La Niña según los valores del ONI de la Figura 13 implicó que los vientos alisios que normalmente provienen del noreste y del sureste, se fortalecieron aumentando las velocidades de las corrientes de viento en el Caribe (IDEAM, 2016c). Según el IDEAM la temporada de huracanes en el Mar Caribe daba inicio “oficialmente” el 1 de junio y se extendía hasta el 30 de noviembre del 2017, no obstante, no se contó con la actividad ciclónica hasta el mes de junio de 2017 (IDEAM, 2017b), lo que se evidencia en repentinos altos valores de la velocidad del viento en las EMAS Fedearroz, La Loma Carbones y LA Gran Vía.

Sobre el año 2018 se registró un fortalecimiento notorio de los vientos del Este, coincidente con la fase de desarrollo del evento “La Niña”, lo cual se observa en la tendencia de aumento en los valores de viento en las EMAS Incoder, Ayapel, La Paulina, Puerto Bolívar y Sincerin. Luego sobre mediados del mismo año, se observó un patrón asociado con las condiciones de neutralidad del evento ENOS (IDEAM, 2018b).

#### 4.5. Cálculo de coeficientes de correlación de Pearson

Dadas las series de velocidad del viento  $W_j(x, y, t)$  y de la radiación solar global  $S_j(x, y, t)$  para los días  $t = 1, N_{tot}$  (dónde  $N_{tot-d} = 1.825$  representa el número total de días o  $N_{tot-m} = 60$  para número de meses en los 5 años de estudio), los coeficientes de correlación se calculan de manera teórica mediante la ecuación (5) y de manera práctica por medio del software estadístico de código libre R-CRAN.

$$R_j(x, y) = \frac{\sigma_{j,ws}}{\sqrt{(\sigma_{j,w})(\sigma_{j,s})}} \quad (5)$$

Donde:

$$\sigma_{j,ws} = \sum_{t=1}^{N_{tot}} \{[W_j(x, y, t) - W(x, y)][S_j(x, y, t - s(x, y))]\}, \quad (6)$$

$$\sigma_{j,w} = \sum_{t=1}^{N_{tot}} [W_j(x, y, t) - W(x, y)]^2, \quad (7)$$

$$\sigma_{j,s} = \sum_{t=1}^{N_{tot}} [S_j(x, y, t) - S(x, y)]^2 \quad (8)$$

Dónde  $W(x, y)$  y  $S(x, y)$  son los promedios diarios o mensuales de la velocidad del viento y de la radiación solar global respectivamente. Los coeficientes de correlación pueden variar entre el rango  $[-1, 1]$ . Cuando se comparan dos grupos de datos (W y S) un valor de 1 describe una relación lineal entre W y S perfectamente, con todos los datos alineándose con una pendiente positiva, un valor de -1 señala que cuando los valores de S incrementan, los valores de W disminuyen o de la manera contraria, presentando un comportamiento inverso y un valor de 0 indica que no existe una relación lineal entre las variables.

Dado que las unidades de los coeficientes de correlación son adimensionales y que éstos buscan medir la fuerza o magnitud de la correlación de las dos variables o como se suplen una variable con la otra, es necesario realizar un proceso de estandarización a la series de los recursos, además, de un escalamiento debido a que las unidades de las variables meteorológicas son diferentes, lo que implica que el paso de convertir unidades adimensionales debe ser realizado previo al cálculo de los coeficientes de correlación.

La complementariedad diaria entre la radiación solar y la velocidad del viento es menos influenciada por el ciclo día-noche, debido a los efectos climatológicos locales como, por ejemplo, el rápido movimiento de las nubes y al efecto rotacional de la tierra, donde éste puede indicar una complementariedad a corto y mediano plazo entre los recursos, mientras que la complementariedad mensual es un buen indicador de los efectos estacionales.

Para este estudio, los datos de las observaciones nocturnas no se toman en cuenta para los cálculos de los promedios y de las correlaciones. Incluir las mediciones en la noche solo tendría sentido cuando la velocidad del viento presente valores suficientemente altos para compensar la ausencia de radiación. Solo eventualmente como lo explican los valores negativos de correlación corresponden a una correlación inversa efectiva de los recursos.

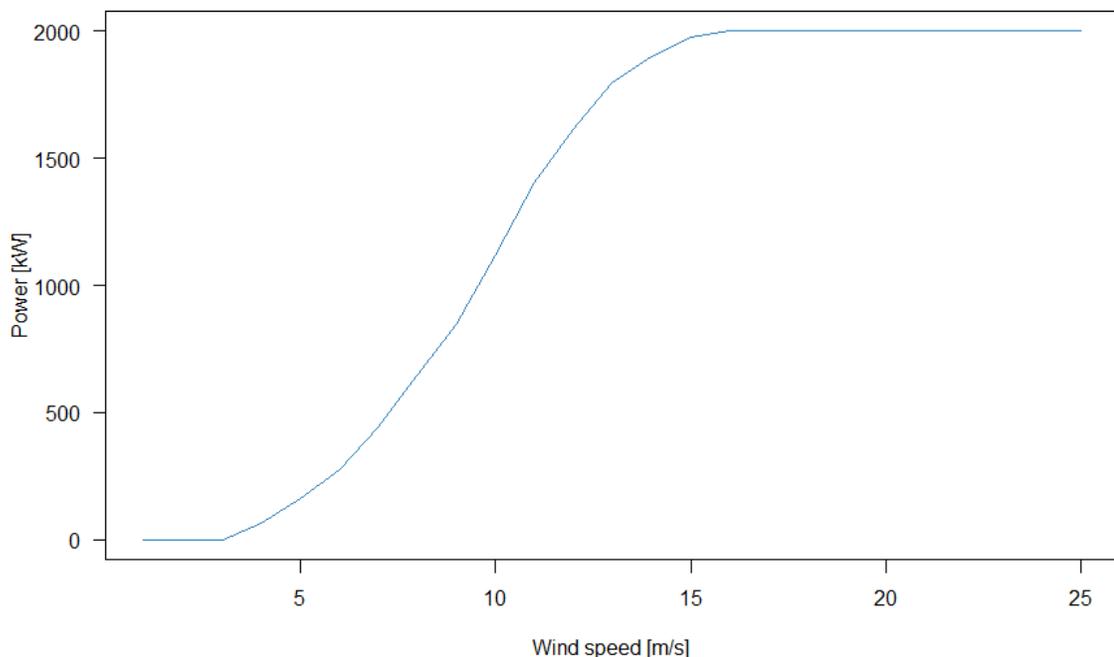
#### 4.6. Estimación de la producción de energía eólica y solar

Una vez se estudió el potencial de las corrientes de viento y la irradiancia presentes en la región Caribe colombiana mediante el uso de los datos medidos *in-situ* por las EMAS para diferentes latitudes, como también se plasmó el método para analizar la posible relación lineal que guardan las variables de velocidad del viento y la radiación solar global, un paso adicional que comprende el presente estudio, consiste en determinar mediante el cálculo teórico la energía eólica y solar estimada con los recursos disponibles en la región. Para ello, se implementaron dos diferentes métodos para lograr obtener dicha energía teórica, centrando este procedimiento en las EMAS que presentan una complementariedad mediana y/o fuerte.

#### 4.6.1. Estimación de la energía eólica

Para calcular el potencial de energía eólica, por medio de las mediciones de las velocidades del viento realizados por las EMAS las cuales presenten valores de correlación inversos con las estaciones midiendo el recurso solar, los perfiles de viento son transformados en datos de generación de energía eléctrica por medio de una función de salida para una turbina eólica específica, en este caso, se utilizó la curva característica de una turbina eólica marca Vestas de 80 metros de altura y una capacidad nominal de generación de 2 MW, que es la turbina eólica que será implementada en el nuevo parque solar Guajira II ubicado en el corregimiento del Cabo de la Vela, municipio de Uribia (Energías Renovables El periodismo de las energías limpias, 2020). Este proyecto, contará con 10 aerogeneradores, cubriendo un área total de 5,5 hectáreas y una capacidad instalada de 20 MW, equivalente al consumo de 33.295 familias colombianas (Presidencia de la República, 2021).

**Figura 16.** Curva de potencia característica de aerogenerador Vestas V80 de 2 MW de potencia nominal.



Fuente: R-CRAN

El valor obtenido, representa que tanta energía puede ser generada por dicha turbina con el perfil de viento disponible en cada punto donde se emplaza cada EMA seleccionada para este análisis. Algunos detalles técnicos del aerogenerador deberán ser asumidos al evaluar la cantidad general de energía cinética que puede ser transformada en energía eléctrica, para ello, la curva de potencia que representa la turbina seleccionada (ver Figura 16) con una densidad de aire de  $1.225 \text{ kgm}^{-3}$ . La función de salida expresada en kW muestra que la turbina inicia su producción a partir de una velocidad del viento de 4 m/s y que tiene un valor de corte en 15 m/s. Adicionalmente, se puede notar que la curva característica utilizada en el estudio proporciona una relación cuantitativa estimada entre la velocidad del viento y la generación de energía eléctrica. Por otro lado, como se explicó en el capítulo 4.4 la variable de la velocidad del viento se ve afectada por diferentes dinámicas y parámetros meteorológicos, que para efectos de la estimación de la producción de energía eólica no son tenidos en cuenta (Miglietta, Huld, & Monforti-Ferrario, 2017).

Mediante el software estadístico R-CRAN, utilizando el paquete “bReeze” de la librería CRAN, se procede a realizar el cálculo teórico de la energía eólica. Para ello, inicialmente se calcula la frecuencia de ocurrencia y la velocidad del viento promedio por cada sector de la dirección del viento. Luego se calculan los parámetros de forma y escala de la distribución Weibull por sector de dirección del viento, un método estadístico que provee el mejor ajuste y una cercana aproximación a la distribución que representa la velocidad del viento (Azad, Rasul, Alam, Uddin, & Mondal, 2014).

#### 4.6.2. Estimación de la energía solar

Con el objeto de calcular la energía solar teórica basados en las mediciones de las diferentes EMAS ubicadas en la región Caribe, se utilizó el software PVsyst V7.2, el cual ofrece una versión de prueba por 30 días. Dicha herramienta permite simular diferentes tipos de instalaciones solares fotovoltaicas, sin embargo, para el presente estudio se simularon tres (3) instalaciones similares para los puntos donde se ubican cada EMAS las cuales presentaron correlaciones o complementariedad significativas.

---

Las EMAS para la estimación de la energía solar, fueron Carmen de Bolívar, Toromana e Incoder, ubicadas en tres diferentes departamentos de la región. Con los datos de los promedios mensuales, como datos de entrada, se modelaron para cada sitio una instalación compuesta por 630 módulos solares fotovoltaicos con potencia nominal de 450 kWp conectados en 35 cadenas de 18 módulos en serie, los cuales generan energía entregándola a 2 inversores DC/AC con potencia nominal de 100 kWp, de esta manera, se obtiene una instalación de 284 kWp y 200 kWac conectado a la red eléctrica. El modelo del procedimiento aplicado en el estudio basado en los análisis de la herramienta computacional PVSyst (PVSyst, 2021).

Básicamente el procedimiento consiste en seleccionar la ubicación geográfica para el lugar de estudio y la base de datos meteorológica, posteriormente se determina la inclinación y posición de la instalación de los módulos, continuando con la selección de los equipos y cantidades definiendo así el sistema, para luego modificar parámetros como pérdidas, horizontes, sombras y demás con el objetivo de asemejar lo más posible a un sistema real de producción solar.

## 5. RESULTADOS

La evaluación de la posible relación que guardan las variables radiación solar y velocidad del viento, se realiza inicialmente evaluando la correlación espacial de cada variable de manera individual, en orden de analizar y comprender la distribución de la disponibilidad de cada recurso en el área de la región, de esta manera permite dar la posibilidad de contemplar posibles puntos estratégicos para el emplazamiento de plantas de generación que aprovechen los recursos energéticos y obtener una producción continua de la misma fuente. En la evaluación de correlación diaria y mensual de cada variable por separado, sirve para ayudar a entender la variabilidad del recurso, lo cual es clave pues debe tenerse en cuenta en la planeación de los despachos de energía de las plantas centralizadas.

### 5.1. Correlación diaria entre los recursos velocidad del viento y radiación solar global en la región Caribe de Colombia

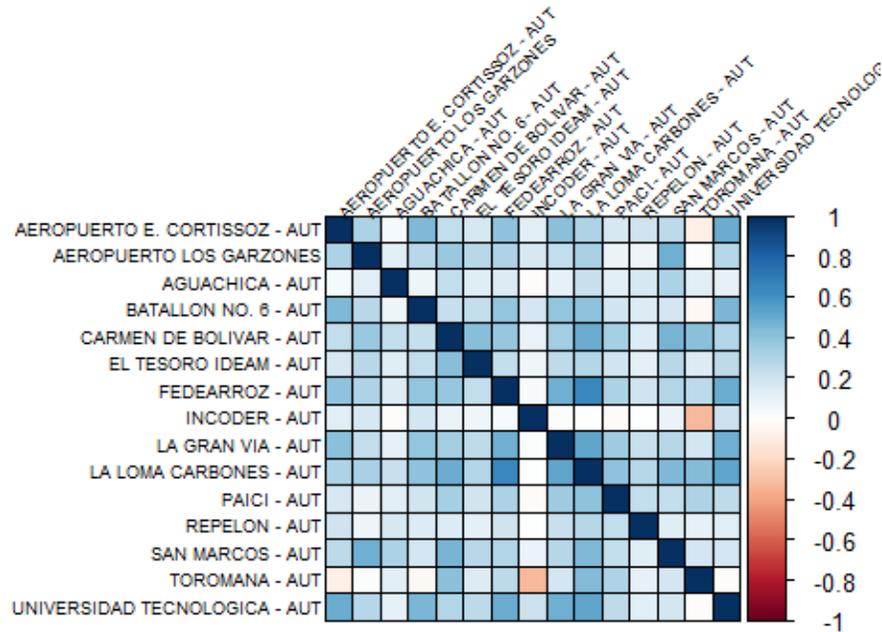
Mediante el comando llamado “**rcorr**” del software R-CRAN se obtienen la matriz de coeficientes de correlación “**r**”, la matriz del número de observaciones “**n**” utilizadas en el análisis entre el par de variables o para la misma variable únicamente y la matriz “**p**” de los **p**-valores para cada recurso individualmente, obteniendo, así como resultado las matrices de coeficientes de correlación diario expuestas en los puntos a continuación.

### 5.1.1. Correlación diaria de la radiación solar global para los puntos de medición de la región Caribe

La Figura 17 muestra la matriz de coeficientes de correlación con una escala de colores para los promedios diarios de la radiación solar global en la región Caribe. En general, puede observarse que el recurso solar tiene una correlación débil con un valor promedio entre todos los puntos de 0,29, lo que indica que, a través de todo el territorio del Caribe, esta fuente presenta una distribución uniforme con comportamientos casi similares en todos los puntos de medición.

Además, teniendo en cuenta las estaciones meteorológicas ubicadas geográficamente próximas o en un mismo departamento como las EMAS Batallón No.6, La Gran Vía y Universidad Tecnológica en el departamento de Magdalena, exhiben un comportamiento que es moderadamente correlacionado con un coeficiente promedio de 0,44, en el departamento del Cesar dónde se ubican las estaciones Aguachica, Fedearroz y La Loma Carbones, presentan un coeficiente promedio con un valor de 0,34, indicando que entre más cercano estén los puntos, se presenta un comportamiento similar o correlacionado (Widen, 2011), dado que las estaciones siguen un comportamiento estacional y patrones de la radiación diurnos muy similares.

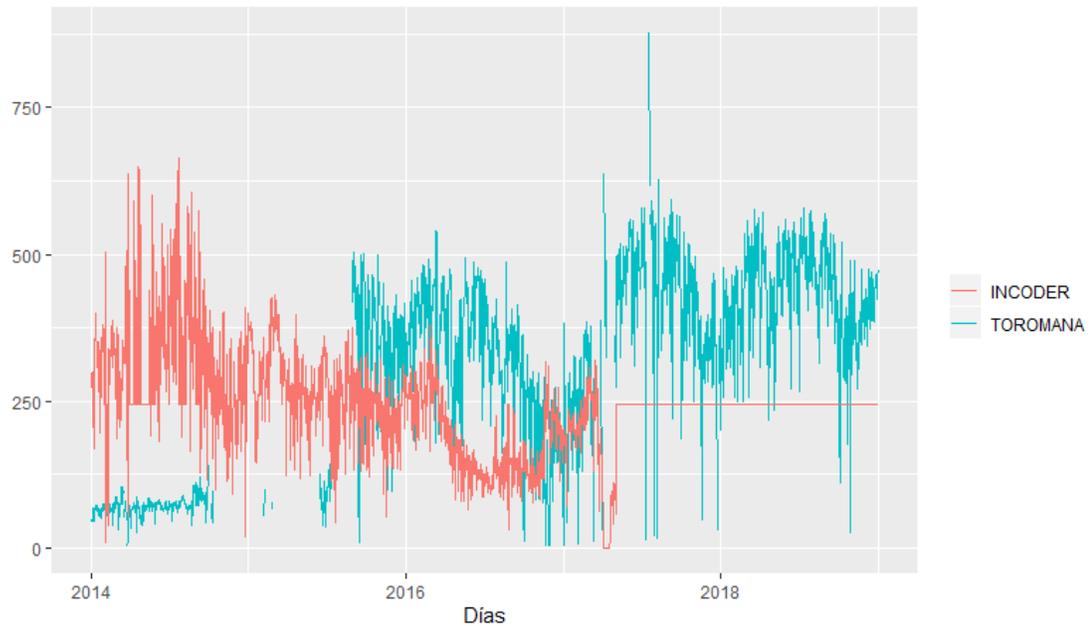
Figura 17. Matriz de coeficientes de correlación para los promedios diarios de la radiación solar global para todos los puntos de medición en la región Caribe.



Fuente: elaboración propia.

Las EMAS que presentan un comportamiento complementario o con una correlación inversa una respecto a la otra o que exhiben un valor de coeficiente negativo son Toromana ubicada en el departamento de La Guajira e Incofer emplazada en el departamento de Córdoba con un coeficiente de correlación de -0,32, indicando que cuando en el norte de la región se presentan bajos valores de radiación, en el sur pueden presentarse valores altos que suplan este déficit de radiación en el norte, o puede presentarse de manera contraria, comportamiento que puede notarse en la Figura 18.

**Figura 18.** Series temporales de los promedios diarios de radiación solar global para las EMAS con comportamientos complementarios.



Fuente: elaboración propia.

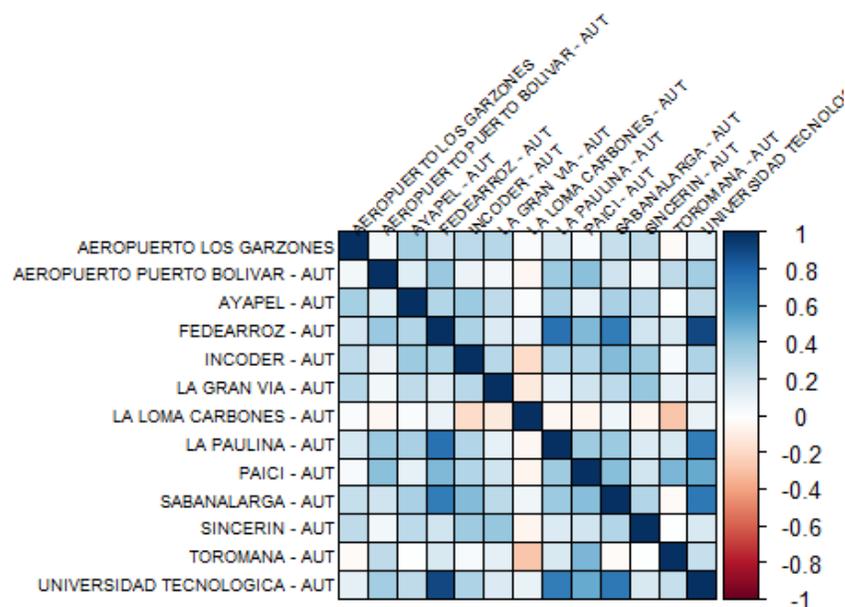
A pesar de que ambas estaciones presentan brechas en sus series, en el período comprendido entre los años 2015 y comienzo del 2017, la estación Toromana suple los bajos niveles de radiación presentados en Incoder. Lo que indica que, durante todo el período bajo estudio, se puede presenciar una producción continua de energía solar, dado que los bajos niveles de radiación se correlacionan negativamente con los lugares donde en la misma fracción de tiempo, exhiben altos valores del recurso.

### 5.1.2. Correlación diaria de la velocidad del viento para los puntos de medición en la región Caribe

Similar que, con las series de radiación, en la Figura 19 se presenta la matriz de coeficientes de correlación diarios para la velocidad del viento, con un coeficiente promedio de 0,29, notando con respecto al recurso solar, que existe un comportamiento ligeramente más inverso al presentarse un mayor número de coeficientes negativos. Esto puede indicar que el recurso eólico puede presentar un perfil continuo o un “suavizado” en su curva de producción dado que cuánto más disperso sea el aprovechamiento del recurso, más soporte y continuidad habrá dado a su correlación inversa.

Cuando se analizan los puntos de medición geográficamente próximos, en el departamento de La Guajira con puntos midiendo la velocidad del viento, se presenta un coeficiente promedio de 0,36, notándose una leve correlación entre el mismo recurso.

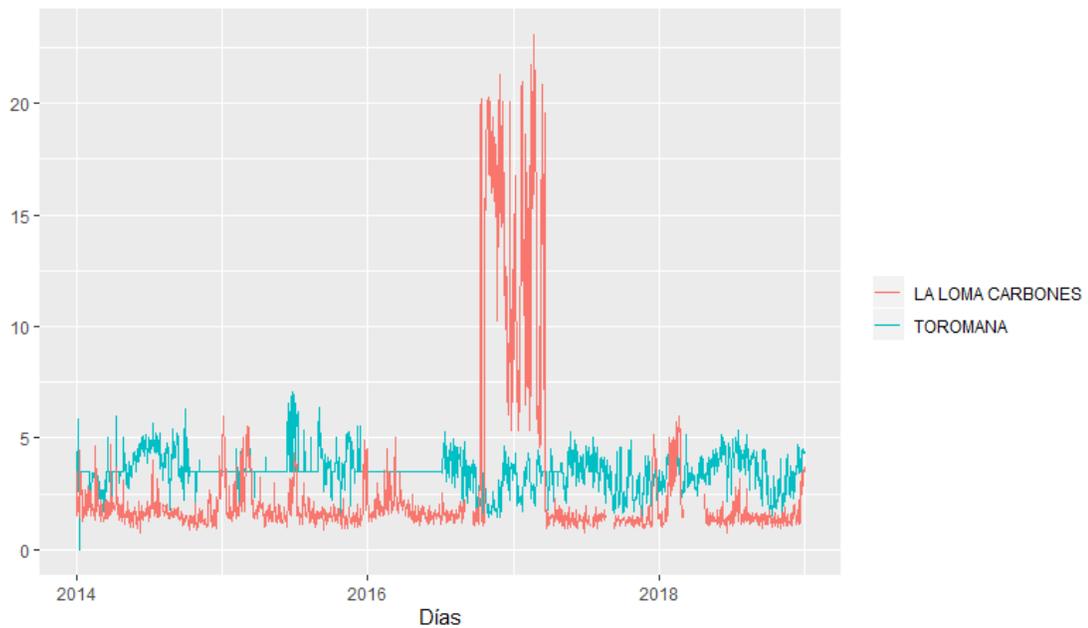
**Figura 19.** Matriz de coeficientes de correlación para los promedios diarios de la velocidad del viento para todos los puntos de medición en la región Caribe.



Fuente: elaboración propia.

En el caso contrario, puede notarse el punto de mayor correlación inversa o con una correlación negativa más significativa, obtenida entre el par de puntos Toromana y La Loma Carbones como se muestra en la Figura 20, ubicadas en los departamentos de La Guajira y Cesar respectivamente, separadas a una distancia aproximada de 575 km y con un coeficiente de correlación de -0,28. A pesar de que el valor no se acerca al límite inferior del rango de variación de los coeficientes de correlación, se debe tener en cuenta que la velocidad del viento presenta gran variabilidad diurna y local debido a los frentes climáticos.

**Figura 20.** Series temporales de los promedios diarios de velocidad del viento para las EMAS con comportamientos complementarios.



Fuente: elaboración propia.

La estación La Loma Carbones exhibe en la gráfica de la Figura 20 un comportamiento atípico hacia finales del año 2016 e inicios del 2017, presentando valores que exceden la media, resaltando que los datos de la velocidad del viento no se les aplicó ningún proceso de validación previo, sin embargo, se observa que el resto de la serie pudo haberse presentado un mal funcionamiento o avería del sensor o de la estación en general durante este período. Por otro

lado, se observa que los bajos valores de las corrientes de aire medidas en La Loma y Carbones pueden ser complementados o suplidos por el viento medido en Toromana.

### 5.1.3. Correlación diaria entre las series de velocidad del viento y la radiación solar global para los puntos de medición en la región Caribe

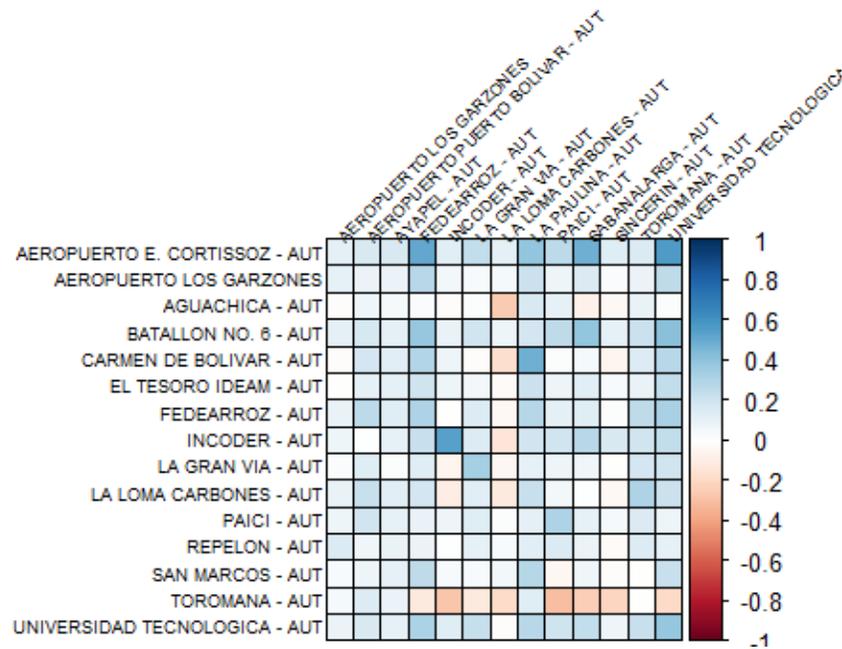
El análisis en la escala temporal diaria frecuentemente es utilizado para la planeación a corto plazo o para propósitos operacionales del sistema eléctrico, como para establecer pronósticos y para la planeación del día siguiente (Henaó et al., 2020).

Luego de analizar la relación que guarda el recurso de manera individual en la región Caribe, a continuación, se presentan los resultados de evaluar la correlación entre ambos recursos conjuntamente. Para obtener los resultados se evaluaron todos los posibles pares, en un análisis de todos contra todos, donde previo al cálculo de los coeficientes, fue necesario estandarizar cada serie de los promedios diarios para eliminar las unidades y efectos del ciclo anual de cada variable convirtiendo a los valores adimensionales. Para este proceso, a cada valor de las series diarias se le sustrajo la media y luego se dividió por la desviación estándar como se muestra en la Ecuación (4).

De la misma manera que se calcularon los coeficientes de correlación para cada recurso por separado, para el par de recursos se evaluaron todas las combinaciones entre las observaciones tomadas por cada punto seleccionado en el estudio en la región Caribe. Es así como se obtuvo la matriz de coeficientes de correlación de la Figura 21. Para el par de puntos con una correlación positiva, se obtiene un valor del coeficiente de 0,48 entre las estaciones Carmen de Bolívar en el departamento de Bolívar y La Paulina en La Guajira. Por otra parte, las estaciones con comportamiento inverso más marcado fueron Toromana y Paici, ambas ubicadas en el municipio de Uribia departamento de La Guajira con un coeficiente de -0,30.

Contrario al caso donde cada recurso es evaluado por separado, las estaciones que mejor se correlacionan están ubicada geográficamente más separadas y las estaciones con un comportamiento inverso o anti correlacionado más marcado tienen ubicaciones próximas.

**Figura 21.** Matriz de coeficientes de correlación para los promedios diarios de la velocidad del viento y la radiación solar global en todos los puntos de medición en la región Caribe.



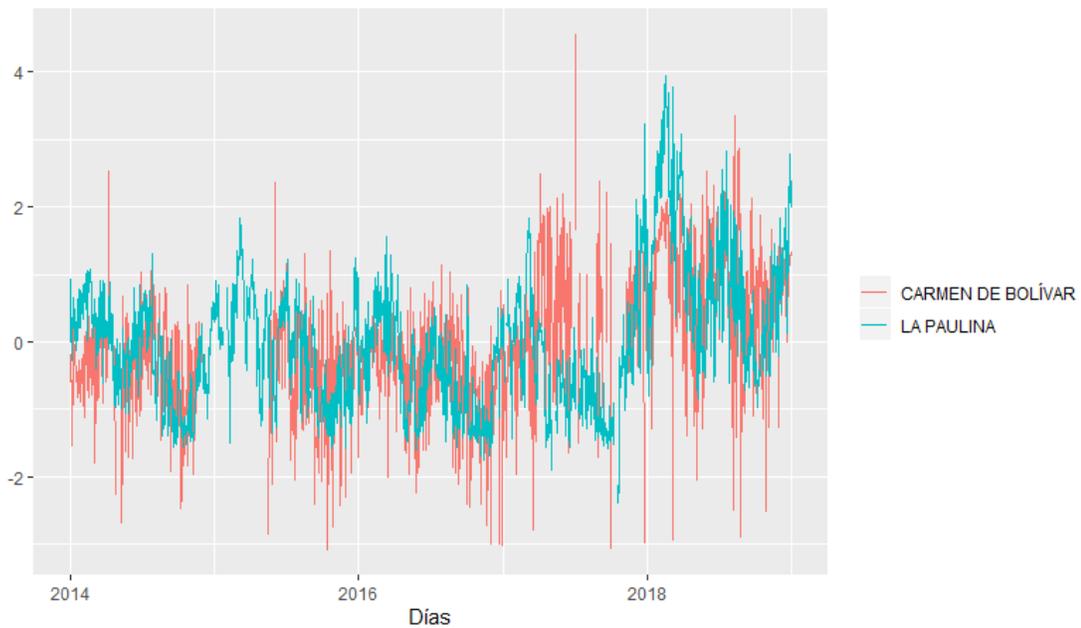
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 21, se presenta la matriz de correlación de promedios diarios de la velocidad del viento y la radiación solar global en todos los puntos de medición seleccionados en la región Caribe, en la Figura 21 puede notarse que la intensidad de los colores es tenue, con la mayoría de los valores de los coeficientes cercanos a cero, indicando que la relación entre estos recursos en una escala diaria es leve. La correlación entre la cantidad total diaria de los recursos eólicos y solares está menos influenciada por el ciclo día-noche y puede proveer una indicación de la correlación inversa a corto y mediano plazo (Monforti et al., 2014). Además, para el territorio de

la región con valores positivos de correlación entre los recursos corresponden a áreas donde se presentan días ventosos y soleados (secos).

A continuación, se muestran las gráficas y su relación por medio de sus series temporales para el par de estaciones correlacionadas positivamente y para el par de estaciones que presentan correlación inversa.

**Figura 22.** Series de tiempo escaladas de los promedios diarios de la velocidad del viento y la radiación solar global para las estaciones con comportamiento mejor correlacionado ( $0 < r < 1$ ).



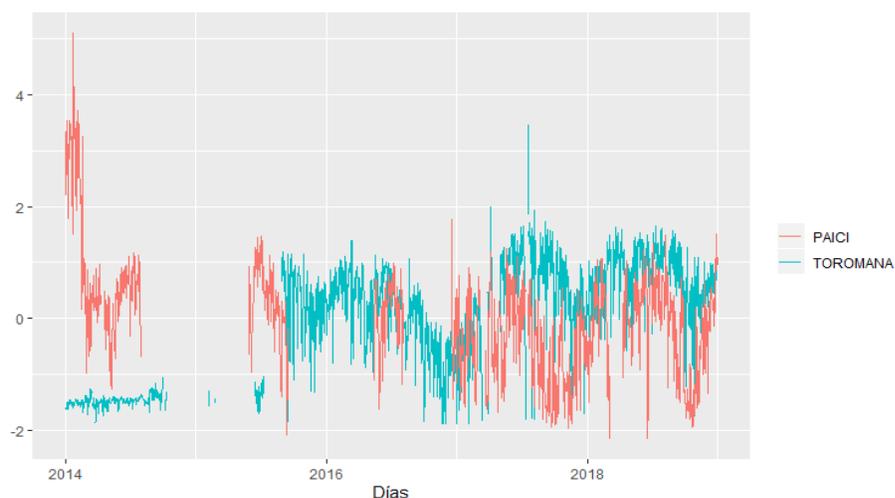
Fuente: elaboración propia.

Las estaciones que exhiben mejor correlación se presentan entre Carmen de Bolívar midiendo la radiación solar global y La Paulina, midiendo la velocidad del viento (Figura 22). Aunque las estaciones se ubican en lugares alejados entre sí, siguen un patrón similar presentando valores máximos al inicio y sobre la mitad del año.

El comportamiento correlacionado entre estas estaciones es particular dado que geográficamente no se encuentran cerca, pero puede interpretarse que mientras en la estación Carmen de Bolívar presenta días soleados, para esos mismos días en la estación La Paulina se miden altos valores de velocidad del viento y de la misma manera para los bajos valores de las variables. Desde un punto de vista energético, puede evaluarse la energía eléctrica que puede producirse en estos puntos y así poder tener una visión de cómo se puede abastecer la demanda por medio de un aprovechamiento conjunto de las fuentes.

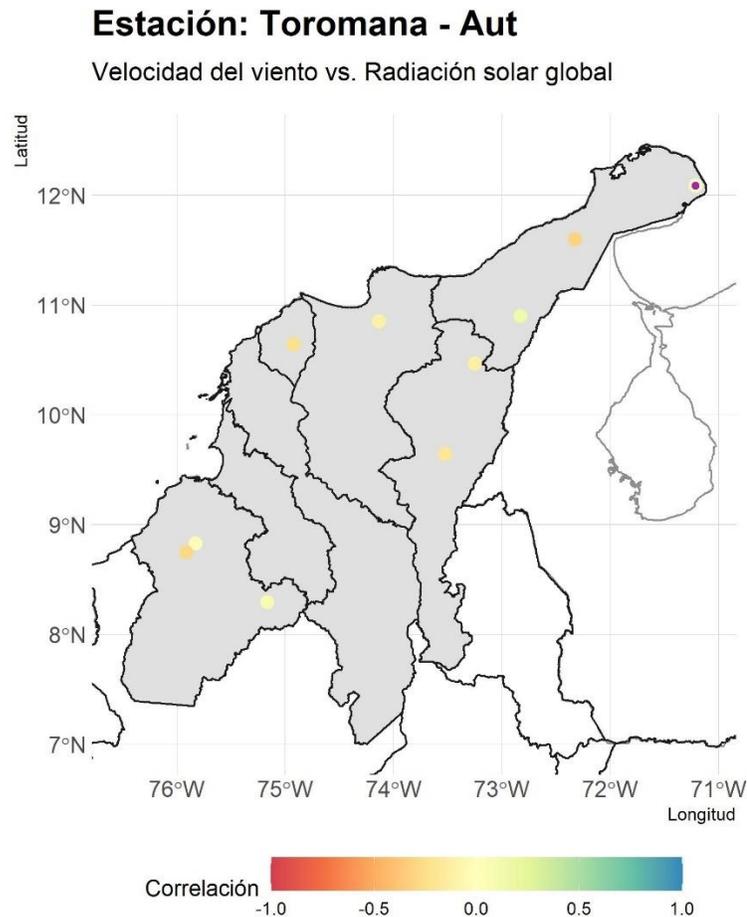
Para el par de estaciones que presentan un comportamiento inverso en sus promedios diarios, obteniendo un coeficiente de  $-0,31$  entre las estaciones Paici y Toromana, como se muestra en la Figura 23 puede notarse como al inicio del horizonte temporal seleccionado en el estudio, los bajos niveles de radiación presentados en Toromana son correlacionados inversamente por los valores altos del viento presentes en el punto de medición Paici. En los años 2017 y 2018 también se aprecia como la radiación supliría los bajos niveles diarios. Se percibe que cuando las estaciones están en ubicaciones cercanas se presentan estos comportamientos opuestos en sus disponibilidades, lo que sugiere la posibilidad de desarrollar sistemas híbridos que aprovechen ambas fuentes en el mismo lugar o en lugares muy cercanos.

**Figura 23.** Series de tiempo escaladas de los promedios diarios de la velocidad del viento y la radiación solar global para las estaciones con comportamiento más complementario ( $0 < r < -1$ ).



Fuente: elaboración propia

**Figura 24.** Mapa geográfico con la distribución de los coeficientes de correlación para los promedios diarios entre la velocidad del viento y la radiación solar global.



Fuente: elaboración propia.

Con base en los resultados de los coeficientes de correlación para los promedios diarios, se tiene que el par de estaciones que presentan un comportamiento complementario, se presenta entre las estaciones Toromana ubicada en el municipio de Uribia en el departamento de La Guajira, en el extremo norte de la región Caribe como se observa en la Figura 24, con un círculo de color magenta, que complementa los valores de velocidad del viento medidos por la estación Paici que se ubica en el mismo municipio de la Uribia, con estos confirmando que se presentan estos comportamiento complementarios entre los recursos cuando la distancia entre los puntos es cerca.

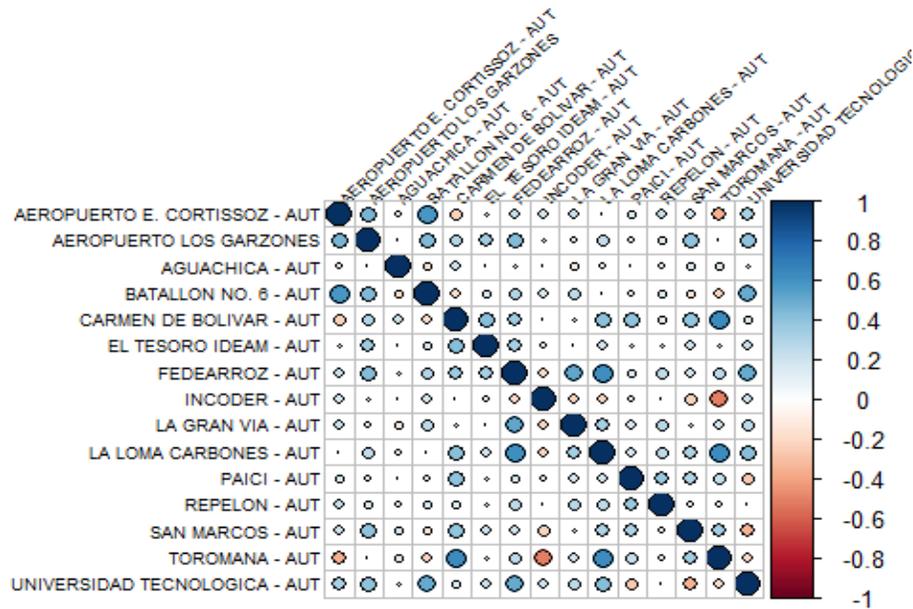
## 5.2. Correlación mensual entre los recursos velocidad del viento y radiación solar global en la región Caribe de Colombia

Luego de realizar el cálculo de los promedios de las series de datos provenientes de las 20 EMAS, se conformaron 20 series mensuales con los 60 meses en los 5 años de horizonte de estudio. Calculando con los promedios diarios, para 3 matrices de coeficientes de correlación las cuales se analizan a continuación.

### 5.2.1. Correlación mensual de la radiación solar global para los puntos de medición en la región Caribe

La Figura 25 muestra la matriz de dimensión 15x15 donde se representan los coeficientes de correlación en escala de colores para los promedios mensuales de la radiación solar global medida por las 15 EMAS en el Caribe continental. Con un coeficiente promedio de 0,21, donde se observa una correlación leve entre el mismo recurso para toda la región.

Figura 25. Matriz de coeficientes de correlación para los promedios mensuales de la radiación solar global en todos los puntos de medición en la región Caribe.

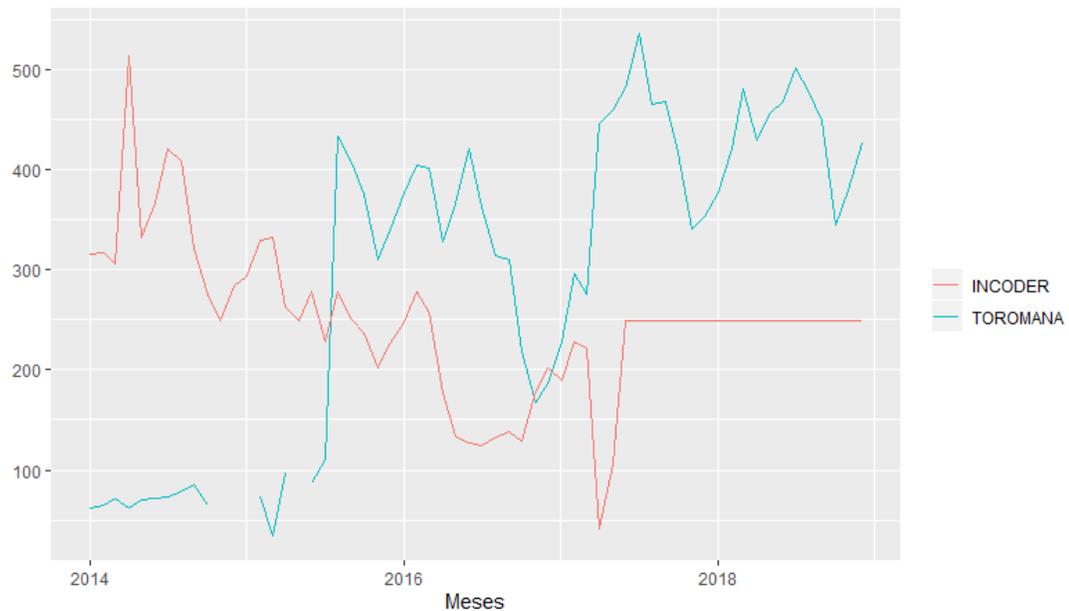


Fuente: elaboración propia.

La matriz de coeficientes de la Figura 25 presenta la magnitud del coeficiente por medio del diámetro del círculo y la escala de colores señala la intensidad de la correlación de cada par evaluado, notando una leve correlación del recurso en todo el territorio, siendo el par más correlacionado o con comportamientos similares entre las estaciones Toromana y Carmen de Bolívar con un coeficiente de 0,632, lo que indica que si bien se encuentran geográficamente distantes presentan un comportamiento correlacionado.

Para el par de estaciones con un comportamiento inverso o complementario, se obtuvo un coeficiente con un valor de -0,509 entre las estaciones Toromana e Incoder, que es el mismo par correlacionado negativamente que se presenta en la evaluación de los promedios diarios, solo que el valor absoluto del coeficiente es mayor, lo que indica que la fuerza o intensidad aumenta cuando se analiza en la escala mensual. Para observar mejor la correlación negativa entre el par de estaciones mencionado anteriormente, la Figura 26 muestra la serie temporal de los promedios mensuales para todo el horizonte de 5 años.

**Figura 26.** Series temporales de los promedios mensuales de radiación solar global para las EMAS con comportamientos complementarios.



Fuente: elaboración propia.

Se puede notar que la variabilidad se reduce cuando se analiza en una escala temporal más amplia. Aunque las estaciones presentan brechas, como es el caso de la estación Toromana, que registra valores por debajo de la media entre 2014 y 2015, quizás por mal funcionamiento del sensor, falta de calibración o algún otro comportamiento anómalo por la no realización de un mantenimiento periódico, y para la estación Incoder existe una ausencia de datos desde mediados del año 2017 en adelante, sin embargo, esta serie temporal de irradiancia exhibe una tendencia decreciente, donde dicha reducción en los valores de la irradiancia en Incoder pueden complementarse con los altos valores en Toromana, además de lo anterior, estas estaciones muestran un comportamiento complementario que puede percibirse en el período de mediados del año 2015 hasta principios del año 2017. Los bajos valores de radiación presentados en el departamento de Córdoba donde se ubica la estación Incoder pueden ser correlacionados inversamente por la radiación solar que es medida en Toromana, que alcanza su valor máximo en julio de 2017 con un valor de 536,13 W/m<sup>2</sup>.

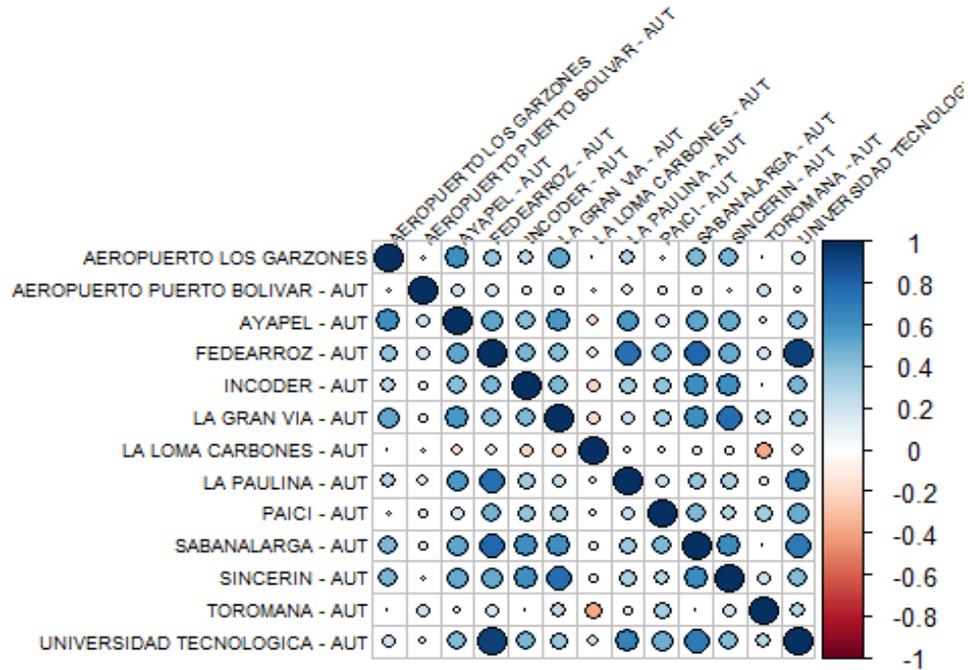
Por otro lado, dado que para una parte del año 2017 y todo el año 2018 no se tuvieron datos de observaciones para la irradiancia solar global en Incoder, esto traduce que, para el cálculo de los coeficientes de correlación, solo se tuvo en cuenta aquellas observaciones donde no falta ningún valor, esto garantiza que se pueda calcular la correlación para cada par de variables sin perder información debido a los valores ausentes en las otras variables. No obstante, al tener menor pares de observaciones para el cálculo de los coeficientes, se infiere de que la precisión en la evaluación de la correlación de las variables meteorológicas se vería afectada, pues al tener menor cantidad de pares de observaciones se puede sobrestimar el valor absoluto del coeficiente respecto a otros valores de coeficientes con mayor número de observaciones.

La distribución de la radiación en la región Caribe tiene un comportamiento uniforme, con valores entre 4,5 y 5 kWh/m<sup>2</sup>/día de acuerdo al Atlas Solar de Colombia (IDEAM et al., 2017), esta región un área apta para el aprovechamiento del recurso solar, lo que es factible debido a la producción suave y continua observada por los puntos donde se ubican los EMAS que se suplen, aprovechando los altos niveles de radiación en unos puntos mientras que en otros los valores de radiación son bajos.

### 5.2.2. Correlación mensual de la velocidad del viento para los puntos de medición en la región Caribe

La Figura 27 muestra la matriz de coeficientes de correlación de Pearson para los promedios mensuales de la velocidad del viento para las 13 EMAS que miden esta variable. El par de estaciones con una correlación inversa más representativa lo presenta el mismo par de los promedios diarios, con un coeficiente de -0,37 las estaciones Toromana y La Loma Carbones exhiben el comportamiento suplementario, no obstante, se presenta una magnitud mayor respecto con el coeficiente diario.

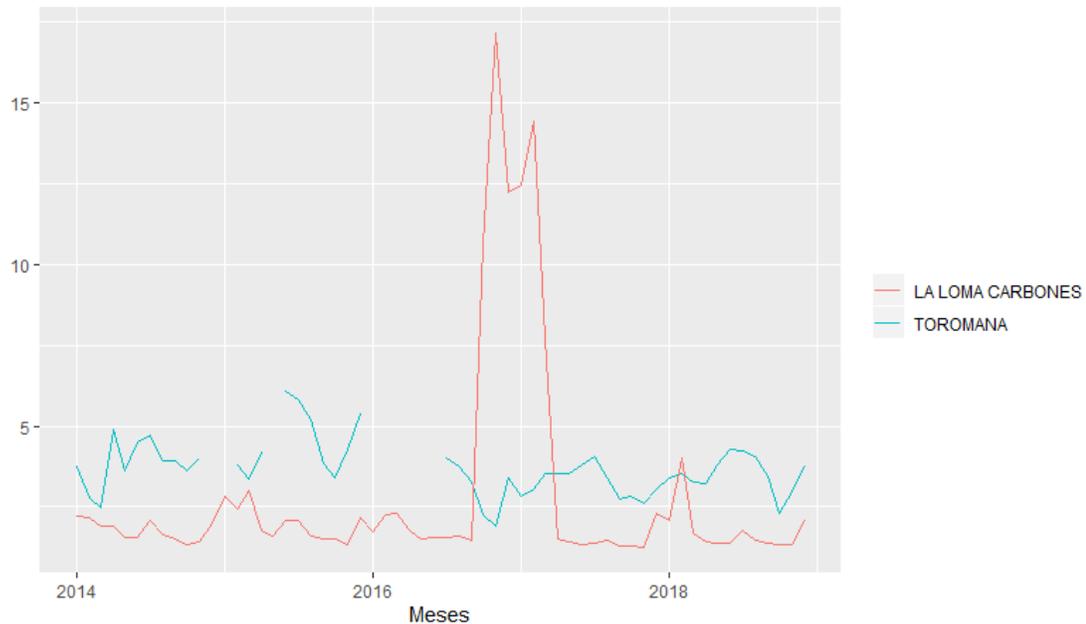
Figura 27. Matriz de coeficientes de correlación para los promedios mensuales de la velocidad del viento en todos los puntos de medición en la región Caribe.



Fuente: elaboración propia.

La intensidad de las correlaciones exhibida en la Figura 27 es más fuertes respecto a cuando se evalúa la correlación del recurso solar con sus promedios diarios, evidenciando como la relación entre el mismo recurso para un área del Caribe incrementa cuando se analiza en una escala temporal mayor.

**Figura 28.** Series temporales de los promedios mensuales de la velocidad del viento para las EMAS con comportamientos complementarios.



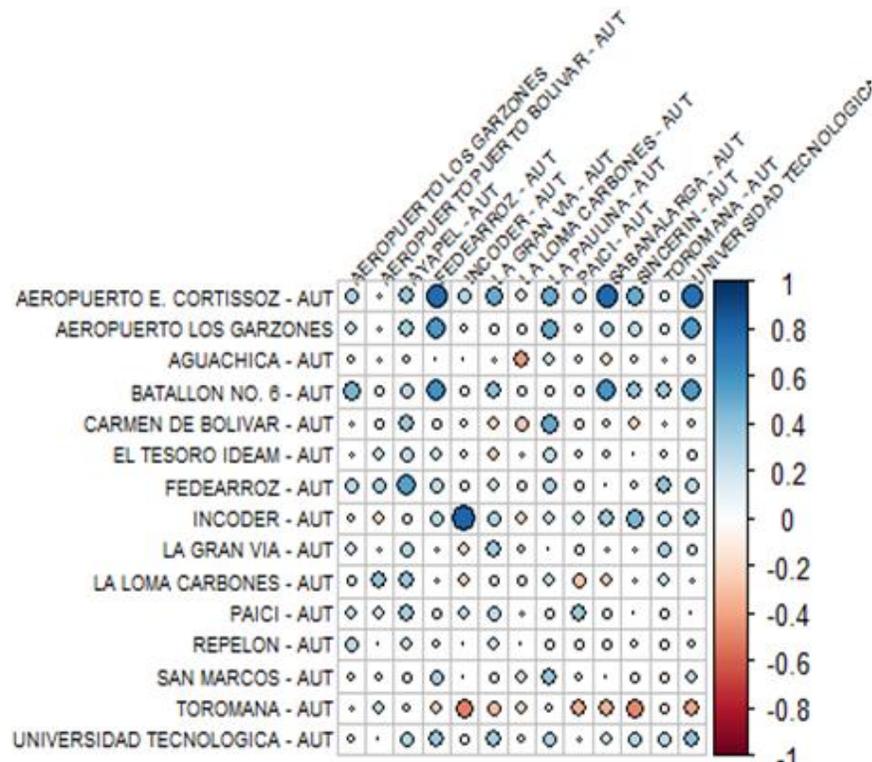
Fuente: elaboración propia.

La estacionalidad de los recursos en la Figura 28, tiende a sobreestimaciones o subestimaciones por la existencia de vacíos que presentan las series temporales de las observaciones en las EMAS, como es el caso de la estación La Loma Carbones en el período entre finales de 2016 y principios de 2017, donde también en su serie temporal podemos ver una estacionalidad en cuanto al final de cada año, la velocidad tiene un incremento experimentando dos picos entre año y año. Este comportamiento se ve afectado principalmente por dinámicas climáticas globales, como el desplazamiento de la ZCIT, ya que cuando la migración latitudinal afecta a los vientos del norte del país, aumenta su velocidad. Sin embargo, se puede observar que a lo largo del horizonte de estudio los recursos de la estación Toromana compensan los bajos niveles de velocidad del viento de la estación La Loma Carbones. Para realizar un análisis de calidad es necesario contar con series continuas y completas de observaciones, basadas en el buen funcionamiento de los sensores ubicados en el EMAS, las cuales deben realizarse mantenimientos periódicamente para evitar errores en la toma de mediciones.

### 5.2.3. Correlación mensual entre las series de velocidad del viento y la radiación solar global para los puntos de medición en la región Caribe

La matriz de coeficientes de correlación entre los recursos eólico y solar es presentada en la Figura 29. Los valores negativos de  $r$  indican relaciones inversas, en la matriz el eje X representa el valor mensual escalado del recurso solar o de los puntos de medición de este recurso y en el eje Y se ubican los puntos de medición de la variable velocidad del viento. Obteniéndose una matriz 15 x 13 que provee 195 pares de coeficientes de correlación de Pearson entre las variables velocidad del viento y radiación solar global para sus promedios mensuales. El coeficiente de correlación promedio tiene un valor de 0,1136, lo que indica un nivel promedio bajo de correlación entre estos recursos para la región del Caribe.

**Figura 29.** Matriz de coeficientes de correlación para los promedios mensuales de la velocidad del viento y la radiación solar global en todos los puntos de medición en la región Caribe.

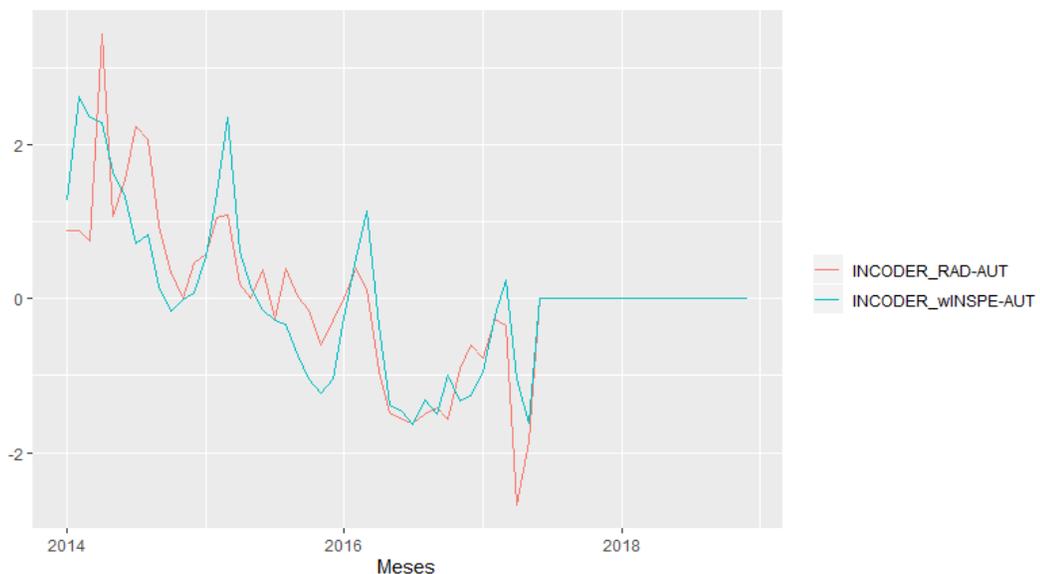


Fuente: elaboración propia.

Los diámetros de los círculos de la Figura 29, muestran el valor absoluto del coeficiente de correlación entre cada par evaluado, lo que indica una baja correlación, en el que destaca el punto de medición solar Aeropuerto E. Cortissoz que tiene una buena correlación con los puntos de viento Fedearroz, La Gran Vía, Sabanalarga y Universidad Tecnológica con valores dentro del rango  $0,3 < r < 0,7$ . En el caso contrario, la estación Toromana que mide la radiación solar global presenta comportamientos inversos  $-0,24 < r < -0,5$  con respecto a las estaciones de medición de viento como Incoder, Sincerin y Universidad Tecnológica.

De acuerdo con el análisis anterior, se identifican los pares de estaciones que se correlacionan positiva y negativamente entre sí lo que permite observar mejor su comportamiento, Figura 30 y Figura 31 respectivamente. El comportamiento correlacionado se obtiene en la misma estación, Incoder que mide las dos variables objeto de estudio, mientras que el par de estaciones con un comportamiento inverso ocurre entre Toromana midiendo la radiación solar global e Incoder midiendo la velocidad del viento.

**Figura 30.** Series de tiempo escaladas de los promedios mensuales de la velocidad del viento y la radiación solar global para las estaciones con comportamiento mejor correlacionado ( $0 < r < 1$ ).



Fuente: elaboración propia.

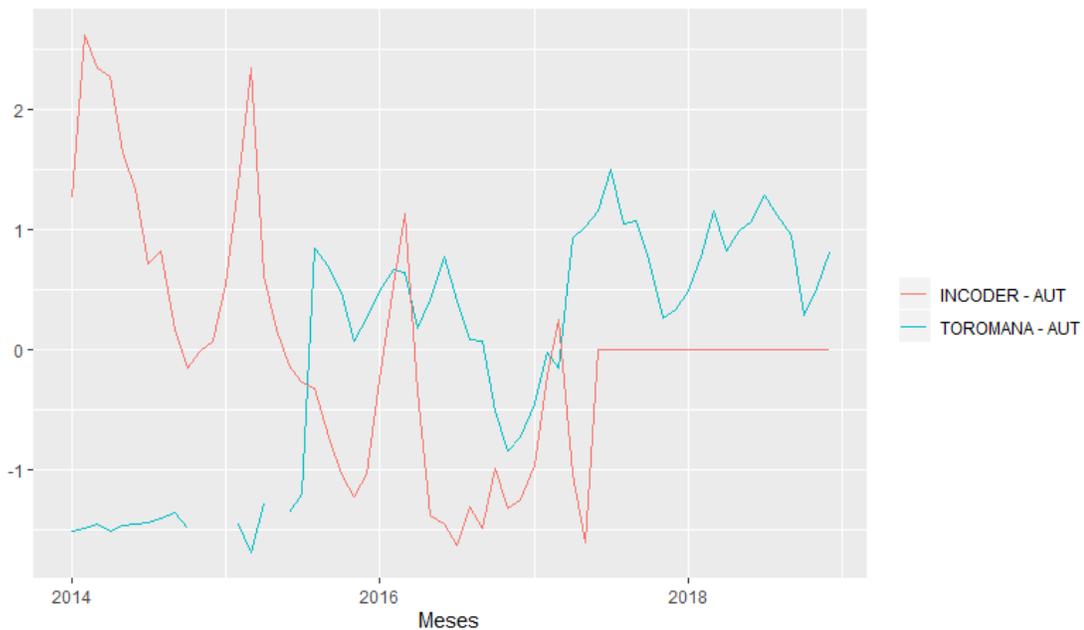
Se puede observar en la Figura 30 una variabilidad más notoria en la serie temporal de radiación solar normalizada respecto a la velocidad del viento, además de un comportamiento casi similar de los dos recursos con 4 picos durante el horizonte temporal analizado en ambas series que se observan al inicio de cada año, obedeciendo a una marcada estacionalidad que alcanza sus máximos al inicio de cada año y luego con tendencia a reducir los promedios durante el resto del año para los dos recursos energéticos.

Esta estacionalidad se debe a la oscilación de la ZCIT que se produce como resultado del ciclo anual de temperaturas superficiales por la insolación. Por esta razón, el pico al inicio de cada año observado en la Figura 30 resulta de la posición de la ZCIT, que durante la temporada diciembre - mayo, la ZCIT se desplaza hacia el norte del país, buscando su posición más austral durante el mes de Julio (verano del hemisferio norte). La posición de la ZCIT está asociada con la intensidad de los vientos alisios del este del hemisferio opuesto (Poveda, 2004).

Este comportamiento estacional, marcado por el ciclo anual del movimiento latitudinal de la ZCIT donde según los reportes del IDEAM para el comportamiento del estado del tiempo en el horizonte bajo estudio, durante el primer trimestre de los años bajo estudio la ZCIT se encontró fluctuando en las latitudes aproximadamente entre los 2°N y 8°N, con una posición promedio cercana a los 5°N, como además en dicho período se observaron condiciones secas favoreciendo a la insolación y sin la ocurrencia de lluvias. Para el segundo semestre de cada año, se presentaron aumentos en los niveles de precipitación para la región, donde la ZCIT estuvo oscilando en el sur de la región, sin embargo, se presentaron condiciones secas en la alta Guajira. En julio y el resto del tercer trimestre de cada año la ZCIT ayudo a ocasionar las lluvias sobre el suroccidente del Caribe, para el último semestre de cada año del horizonte del estudio, se resalta que en la segunda semana de octubre prevaleció el tiempo lluvioso, dado al tránsito de ondas tropicales interactuando con la ZCIT, mientras que en noviembre predominaron las condiciones entre parcial a mayormente nubladas mostrando bajos niveles de radiación solar finalizando cada período anual, a inicios del mes de diciembre se presentaron para el centro y sur de la región Caribe algunos volúmenes de precipitación alto, luego se mantuvieron condiciones secas (IDEAM, 2015a; IDEAM, 2016a, 2016b), (IDEAM, 2017a, 2018a).

En cuanto a la correlación que mantienen los recursos en este mismo punto de medida se obtuvo un coeficiente con un valor de 0,8, es decir que en la misma estación meteorológica la radiación solar global y la velocidad del viento guardan una alta correlación, muy similar en cuanto al comportamiento en un año y durante todo el análisis en estudio. Dado lo anterior, entre los meses de diciembre - abril aparecen estos picos de radiación solar y fuertes vientos, propicios para el aprovechamiento de estos recursos para la generación de energía eléctrica, aportando su producción al sistema eléctrico, representando en un respaldo cuando la temporada de sequía que afecta al recurso hídrico siendo ésta la principal fuente con mayor aporte en la generación del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

**Figura 31.** Series de tiempo escaladas de los promedios mensuales de la velocidad del viento y la radiación solar global para las estaciones con comportamiento más complementario ( $0 < r < 1$ ).



Fuente: elaboración propia.

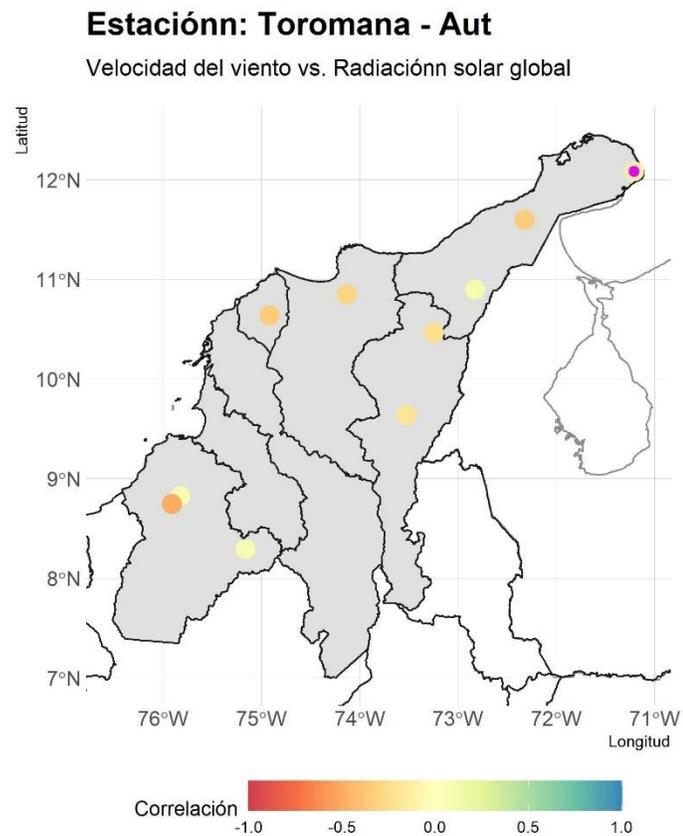
Respecto a los puntos de medida o EMAS que presentan un comportamiento complementario, se presenta entre las estaciones Incoder como punto de medida del viento y Toromana midiendo la radiación solar con un coeficiente de -0,50 que representa una correlación negativa media, pero comparando con el valor absoluto del coeficiente diario, tenemos un valor más alto observándose en la gráfica de la Figura 31.

De la Figura 31 se puede observar cómo las series temporales tienen una estacionalidad diferente, dado que estos dos puntos están geográficamente más dispersos ubicándose hacia el punto más hacia el norte de la región la estación Toromana sobre los 12°, mientras que la estación Incoder se ubica en el departamentos de Córdoba, una de las estaciones ubicadas en el extremo sur de la región sobre la latitud 8°, por lo que se infiere que el movimiento de la ZCIT no afecta a las dos estaciones en el mismo momento a diferencia de las estaciones que presentan un comportamiento correlacionado y también con respecto a las estaciones con mayor complementariedad en sus promedios diarios, las cuales se ubican en el mismo departamento de La Guajira. Con el desplazamiento estacional de la ZCIT se identifica según los reportes del tiempo para Colombia, que mientras la ZCIT se desplaza hacia la ubicación del extremo norte alcanza a oscilar entre las latitudes 9°-12°N (IDEAM, 2016a), mientras que cuando se desplaza hacia el extremo sur de la región, ésta fluctúa llegando hasta la latitud 2°N (IDEAM, 2016b), por lo que se evidencia que las fluctuaciones no afectan a las dos estaciones al tiempo. Además, la correlación inversa se aprecia más notoriamente en el período comprendido entre mediados de 2015 y mediados de 2017.

De igual manera que con los promedios diarios, se determinan la matriz de coeficientes de correlación de Pearson con los promedios mensuales, plasmando estos en el mapa geográfico de la Figura 32, en donde se aprecia como la estación Toromana complementa los valores de la estación Incoder, comportamiento que se presenta diferente con los promedios diarios, pues en este caso, las estaciones complementarias se ubican a una distancia mayor, pues la estación Toromana midiendo la irradiancia solar global ubicada en el extremo norte del departamento de La Guajira, suple o complementa los valores de la velocidad del viento medidos en la estación Incoder emplazada en el departamento de Córdoba. Aunque si bien para la estación Paici, ubicada en el mismo departamento que Toromana, también presenta una correlación negativa media con

valor de -0,35, para la estación Incoder su valor absoluto es mayor, con valor de -0,50 exhibiendo una correlación fuerte.

**Figura 32.** Mapa geográfico con la distribución de los coeficientes de correlación para los promedios mensuales entre la velocidad del viento y la radiación solar global.



Fuente: elaboración propia.

Cabe señalar en los análisis de correlación diario y mensual que la estación Toromana presenta comportamientos inversos con respecto a otras estaciones, con Paici en el caso de la correlación inversa con los promedios diarios y con la estación Incoder para los promedios mensuales. Es decir que este punto geográfico puede ofrecer una complementariedad o puede

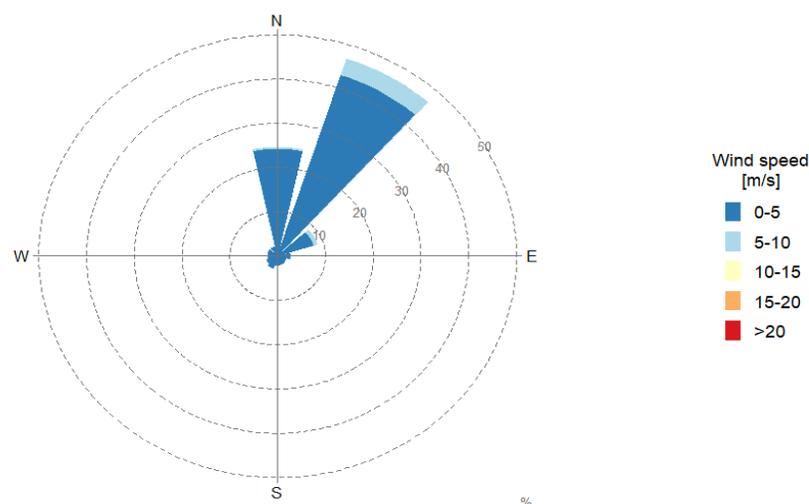
suplir los bajos niveles de velocidad del viento medidos en otros puntos ubicados en la región Caribe de Colombia, es decir, brinda respaldo a otras posibles plantas de generación, cuando estas no cuentan con una alta disponibilidad del recurso.

### 5.3. Energía eólica estimada

Como se mencionó en la sección 4.6, para la estimación de la energía eólica que puede ser obtenida con base en los perfiles de viento presentes en las áreas seleccionadas para el estudio, se filtraron las EMAS las cuales presentan comportamientos con mejores correlaciones y mejores complementariedades entre ellas, tanto para los resultados diarios como mensuales.

Para el par de EMAS que exhiben una correlación positiva media para sus promedios diarios, tenemos a la estación La Paulina midiendo la velocidad del viento, donde se obtiene la frecuencia de ocurrencia de la velocidad del viento promedio por sector de dirección. Las turbinas eólicas deben estar lo más perpendicular a la dirección del viento más frecuente, esto con el objetivo de posicionarlas optimizando la incidencia del viento sobre sus aspas.

**Figura 33.** Rosa de vientos con resultados de porcentaje de incidencia de la velocidad del viento por sector direccional de la EMA La Paulina.

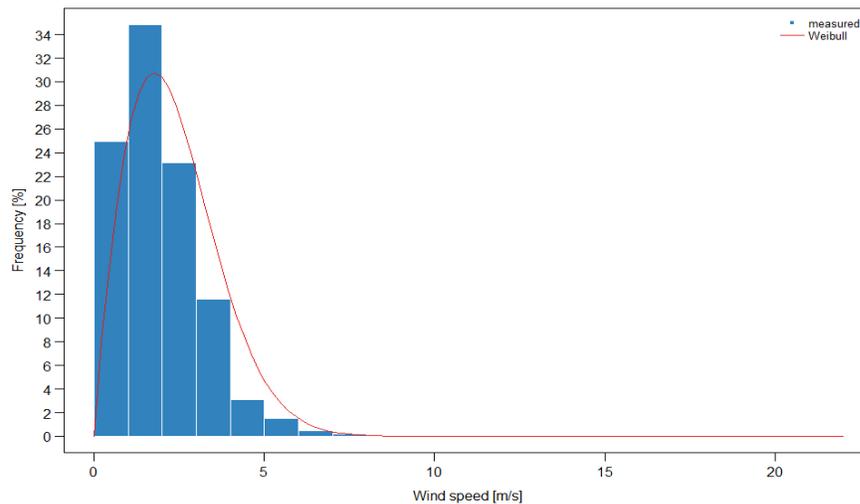


Fuente: elaboración propia.

En la anterior gráfica se observa como en el sector Nor-este se presentan velocidades de viento de entre 0 y 10 m/s con un porcentaje de incidencia de entre 40 % y 50 %. Hacia el sector norte, se aprecia también un porcentaje de ocurrencia superior al 20 % para velocidades del viento en el rango de 0-5 m/s.

Para evaluar la producción potencial de energía en un determinado lugar, los datos observados o medidos de un determinado período se generaliza por medio de una distribución de la velocidad del viento, siendo la distribución de probabilidad de Weibull la que presenta un mejor ajuste al comportamiento de esta variable. Luego de conocer la ocurrencia del viento por sectores, procedemos a determinar los parámetros de forma ( $k$ ) y de escala ( $A$ ) de la distribución Weibull.

**Figura 34.** Distribución de probabilidad Weibull para la velocidad del viento para la EMA La Paulina.

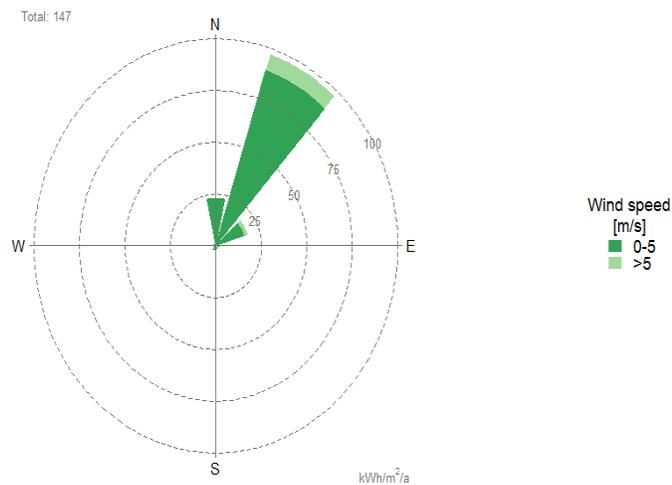


Fuente: elaboración propia.

Habiendo obtenido la distribución de probabilidad que más se ajusta a los datos de la velocidad del viento, procedemos a calcular la energía eólica total contenida por sector de dirección para los datos Weibull. La energía eólica total puede ser percibida como el potencial de energía teórica

de un sitio particular. De esta manera, es una ventaja para una evaluación del recurso, independiente de la turbina eólica.

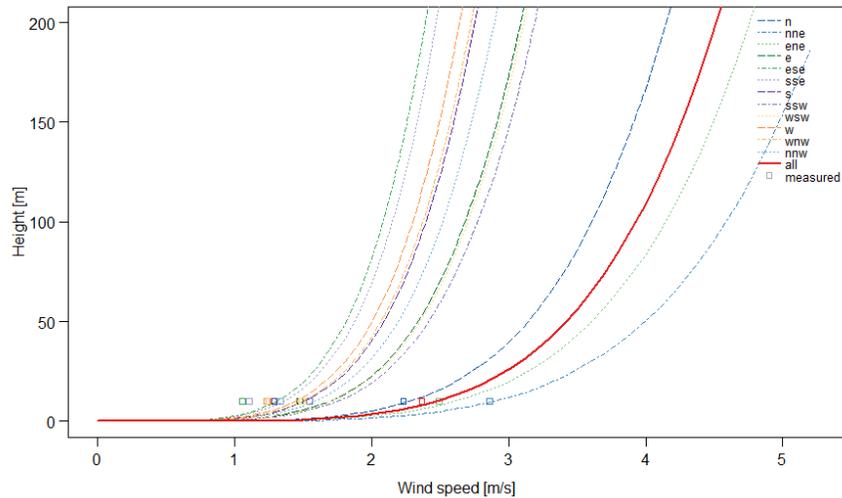
**Figura 35.** Rosa de vientos con resultados de energía eólica teórica generada para el sitio de la EMA La Paulina.



Fuente: elaboración propia.

Para los sectores de ocurrencia y para velocidades entre 0-5 m/s y superiores que se presentan en la anterior gráfica con el contenido total de energía eólica que puede ser percibido como el potencial teórico de energía para un determinado lugar, obtenemos en total 147 kWh/m<sup>2</sup>/año para perfiles de viento medidos a 10 m de altura. Sin embargo, dado que las mediciones se realizan a diferente altura de las turbinas eólicas, se debe calcular el perfil de viento por medio de la Ley Exponencial de Hellman, donde la velocidad del viento promedio como una función de la altura sobre el suelo proporciona el perfil de viento de un sitio. Las mediciones a bajas alturas en sitio, obedecen a una necesidad de optimización de costos, pues la altura de los mástiles meteorológicos usualmente es inferior a las alturas de los ejes de las turbinas de viento. De esta forma, obtenemos los perfiles de viento para diferentes alturas para cada sector de dirección del viento.

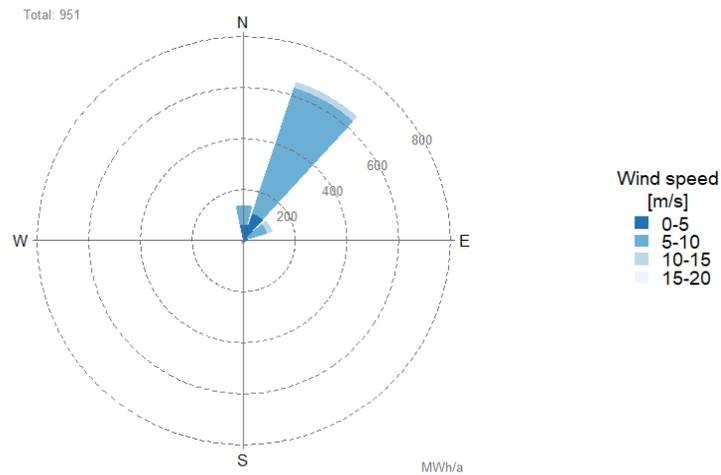
**Figura 36.** Gráfica con valores de extrapolación de Ley exponencial de Hellman para velocidades del viento a diferentes alturas y sectores direccionales de la EMA La Paulina.



Fuente: elaboración propia.

Para poder obtener un resultado de la energía generada más cercano a la realidad, se utiliza la curva de potencia característica de una turbina eólica. Una curva de potencia caracteriza la producción de energía de una turbina eólica y da la cantidad de energía eléctrica generada como función de la velocidad del viento. Para el presente estudio se implementó una turbina de la marca Vestas de 80 metros de altura y con una capacidad de generar 2 MW.

**Figura 37.** Rosa de vientos con resultados de energía eólica teórica generada para el sitio de La Paulina para una turbina de viento Vestas de capacidad nominal de 2 MW.



Fuente: elaboración propia.

De esta manera, se obtiene la producción estimada de energía eólica para una turbina marca Vestas de 80 m de altura y una potencia nominal de 2 MW, con valores anuales de 951 MWh/año, con una incidencia de velocidades entre 0 y 10 m/s principalmente en el sector Nor-este.

Mediante el mismo procedimiento exhibido, se calculan las producciones de energía eólica para las demás EMAS, donde a continuación se muestran los resultados:

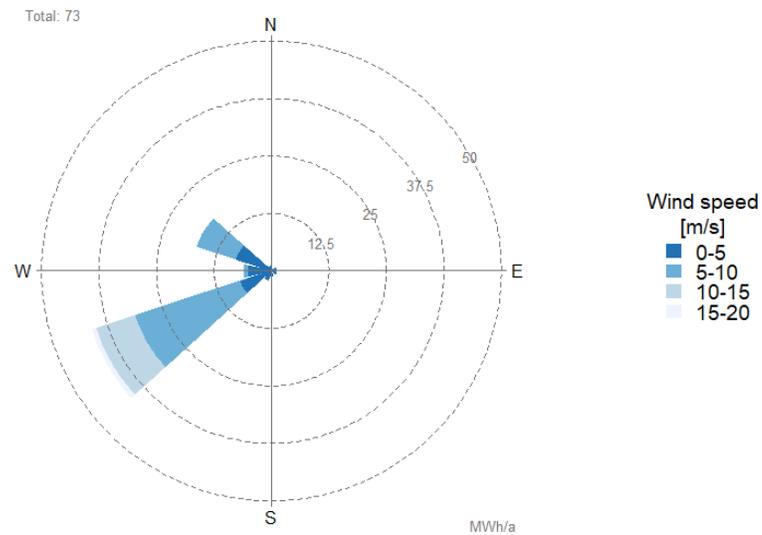
**Figura 38.** Rosa de vientos con resultados de energía eólica teórica generada para el sitio de Paici para una turbina de viento Vestas de capacidad nominal de 2 MW.



Fuente: elaboración propia.

De igual forma que para la estación La Paulina, se realiza la estimación de la energía eólica para la misma turbina, en el sitio donde se emplaza la EMA Paici, se puede apreciar en la anterior gráfica, como los círculos exhiben los valores de la energía y la escala de colores muestra el rango de velocidad del viento por sector de dirección. Para la dirección Este, con velocidades entre 0-5 m/s se aproxima a valores de energía cercanos a 1 MWh/año, mientras que para velocidades entre 10-15 m/s supera este valor. Así mismo para la dirección Sur-Este, presenta mejores valores de generación de energía dado a valores de velocidades mayores, estando en el rango de 15-20 m/s. En total para este sitio al año para un aerogenerador Vestas se puede alcanzar a producir 5356 MWh/año.

**Figura 39.** Rosa de vientos con resultados de energía eólica teórica generada para el sitio de Incoder para una turbina de viento Vestas de capacidad nominal de 2 MW.



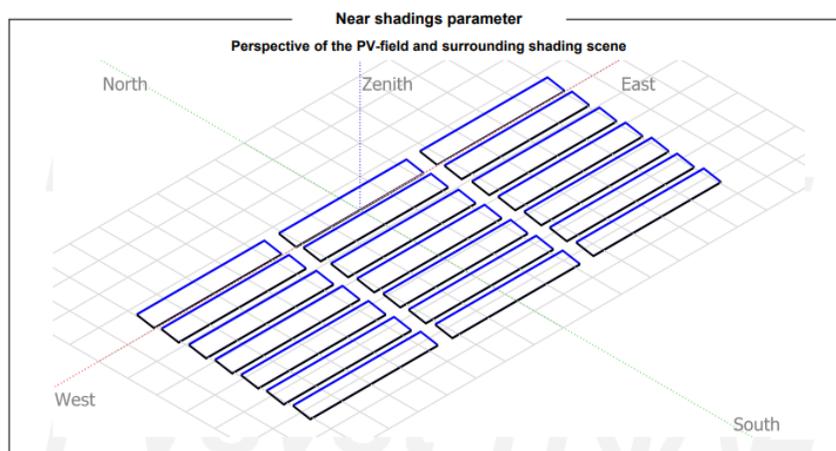
Fuente: elaboración propia.

Para el lugar de emplazamiento Incoder, la misma turbina con los perfiles de viento presentes, alcanzaría a una producción de 73 MWh/año, donde de los tres puntos escogidos para estimar la producción de energía solar, presenta los valores más bajos.

## 5.4. Energía solar estimada

Con base en el procedimiento indicado en la sección 4.6.2 se calcula la energía solar para un sistema de generación solar fotovoltaica para cada una de las ubicaciones de las EMAS, donde de emplazan los módulos con una inclinación de  $10^\circ$  hacia el sur.

**Figura 40.** Emplazamiento del sistema solar FV 285 kWp modelado para el estudio.

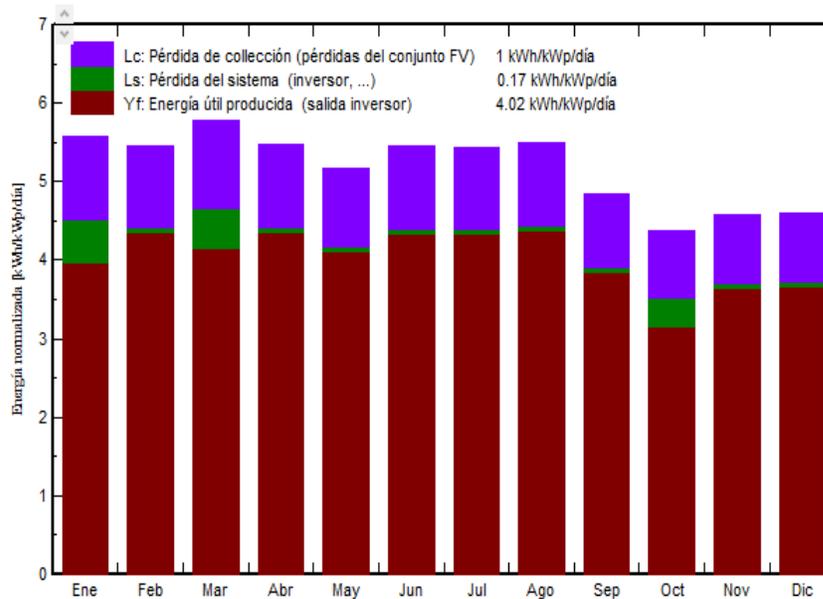


Fuente: elaboración propia.

El sistema modelado con el conjunto de equipos, la ubicación determinada y los datos meteorológicos, se obtiene la producción del sistema para cada mes del año con base en la potencia pico, es decir, la energía en corriente continua (CC) generada por los 630 módulos solares. Así mismo, se puede conocer la energía CC anual producida por el arreglo FV y la energía de corriente alterna (AC) anual inyectada por el sistema a la red.

Para la estación de Carmen de Bolívar, con los valores de radiación solar global y el sistema modelado, se obtuvo una energía CC anual producida y la energía AC inyectada a la red de 433,34 MWh y 416,20 MWh respectivamente.

Figura 41. Producciones normalizadas (por kWp instalado) para la EMA Carmen de Bolívar.

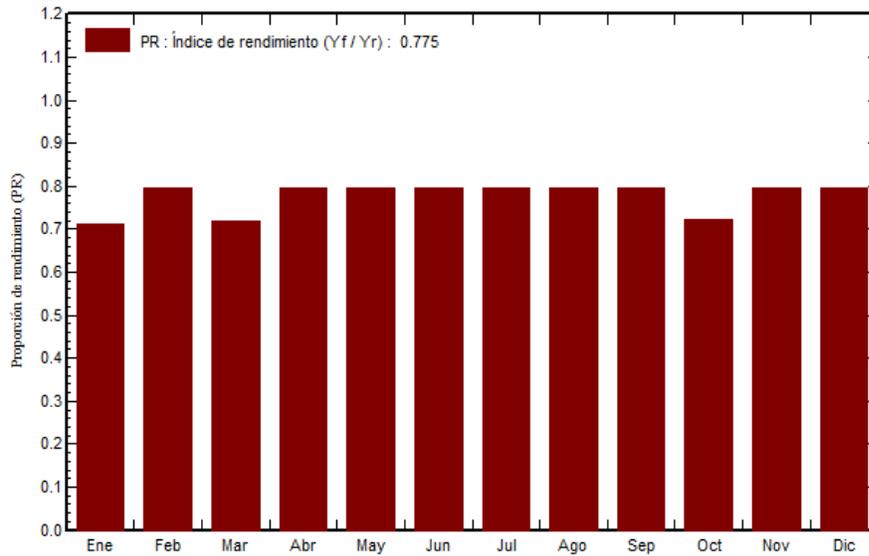


Fuente: elaboración propia.

En la Figura 41, podemos observar la energía útil producida, o la energía por kWp/día instalado producida por el conjunto FV luego del conjunto de pérdidas, mostrando variaciones a lo largo del año motivadas por el comportamiento variable de la radiación solar. En la misma figura, se exhibe Lc que representa la pérdida de colección o las pérdidas por captura de la radiación 1kWh/kWp/día, Ls son las pérdidas del sistema asociadas a pérdidas de energía por los componentes 0.17 kWh/kWp/día y Yf es la energía útil producida 4.02 kWh/kWp/día.

Adicionalmente, se calculó el índice de rendimiento del sistema para las condiciones de radicación del lugar y del sistema FV proyectado, índice que representa el rango de la energía efectiva producida con respecto a la energía que podría producirse si el sistema trabajara continuamente con la eficiencia de las condiciones nominales, que para la EMA Carmen de Bolívar fue de 77,52 %.

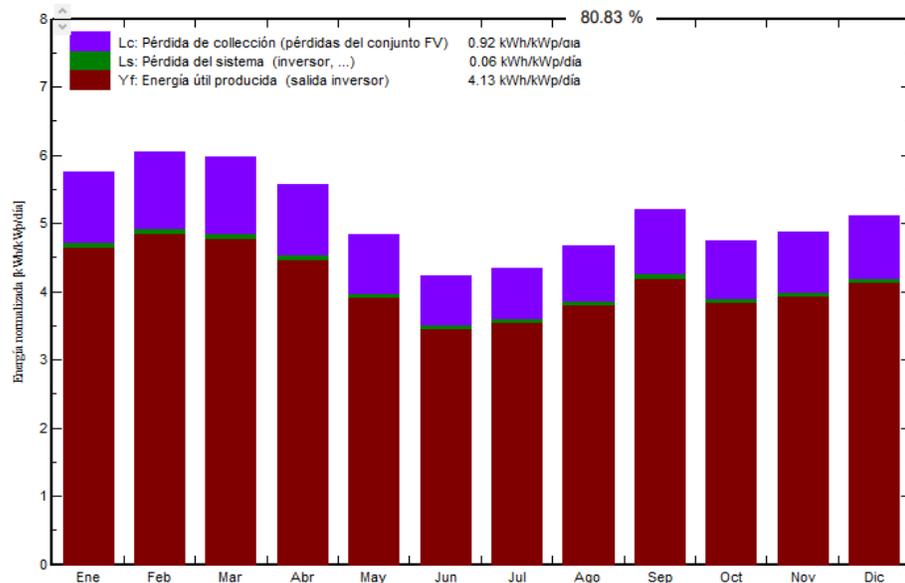
Figura 42. Proporción o índice de rendimiento para la EMA Carmen de Bolívar.



Fuente: elaboración propia.

De mismo modo, se calculó la energía solar fotovoltaica estimada con el mismo arreglo FV modelado, pero para las condiciones de radiación presentes en la ciudad de Montería donde se ubica la estación Incoder.

Figura 43. Producciones normalizadas (por kWp instalado) para la EMA Incoder.

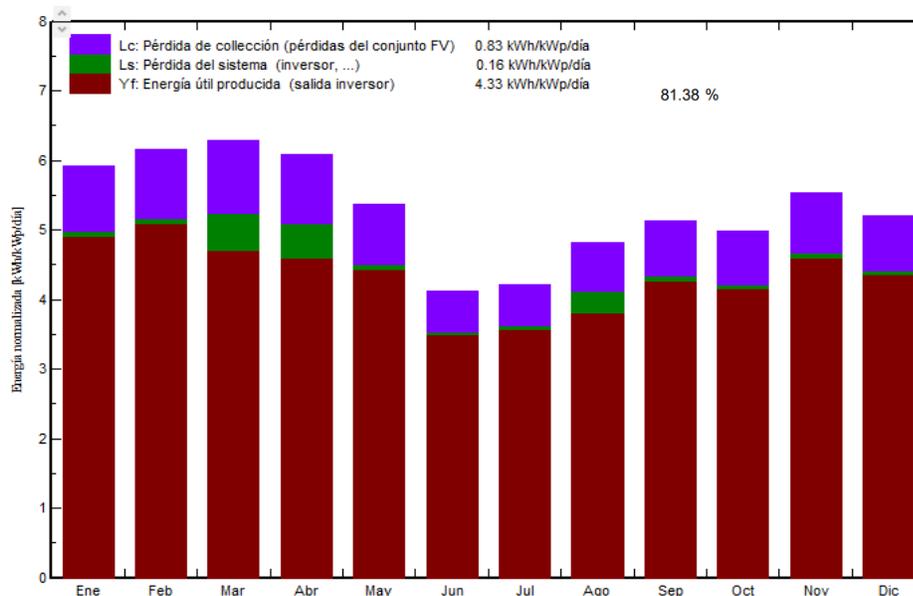


Fuente: elaboración propia.

Para la EMA Incoder con el arreglo FV produce en CC 433,74 MWh y en AC 427,28 MWh, con un índice de rendimiento del 80,83 % y una energía útil producida Yf de 4,13 kWh/kWp/día.

Para la EMA Toromana, presenta una energía útil producida de 4,33 kWh/kWp/día con un índice de rendimiento de 81,38 %, siendo el más alto de los tres puntos elegidos para la estimación de la energía solar producida, traduciendo en mayor cantidad de energía útil generada.

**Figura 44.** Producciones normalizadas (por kWp instalado) para la EMA Toromana.



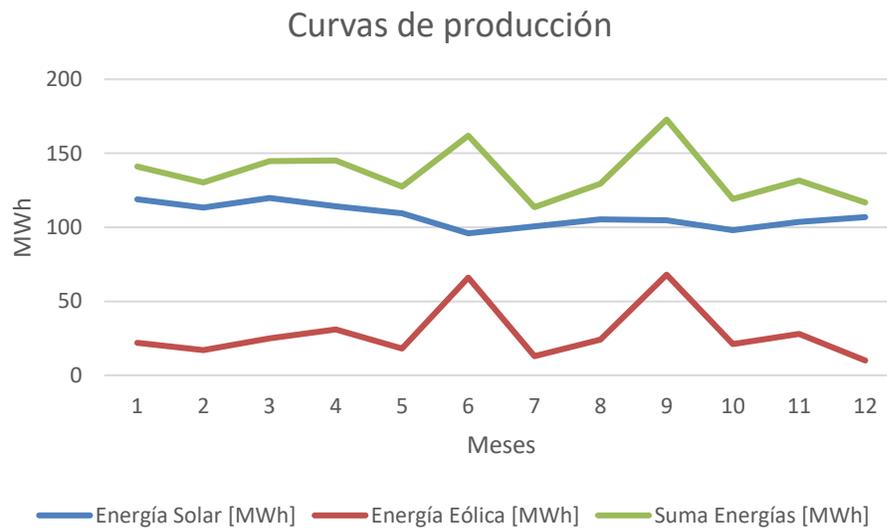
Fuente: elaboración propia.

Según los resultados de los coeficientes de correlación para los dos recursos evaluados en conjunto, que exhiben un comportamiento mayormente complementario, es decir, con valores de coeficientes de correlación negativos, como además con los resultados de las producciones energéticas, éstos sugieren que no se presenta un suavizado en la curva agregada de las producciones eólica y solar en conjunto, indicando que no necesariamente al presentarse un comportamiento complementario las producciones puedan suavizarse.

En la Figura 45 la gráfica muestra la suma de la generación solar para todos los puntos bajo estudio (línea azul), la suma de generación eólica para todas las EMAS midiendo el recurso eólico

(línea roja) y la suma de la producción en conjunto de los dos recursos (línea verde), observando que no se presenta un suavizado en la curva agregada de producciones para los puntos seleccionados en el cálculo de la producción energética.

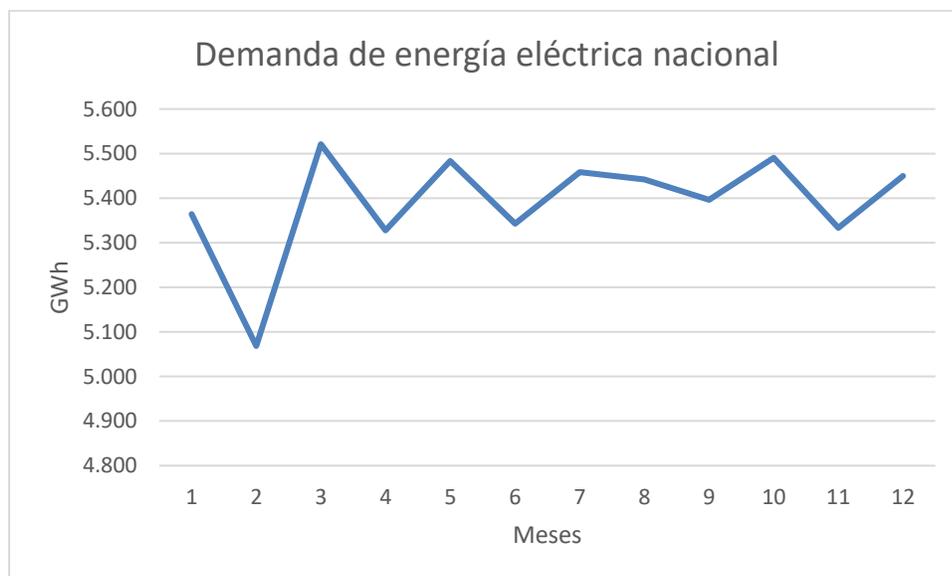
**Figura 45.** Combinación de curvas de producción para la energía eólica y solar



Con base en los valores de demanda reportados por la UPME en el año 2015, se exhibe la gráfica en la Figura 46, con una demanda promedio para dicho año de 5.390 GWh. Dado que las producciones eólica y solar están en el orden de los MWh, una misma gráfica no nos daría respuesta a la pregunta de investigación, sin embargo, con base en la curva de producción de la Figura 45 respecto la curva del comportamiento combinado de las producciones calculadas en el estudio y el comportamiento de la demanda de energía eléctrica para Colombia de la Figura 46, se puede observar como para los meses en que la demanda presenta picos de consumos (marzo, mayo y octubre), las producción renovable no convencional presenta bajos niveles de generación, de esta forma, podría decirse que la curva de la demanda y las producciones conjuntas presentan una comportamiento complementario.

De acuerdo con lo anterior, si bien puede que ambas curvas puedan presentar comportamiento complementario, las producciones de energía renovable no satisfacen los aumentos en la demanda de energía eléctrica. Por otra parte, en los valles de la demanda de energía eléctrica, desde el punto de vista de despachos de energía, las centrales hidráulicas con embalses podrían reducir su participación en el despacho nacional y así almacenar el agua en sus embalses para darle paso a las producciones de energías eólicas y solares. Adicionalmente, cuando se presenten los picos en la demanda de energía, las centrales hidráulicas pueden suplir estos aumentos, siendo de esta forma una solución para reducir la probabilidad de participación de centrales térmicas.

**Figura 46.** Curva de demanda nacional de energía eléctrica para el año 2015.



Fuente: UPME (UPME, 2015)

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

Este estudio examina las correlaciones y posibles comportamientos complementarios o anti correlacionados entre las disponibilidades de los recursos eólico y solar en la región Caribe continental de Colombia, en escalas diarias y mensuales. Los resultados indican que cuando se realiza el análisis de los recursos de forma individual en la escala diaria lleva a determinar que cuanto menor es la distancia entre los puntos de medición, mayor es la correlación entre ellos, mientras que los puntos ubicados a mayor distancia entre sí presentan comportamientos complementarios o inversos. Caso contrario, cuando se analizan los recursos en conjunto, los puntos tienen un comportamiento mayormente inverso o con una correlación negativa midiendo la radiación y el viento que se encuentran a menor distancia. En el caso de que las EMAS estén a mayor distancia, mantienen una mayor correlación. En cuanto al mismo análisis para la escala mensual, no ocurre de la misma manera, ya que la distancia no está relacionada con los comportamientos entre las EMAS, se observa que tanto los dos puntos que mejor se correlacionan como los puntos más complementarios de unos a otros, están geográficamente distantes.

Al calcular los coeficientes de correlación diarios y mensuales para cada recurso por separado, se obtuvo menor cantidad de pares correlacionados negativamente, resultado diferente cuando se calcularon los coeficientes con los recursos conjuntamente. A partir de la representación gráfica de las matrices de coeficientes de correlación de los recursos por separado y en conjunto, se

puede determinar el mayor número de pares negativos lo que indica que se complementan mejor los recursos; al analizar los resultados se observa que los recursos en conjunto son los que presentan dicho comportamiento. No obstante, se percibió en los análisis que, si bien existe un grado de complementariedad, ésta no puede asumirse constante, en cambio, su fuerza o magnitud varían en el transcurso del año y por los efectos climatológicos como el ENSO en su fase cálida.

Observando los resultados para cada escala temporal, se ha evidenciado que cuando se analizan las variables en conjunto se presentan coeficientes negativos, incrementando su valor absoluto o fuerza cuando se desplazan los valores diarios a mensuales y su respectivo cálculo, resultado que coincide con el aprovechamiento encontrado en un estudio realizado en instalaciones eólicas y solares en Suecia por (Widen, 2011).

Los coeficientes de correlación diarios y mensuales evaluados para cada recurso de manera individual presentan correlaciones positivas para toda la región del Caribe. Dado que la complementariedad entre los dos recursos es mayor, se debe considerar un uso conjunto de los recursos eólico y solar, seleccionando puntos geográficamente dispersos para el emplazamiento y construcción de posibles plantas de generación de energía eléctrica, manejando la variabilidad típica que presentan los recursos renovables intermitentes y también suavizar la producción de energía eléctrica. Así, además del aprovechamiento de fuentes inagotables para la producción energética, se puede optimizar el uso de las fuentes identificando zonas claves en las cuales se obtengan comportamientos inversos entre las fuentes.

La migración latitudinal de la ZCIT en el territorio colombiano y más específicamente en la región del Caribe, afecta directamente el comportamiento de los recursos en estudio, exhibiendo patrones estacionales en las disponibilidades de los recursos dados los puntos que se encuentran bajo el área de influencia de la ZCIT, estos aumentan tanto las magnitudes y la disponibilidad de recursos que pueden complementar los puntos con niveles bajos y que no están bajo la presencia de la ZCIT. Es por ello que el análisis de la dinámica climática global y local en escalas interanuales en el caso del ENOS y escalas anuales como el desplazamiento de la ZCIT es un factor clave para

comprender el comportamiento de las variables estocásticas que son la principal fuente para usos energéticos de una manera más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Los resultados del estudio pueden servir de insumo para los planeadores del sistema eléctrico nacional y en general al desarrollo e implementación de las FNCER, ya que indican posibles puntos donde puedan ubicarse y desarrollarse proyectos de plantas de energía eólica y solar no solo aprovechando las altas disponibilidades, si no también optimizando su ubicación en los puntos estratégicos donde se presentan altas correlaciones inversas, convirtiendo además a las fuentes renovables más atractivas para su implementación. Adicionalmente, los planeadores pueden basarse en este estudio con el fin de contemplar dentro de los análisis de futuros planes de expansión, una base de las proyecciones para la construcción estratégica de proyectos como líneas de transmisión y subestación que permitan la inyección de este tipo de energía al sistema eléctrico de manera de llevar la energía a los centros de consumo.

## 6.2. Recomendaciones y futuros trabajos

Dentro del análisis del recurso eólico y su correlación con el recurso solar, solo se tomaron en cuenta las mediciones realizadas por el EMAS del recurso eólico terrestre, ubicado en el Caribe continental, sin embargo, observando los mapas Atlas de velocidad del viento y otros estudios, donde destacan las altas velocidades de las masas de aire sobre el mar, por lo que conviene prestar atención a futuros estudios donde se tenga en cuenta el recurso eólico *offshore*, así como la ubicación de puntos de medición in-situ de los vientos presente en el Mar Caribe.

Se debe resaltar que a las series de tiempo de la velocidad del viento medidas por las EMAS para el estudio no se les aplicó ningún proceso de validación, se tomaron los datos en bruto para el cálculo de los promedios diarios y mensuales, como el posterior estudio del potencial eólico y cálculo de los coeficientes de correlación, considerando que estos datos o resultados pueden presentar información errónea o pueden afectar la precisión del estudio.

Las mediciones realizadas por EMAS deben estar sujetas a un control de calidad, donde se debe asegurar que los datos cumplen las condiciones necesarias (en términos de margen de incertidumbre, resolución, continuidad, homogeneidad, representatividad, puntualidad, formato, etc.) para la aplicación deseada con un costo mínimo viable. Para ello, primero se hace un seguimiento del funcionamiento y mantenimiento más continuo de las EMAS para evitar averías en los sensores y dispositivos de medida, ya que es preferible prevenir errores que corregirlos y por supuesto, es una opción mucho más económica. Seguido de la aplicación de un proceso de validación a la serie de datos en su colección con el fin de verificar la validez de los datos como la cantidad requerida, utilizarlos en un proceso de ajuste para lograr la calidad deseada, o rechazar los datos.

Para futuros estudios, se considera conveniente ampliar la ventana de análisis, donde según la norma y anomalía climática recomiendan realizar los análisis con mínimo un horizonte temporal de 30 años, para en dicho horizonte evidenciarse y analizarse las variables climáticas, sus

disponibilidades y comportamientos junto con la presencia de eventos climáticos de escalas globales como el ENSO y la Oscilación Decadal del Pacífico.

Si bien el objetivo principal del trabajo es identificar y comprender las posibles relaciones que guardan los recursos eólico y solar para el área de la región Caribe continental colombiana, teniendo presente que los recursos medidos por las EMAS pueden ser promediados a diferentes escalas temporales, para los promedios horarios históricos, estas series de datos pueden servir como insumo para la obtención de los pronósticos de las fuentes. Dado que ambas son carácter variable y estocástico, resulta complejo conocer los compromisos de generación de energía en las plantas de generación solar y eólica. Es por esto, que obteniendo las series horarias de los recursos se plantea como trabajo futuro, basados en las mediciones *in-situ* realizar los pronósticos aplicando diferentes metodologías encontradas en la literatura. Desde el enfoque estadístico para los pronósticos a corto plazo, pueden ser utilizados los métodos autorregresivos como el autorregresivo de promedio móvil (ARMA), autorregresiva integrado de promedio móvil (ARIMA) y red neuronal artificial (ANN), sirviendo estos para estimar la generación de una planta en su operación intra-diaria y así conocer sus posibles despachos de energía. Para los análisis a largo plazo, generalmente se utilizan las técnicas de computación blanda como máquina de vectores de soporte (SVM) (Hoyos Gómez, 2021).

El análisis de complementariedad de los recursos renovables sirve de manera indicativa en la relación de los recursos renovables con la demanda de energía eléctrica, así mismo, sirve de base para la gestión eficiente de la demanda, activando los mecanismos como demanda desconectable voluntaria formulados por la CREG. De igual manera, con una participación mayor de plantas de generación renovable no convencional en el parque generador, se reduciría la probabilidad de la participación de energía de las plantas térmicas.

Como insumo para los planeadores y operadores del SIN, puede resultar interesante obtener un estudio de correlación entre las variables meteorológicas estudiadas, o incluso con las producciones eólicas y solares, respecto a la demanda de energía eléctrica de Colombia, de esta manera, por medio de análisis multivariable, se podría determinar la relación entre el

comportamiento de las producciones renovables y como estas podrías satisfacer los picos de la demanda de energía eléctrica. Dentro de la literatura, se encontró un estudio a nivel regional, en donde los autores (Schmidt, Cancelli, & Pereira, 2016) desarrollaron para Brasil, un modelo de optimización que tiene en cuenta la administración de los reservorios hídricos, el despacho térmico y las series temporales de la producción de energía renovable, obteniendo de esta manera diferentes escenarios, siendo el más óptimo aquel que reduce la participación de plantas térmicas y aumenta la inclusión de energía renovables.

Otro análisis futuro, consistiría en evaluar la relación entre las variables de velocidad del viento, la radiación solar global y los caudales afluentes de las centras hidráulicas, o también respecto a los niveles de precipitación. Partiendo del coeficiente de correlación simple, basado en la aproximación a la distribución *normal bivalente*, cuando se tienen más de dos variables, el modelo básico para la correlación múltiple, sería una extensión de esta distribución, denominada *distribución normal multivalente*.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- A. Weiss, & J.G. Robb. (1986). Results and Interpretations from a Survey on Agriculturally Related Weather Information. *Journal Series, Nebraska Agricultural Research Division*, 67(1), 6.
- Aguilera Díaz, M., Reina Aranza, Y., Orozco Gallo, A., Yabrudy Vega, J., & Barcos Robles, R. (2013). *Ensayos Sobre Economía Regional*. Banco de la República de Colombia.
- Aguilera Díaz, M., Reina Aranza, Y., Orozco Gallo, A., Yabrudy Vega, J., & Barcos Robles, R. (2017). Evolución socioeconómica de la región Caribe colombiana entre 1997 y 2017. (Banco de la República de Colombia, ed.) (p. 79). Banco de la República de Colombia.
- Andrade, C. A., & Barton, E. D. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 105(C11), 26191–26201. <https://doi.org/10.1029/2000JC000300>
- Armando Galvis, L. (2009). Documentos de trabajo sobre Economía Regional - Geografía económica del Caribe Continental (No. 119) (p. 87). Banco de la República.
- Azad, A. K., Rasul, M. G., Alam, M. M., Uddin, S. M. A., & Mondal, S. K. (2014). Analysis of wind energy conversion system using weibull distribution. *Procedia Engineering*, 90, 725–732. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.803>
- Ballenilla García de Gamarra, F. (2005). La sostenibilidad desde la perspectiva del agotamiento de los combustibles fósiles, un problema socio-ambiental relevante. *Revista Investigación en la Escuela*, 55, 73–87.
- Beluco, A., de Souza, P. K., & Krenzinger, A. (2008). A dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies. *Renewable energy*, 33(10), 2157–2165. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.019>
- Bett, P. E., & Thornton, H. E. (2016). The climatological relationships between wind and solar energy supply in Britain. *Renewable energy*, 87, 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.006>
- Bohórquez Guevara, K. S. (2019, May 14). Reservas de gas en Colombia alcanzan para 9,8 años, mientras las de petróleo para 6,2 años. Retrieved June 22, 2019, from

<https://www.larepublica.co/economia/las-reservas-de-gas-en-colombia-solo-alcanzan-para-98-anos-2861577>

- Boy, H., & Calderón, E. C. (1955). Una historia con alas. Ediciones Guadarrama.
- Cappucci, M. (2020, November 17). Hurricanes Eta and Iota brought disaster to Central America. Officials can't retire their names. The Washington Post.
- Castillo, Y., Castrillón Gutiérrez, M., Vanegas-Chamorro, M., Valencia, G., & Villicaña, E. (2015). Rol de las Fuentes No Convencionales de Energía en el sector eléctrico colombiano. *Prospectiva*, 13(1), 39. <https://doi.org/10.15665/rp.v13i1.358>
- CELSIA. (2018, November 26). Inicia operaciones Celsia Solar Bolívar, la nueva granja de generación de energía solar de Celsia para beneficio de los colombianos' ' Retrieved February 17, 2021, from [https://www.celsia.com/es/sala\\_de\\_prensa/inicia-operaciones-celsia-solar-bolivar-la-nueva-granja-de-generacion-de-energia-solar-de-celsia-para-beneficio-de-los-colombianos/](https://www.celsia.com/es/sala_de_prensa/inicia-operaciones-celsia-solar-bolivar-la-nueva-granja-de-generacion-de-energia-solar-de-celsia-para-beneficio-de-los-colombianos/)
- Chaer, R., Gurin, M., Cornalino, E., Draper, M., Terra, R., Abal, G., & Alonso, R. (2014). Complementariedad de las Energías Renovables en Uruguay y valorización de proyectos para el filtrado de su variabilidad - REPORTE FINAL (p. 108). Fundación Julio Ricaldoni.
- Colston, J. M., Ahmed, T., Mahopo, C., Kang, G., Kosek, M., de Sousa Junior, F., ... MAL-ED Network. (2018). Evaluating meteorological data from weather stations, and from satellites and global models for a multi-site epidemiological study. *Environmental Research*, 165, 91–109. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.027>
- CorpoEma. (2010). FORMULACIÓN DE UN PLAN DE DESARROLLO PARA LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN COLOMBIA (PDFNCE). VOLUMEN 3 - ELEMENTOS DE POLÍTICA, RIESGOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO, COMPLEMENTARIEDAD ENTRE LAS FNCE Y EL SIN, Y COSTOS INDICATIVOS DE LAS FNCE. (p. 195). UPME.
- Corporación PBA, Desarrollo con Cohesión Territorial, & Programa Cohesión Territorial para el Desarrollo. (2014). Informe Técnico: Lineamientos y estrategias de desarrollo rural territorial para la región Caribe colombiana. Serie Documentos de Trabajo N° 142. Rimisp, Santiago, Chile. Corporación PBA.
- Corte, D., Sierra, F., & Valencia, G. (2015). Validación del modelo matemático “Función de densidad de probabilidad (pdf) de Weibull”, evaluando el recurso eólico en la zona del Caribe colombiano: caso estudio. *Prospectiva*, 13(2), 38. <https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.485>
- COWI. (2014). IMPACT ANALYSIS FOR INTEGRATION OF WIND POWER GENERATION IN COLOMBIA (PROJECT REPORT) (p. 75). UPME.

- de Oliveira Costa Souza Rosa, C., Costa, K., da Silva Christo, E., & Braga Bertahone, P. (2017). Complementarity of hydro, photovoltaic, and wind power in rio de janeiro state. *Sustainability*, 9(7), 1130. <https://doi.org/10.3390/su9071130>
- de Oliveira Costa Souza Rosa, C., da Silva Christo, E., Costa, K. A., & Santos, L. dos. (2020). Assessing complementarity and optimising the combination of intermittent renewable energy sources using ground measurements. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120946. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120946>
- Departamento de Física y Geociencias, Universidad del Norte, Pérez R., A., Ortiz R., J. C., Departamento de Física y Geociencias, Universidad del Norte, Bejarano A., L. F., Physics and Meteorology Department, University of Puerto Rico, ... Departamento de Biología, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. (2018). Sea breeze in the Colombian Caribbean coast. *Atmósfera*, 31(4), 389–406. <https://doi.org/10.20937/ATM.2018.31.04.06>
- Devis-Morales, A., Montoya-Sánchez, R. A., Bernal, G., & Osorio, A. F. (2017). Assessment of extreme wind and waves in the Colombian Caribbean Sea for offshore applications. *Applied Ocean Research*, 69, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.09.012>
- EALO OTERO, A. J. (2011). ANÁLISIS DE GENERACIÓN COMPLEMENTARIA ENTRE ENERGÍA HIDRÁULICA Y EÓLICA, CASO: GENERACIÓN ISAGEN - PROYECTOS EÓLICOS EN LA GUAJIRA COLOMBIANA (Undergraduate thesis). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- El Tiempo. (2020, November 17). En vivo: así avanza emergencia en San Andrés y Providencia por huracán. *El Tiempo*.
- Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P. (2019). *Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P.* Retrieved October 16, 2019, from <http://www.electrificaribe.co/>
- EMPRESA URRÁ S.A. E.S.P. (2019). URRÁ es la única central hidroeléctrica de la Región Caribe. Retrieved July 10, 2019, from <http://urra.com.co/site/descripcion-tecnica/>
- Enel Green Power. (2019, April 8). Enel Green Power inaugura El Paso Solar, la planta fotovoltaica más grande de Colombia. Retrieved June 23, 2020, from <https://www.enelgreenpower.com/es/medios/news/2019/04/planta-fotovoltaica-el-paso-colombia-puesto-marcha>
- Energías Renovables El periodismo de las energías limpias. (2020, September 16). El segundo parque eólico del país llega tras 16 años de parón. Retrieved November 30, 2021, from <https://www.energias-renovables.com/eolica/electnor-reactiva-la-instalacion-de-parques-eolicos-20200916>

- 
- Enfield, D. B., & Alfaro, E. J. (1999). The dependence of caribbean rainfall on the interaction of the tropical atlantic and pacific oceans. *Journal of climate*, 12(7), 2093–2103. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2093:TDOCRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2093:TDOCRO>2.0.CO;2)
- EPM E.S.P. (2010). *Jepírachi: una experiencia con la comunidad indígena Wayuu de la Alta Guajira colombiana*. Retrieved from <https://www.epm.com.co/site/documentos/mediosdecomunicacion/publicacionesimpresas/jepirachi/LibroJepirachienespanol.pdf>
- FECYT. (2004). *Meteorología y Climatología. Semana de la Ciencia y la Tecnología*. (FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología), ed.) (p. 170). Villena Artes Gráficas.
- Flores, P., Tapia, A., & Tapia, G. (2005). Application of a control algorithm for wind speed prediction and active power generation. *Renewable energy*, 30(4), 523–536. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.07.015>
- Florez, A. (2003). *Colombia: Evolucion De Sus Relieves Y Modelados*. Universidad Nacional de Colombia, Red de Estudio de Espacio y Territorio, RET.
- FRANCO BARRERA, J. F., & DYNER R., I. (2004). EVALUACIÓN DE UN PORTAFOLIO DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD, UTILIZANDO DINÁMICA DE SISTEMAS. *Energética*, 32, 10.
- García Arbeláez, C., Barrera, X., Gómez, R., & Suárez Castaño, R. (2015). *El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21*. (2nd ed.) (p. 31). WWF-Colombia.
- Henao, F., Viteri, J. P., Rodríguez, Y., Gómez, J., & Dyner, I. (2020). Annual and interannual complementarities of renewable energy sources in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110318>
- Hoicka, C. E., & Rowlands, I. H. (2011). Solar and wind resource complementarity: Advancing options for renewable electricity integration in Ontario, Canada. *Renewable energy*, 36(1), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.004>
- Hoyos Gómez, L. S. (2016). *Impacto de la Ley 1715 de mayo 13 de 2014 sobre el sector eléctrico colombiano: análisis de los nuevos actores del mercado*. (Master thesis). Universidad Nacional de Colombia.
- Hoyos, N., Correa-Metrio, A., Sisa, A., Ramos-Fabiel, M. A., Espinosa, J. M., Restrepo, J. C., & Escobar, J. (2017). The environmental envelope of fires in the Colombian Caribbean. *Applied Geography*, 84, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.05.001>
- IDEAM. (1997). *POSIBLES EFECTOS NATURALES Y SOCIOECONÓMICOS DEL FENÓMENO EL NIÑO EN EL PERÍODO 1997-1998 EN COLOMBIA* (p. 78). Ministerio del Medio Ambiente.

- IDEAM. (2007). Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia (Informe de investigación) (p. 81). Ministerio del Medio Ambiente.
- IDEAM. (2014). BOLETÍN DE MONITORIO FENOMENO EL NIÑO Y LA NIÑA 2014. IDEAM.
- IDEAM. (2015a). ANUARIO CLIMATOLÓGICO 2014 (p. 352). IDEAM.
- IDEAM. (2015b). BOLETÍN DE MONITOREO FENOMENO EL NIÑO Y LA NIÑA 2015. IDEAM.
- IDEAM. (2016a). ANUARIO CLIMATOLÓGICO 2015 (p. 365). IDEAM.
- IDEAM. (2016b). ANUARIO CLIMATOLÓGICO 2016 (p. 356). IDEAM.
- IDEAM. (2016c). BOLETIN DE MONITOREO FENOMENO EL NIÑO Y LA NIÑA 2016. IDEAM.
- IDEAM. (2017a). BOLETÍN CLIMATOLÓGICO 2017. IDEAM.
- IDEAM. (2017b). BOLETIN DE MONITOREO FENOMENO EL NIÑO Y LA NIÑA 2017. IDEAM.
- IDEAM. (2018a). ANUARIO CLIMATOLÓGICO 2018 (p. 22). IDEAM.
- IDEAM. (2018b). BOLETIN DE MONITOREO FENOMENO EL NIÑO Y LA NIÑA 2018. IDEAM.
- IDEAM. (2018c, September 7). Glosario. Retrieved September 7, 2018, from <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario#E>
- IDEAM. (2019, March 16). Solicitud de Información. Retrieved March 16, 2019, from <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>
- IDEAM, Fundación Universitaria Los Libertadores, & UPME. (2017). ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA (ATLAS). (Imprenta Nacional de Colombia, ed.) (p. 172). Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- IDEAM, I. de H., Meteorología y Estudios Ambientales. (2017c). Atlas Climatológico de Colombia. (Imprenta Nacional de Colombia, ed.) (p. 266). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- IDEAM, P.N.U.D, MADS, D N P, CANCELLERÍA, & FMAM. (2016). Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero-Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (3rd ed.). (PUNTOAPARTE BOOKVERTISING, ed.).
- IDEAM, & UPME. (2017). Atlas de Viento de Colombia (Atlas). (Imprenta Nacional de Colombia, ed.) (p. 158). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- International Energy Agency. (2021). Global engagement - Key stats for Colombia, 1990-2016. Retrieved February 1, 2021, from <https://www.iea.org/countries/Colombia/>

- Jaramillo, U., Cortés-Duque, J., & Flórez, C. (2015). Atlas Climatológico de Colombia (vol. 2016). (Colombia anfibia. Un país de humedales. Bogotá: Instituto Alexander von Humbolt, trans.). Colombia anfibia. Un país de humedales. Bogotá: Instituto Alexander von Humbolt.
- Jurasz, J., Beluco, A., & Canales, F. A. (2018). The impact of complementarity on power supply reliability of small scale hybrid energy systems. *Energy*, 161, 737-743.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.182>
- Kent State University. (2021). SPSS Tutorials: Pearson Correlation. Retrieved February 19, 2021, from <https://libguides.library.kent.edu/SPSS/PearsonCorr>
- Laerd statistics. (2021). Pearson Product-Moment Correlation - When you should run this test, the range of values the coefficient can take and how to measure strength of association. Retrieved February 21, 2021, from <https://statistics.laerd.com/statistical-guides/pearson-correlation-coefficient-statistical-guide.php>
- Li, Y., G. Agelidis, V., & Shrivastava, Y. (2006). Wind-Solar Resource Complementarity and its Combined Correlation with Electricity Load Demand. School of Electrical and Information Engineering. The University of Sydney.
- López, J. A., Medina, G., Domínguez, E., Uribe, E., Zapata, W., Arango, S., ... Correa, C. (2013). ESTUDIO PARA DETERMINAR LA VULNERABILIDAD Y LAS OPCIONES DE ADAPTACIÓN DEL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO (p. 416). UPME.
- Meisel Roca, A., & Pérez V., G. J. (2006). Geografía física y poblamiento en la Costa Caribe colombiana. (Centro de Estudios Económicos Regionales (CEER), ed.) (p. 82). Banco de la República de Colombia.
- Mesa, O., Poveda, G., & Carvajal, L. F. (1997). Introducción al Clima de Colombia. Medellín.
- Miglietta, M. M., Huld, T., & Monforti-Ferrario, F. (2017). Local Complementarity of Wind and Solar Energy Resources over Europe: An Assessment Study from a Meteorological Perspective. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(1), 217-234.  
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0031.1>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015, July 21). Colombia ' ' presenta su compromiso de reducir en un 20% las emisiones de Gases Efecto Invernadero. noticias Minambiente. Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2158-colombia-presenta-su-compromiso-de-reducir-en-un-20-las-emisiones-de-gases-efecto-invernadero>
- Monforti, F., Huld, T., Bódis, K., Vitali, L., D'Isidoro, M., & Lacal-Aránzategui, R. (2014). Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy. A Monte

- Carlo approach. *Renewable energy*, 63, 576–586.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.028>
- NOAA. (2021). Cold & Warm Episodes by Season. Retrieved January 22, 2021, from  
[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Notton, G., Diaf, S., & Stoyanov, L. (2011). Hybrid photovoltaic/wind energy systems for remote locations. *Energy Procedia*, 6, 666–677. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.076>
- O M M. (1992). *Vocabulario Meteorológico Internacional (OMM - No. 182, 2da ed.)* (p. 802). Ginebra - Suiza.
- Observatorio del Caribe colombiano, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD Colombia, & Área de Pobreza y Desarrollo Sostenible. (2005). *El Caribe colombiano frente a los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)* . (D. Bonilla, ed.).
- OCHOA, F. (2001). La expansión eléctrica en el laberinto . *Revista Energética*, 27, 11–19.
- Orellana, L. (2001). Relaciones entre Variables Numéricas. In *ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA* (p. 50).
- Ortiz Royero, J. C. (2012). Exposure of the Colombian Caribbean coast, including San Andrés Island, to tropical storms and hurricanes, 1900–2010. *Natural Hazards*, 61(2), 815–827. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0069-1>
- Ortiz-Royero, J. C., Otero, L. J., Restrepo, J. C., Ruiz, J., & Cadena, M. (2013). Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. *Natural Hazards and Earth System Science*, 13(11), 2797–2804. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2797-2013>
- Paredes, J. R., & Ramírez C., J. J. (2017). *Energías renovables variables y su contribución a la seguridad energética: complementariedad en Colombia (Monografía del BID No. 497)*. (PH3, ed., Florencia Servente, trans.) (p. 62). Banco Interamericano de Desarrollo.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales*, 28((107)), 201–222.
- Poveda, G., & Jaramillo, A. (2000). ENSO-related variability of river discharges and soil moisture in Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 8, 2169–2178.

- 
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11), 1675–1678. <https://doi.org/10.1029/1999GL006091>
- Poveda, G., Mesa, O. J., & Waylen, P. R. (2003). Nonlinear forecasting of river flows in Colombia based upon ENSO and its associated economic value for hydropower generation. In H. F. Diaz & B. J. Morehouse (eds.), *Climate and Water* (Vol. 16, pp. 351–371). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3_15)
- Poveda, G., Ramírez, J. M., & Jaramillo, A. (2001). Modelación estocástica de la variabilidad anual e interanual de la humedad del suelo en Colombia bajo diferente cobertura vegetal. Presented at the IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, Buenos Aires, Argentina., Buenos Aires, Argentina.
- Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>
- Presidencia de la República. (2021, July 1). Con este parque eólico La Guajira se convierte en la puerta de entrada de las energías renovables: Duque [Noticia]. Retrieved November 30, 2021, from <https://idm.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Con-este-parque-eolico-La-Guajira-se-convierte-en-la-puerta-de-entrada-210701.aspx>
- PVsyst. (2021). PVsyst User Manual (V7.2).
- Qin, Z., Li, W., & Xiong, X. (2011). Estimating wind speed probability distribution using kernel density method. *Electric Power Systems Research*, 81(12), 2139–2146. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.08.009>
- Radomes, A. A., & Arango, S. (2015). Renewable energy technology diffusion: an analysis of photovoltaic-system support schemes in Medellín, Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 92, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.090>
- Ramírez C., J. J. (2015). MERRA-based study of the wind/solar resources and their complementarity to the hydro resource for power generation in Colombia (Master thesis). CARL VON OSSIETZKY universität OLDENBURG.
- Restrepo, J. C., Ortíz, J. C., Pierini, J., Schrottke, K., Maza, M., Otero, L., & Aguirre, J. (2014). Freshwater discharge into the Caribbean Sea from the rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, variability and recent changes. *Journal of hydrology*, 509, 266–281. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.045>
- Robinson, D., Riascos, A., & Harbor, D. (2012). Private Investment in Wind Power in Colombia (A report commissioned by the UK Foreign and Common). Oxford Institute for Energy Studies.

- Schmidt, J., Cancelli, R., & Pereira, A. O. (2016). The role of wind power and solar PV in reducing risks in the Brazilian hydro-thermal power system. *Energy*, 115, 1748–1757. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.059>
- Shaner, M. R., Davis, S. J., Lewis, N. S., & Caldeira, K. (2018). Geophysical constraints on the reliability of solar and wind power in the United States. *Energy & Environmental Science*. <https://doi.org/10.1039/C7EE03029K>
- Silva, A. R., Pimenta, F. M., Assireu, A. T., & Spyrides, M. H. C. (2016). Complementarity of Brazil's hydro and offshore wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 413–427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.045>
- Stephen Del Greco, Michel L. Urzen, & Saeid Ansari. (2005). Automated Validation Precipitation Data Using GIS and Spatial Interpolation Schemes. Presented at the General Assembly European Geosciences Union, Vienna, Austria.
- Steven J. Meyer, & Kenneth G. Hubbard. (1992). Nonfederal Automated Weather Stations and Networks in the United States and Canada: A Preliminary Survey. *American Meteorological Society*, 73(4), 449–457.
- Sustainable Innovation Forum. (2015). Find out more about COP21. Retrieved April 18, 2020, from <http://www.cop21paris.org/about/cop21/>
- T.F, S., Qin, D., Plattner, G. K., **Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... Midgley, P. M. (2013).** IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Cambridge University Press, ed.) (p. 1535 pp). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- United Nations Climate Change. (2015). INDC SUBMISSIONS FROM PARTIES. (K. Frizen, ed., F. Echeverri, trans.). United Nations Climate Change.
- UPME. (2015). PLAN DE EXPANSION DE REFERENCIA GENERACIÓN - TRANSMISIÓN 2014 - 2028. Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2017). BALANCE DE GAS NATURAL 2017 - DOCUMENTO DE TRABAJO. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA.
- UPME. (2018a). INFORME MENSUAL DE VARIABLES DE GENERACIÓN Y DEL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO -AGOSTO2018 (Informe Mensual) (p. 14). Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2018b). PLAN DE EXPANSIÓN DE REFERENCIA GENERACIÓN - TRANSMISIÓN 2017 - 2031 (p. 381). Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2019a). DÍA HISTÓRICO PARA LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA: POR PRIMERA VEZ, LA ENERGÍA DEL SOL Y DEL VIENTO LLEGARÁ, A PRECIOS MÁS

- BAJOS, A LOS HOGARES COLOMBIANOS (Comunicado de prensa No. 05) (p. 3).  
Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2019b). PLAN ENERGÉTICO NACIONAL 2020 - 2050 (p. 86). BOGOTÁ: MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA.
- UPME. (2020a). INFORME DE REGISTRO DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD (p. 52). Ministerio de Minas y Energías.
- UPME. (2020b). PLAN DE EXPANSIÓN DE REFERENCIA GENERACIÓN - TRANSMISIÓN 2019 - 2033 (p. 133). Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2021, January 27). SIEL - SISTEMA DE INFORMACIÓN ELÉCTRICO COLOMBIANO. Retrieved January 28, 2021, from [http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fGeneraci%c3%b3n%2fCapacidad+Efectiva+de+Generaci%c3%b3n+\(SIN\)](http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fGeneraci%c3%b3n%2fCapacidad+Efectiva+de+Generaci%c3%b3n+(SIN))
- UPME, & IDEAM. (2005). Atlas de Radiación Solar de Colombia (Atlas No. 1, 1 ra). (C. Chacón Cardona, ed.). Ministerio de Minas y Energía.
- Vergara, W., Deeb, A., Toba, N., Cramton, P., Leino, I., & Benoit, P. (2010). Wind Energy In Colombia: A Framework For Market Entry (world Bank Studies) (p. 120). World Bank Publications.
- Virtualopia. (2017). Virtual Colombia. Retrieved August 20, 2018, from <https://virtualamericas.net/colombia/photos/landscape/>
- Viviana, M., & Castillo, O. L. (2019). Colombian energy planning - Neither for energy, nor for Colombia. *Energy policy*, 129, 1132–1142. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.025>
- Viviescas, C., Lima, L., Diuana, F. A., Vasquez, E., Ludovique, C., Silva, G. N., ... **Paredes, J. R.** (2019). Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.039>
- Widen, J. (2011). Correlations Between Large-Scale Solar and Wind Power in a Future Scenario for Sweden. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(2), 177–184. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2010.2101620>
- Widén, J., Carpmann, N., Castellucci, V., Lingfors, D., Olauson, J., Remouit, F., ... **Waters, R.** (2015). Variability assessment and forecasting of renewables: A review for solar, wind, wave and tidal resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 356–375. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.019>
- World Meteorological Organization. (2008). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations. WMO-No.8. (METEOTERM, ed.) (p. 773). Geneva, Switzerland.

- World Meteorological Organization. (2014). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 2014 Edition (2014th ed.). (Chairperson, ed.) (p. 1139). Geneva 2, Switzerland: World Meteorological Organization.
- X M. (2021, January 1). Parámetros Técnicos del SIN (PARATEC). Retrieved February 1, 2021, from <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- XM S.A. E.S.P. (2019). INFORME OFERTA Y GENERACIÓN Mayo 2019 (p. 19). XM S.A. E.S.P.
- Younes, S., Claywell, R., & Muneer, T. (2005). Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. *Energy*, 30(9), 1533–1549. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.031>