



**Caracterización y análisis de complementariedad de los recursos de generación renovable
del sistema eléctrico colombiano**

Manuela Velásquez Restrepo

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Analítica y Ciencia de Datos

Asesores:

Álvaro Jaramillo Duque, PhD

Walter Mauricio Villa Acevedo, PhD

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Analítica y Ciencia de Datos

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Velásquez-Restrepo, M., 2024)
Referencia	Velasquez-Restrepo M. (2024). <i>Caracterización y análisis de complementariedad de los recursos de generación renovable del sistema eléctrico colombiano</i> . Trabajo de grado especialización. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Analítica y Ciencia de Datos, Cohorte VI.

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano: Julio Cesar Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Diego José Luis Botia Valderrama

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Siempre a ella.

Tabla de contenido

Contenido

Resumen	10
Abstract	11
1. Descripción del problema	13
1.1. Problema de negocio	13
1.2. Aproximación desde la analítica de datos	15
1.3. Aproximación desde la analítica de datos	16
1.4. Origen de los datos	17
1.5. Métricas de desempeño	18
2. Objetivos	20
2.1. Objetivo general	20
2.2. Objetivos específicos.....	20
3. Datos	21
3.1. Datos originales.....	21
○ Radiación y velocidad del viento:	21
○ Precipitación:.....	23
○ Índice ONI:.....	25
3.2. Datasets y analítica descriptiva	27
○ Radiación y velocidad del viento:	27
○ Precipitación:.....	28
○ Índice ONI:.....	29
4. Metodología	31

4.1 Caracterizar las variables climáticas y validar las fuentes de datos con información oficial	31
4.2 Identificar los departamentos con mayor generación solar, eólica e hidráulica.....	33
4.3 Utilizar el índice ONI para analizar y agrupar las variables climáticas en las distintas fases del ENSO, centrándose particularmente en la fase cálida	33
4.4 Análisis de correlación multivariada entre las series mensuales en periodos El Niño de los recursos de generación	34
4.5 Aplicar el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas para identificar los principales modos de variabilidad de los RECURSOS de generación	36
5. Resultados y discusión.....	39
5.1 Caracterizar las variables climáticas y validar las fuentes de datos con información oficial	39
o Radiación.....	39
o Velocidad del viento.....	41
o Precipitación.....	45
5.2 Identificar los departamentos con mayor generación solar, eólica e hidráulica.....	48
5.3 Utilizar el índice ONI para analizar y agrupar las variables climáticas en las distintas fases del ENSO, centrándose particularmente en la fase cálida	50
5.4 Análisis de correlación multivariada entre las series mensuales en periodos El Niño de los RECURSOS de generación.....	56
5.5 Aplicar el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas para identificar los principales modos de variabilidad de los RECURSOS de generación	61
6. Conclusiones	69
Referencias	72

Lista de figuras

Figura 1 Conjunto de datos (xarray) de la radiación solar incidente en superficie	22
Figura 2 Conjunto de datos (xarray) de la componente zonal y meridional del viento a 100 metros sobre el nivel del suelo	22
Figura 3 Conjunto de datos (xarray) de la precipitación	24
Figura 4 Regiones El Niño	25
Figura 5 Conjunto de datos del índice ONI	26
Figura 6 Dataset de la GHI ghi_monthly	27
Figura 7 Datasets de la GHI ghi_annual_cycle y ghi_value_day	28
Figura 8 Dataset de precipitación pcp_monthly.....	28
Figura 9 Datasets de precipitación pcp_annual_cycle y pcp_annual.....	29
Figura 10 Dataset del índice ONI	30
Figura 11 Irradiación global horizontal (GHI) promedio anual de largo plazo	39
Figura 12 Ciclo anual de la GHI en Colombia.....	40
Figura 13 Comparación del mapa promedio anual multianual de la GHI estimada y el mapa de referencia del IDEAM.....	41
Figura 14 Promedio anual multianual de la velocidad del viento	42
Figura 15 Ciclo anual de la velocidad del viento en Colombia	43
Figura 16 Comparación del mapa promedio anual multianual de la velocidad del viento estimada y el mapa de referencia del IDEAM.....	45
Figura 17 Precipitación promedio anual de largo plazo en Colombia	46
Figura 18 Ciclo anual de la precipitación en Colombia.....	47
Figura 19 Comparación del mapa promedio anual multianual de la precipitación estimada y el mapa de referencia del IDEAM.	48

Figura 20 Distribución espacial de las plantas hidráulicas despachadas centralmente y porcentaje de capacidad efectiva neta agregada por departamento respecto a la total	49
Figura 21 Porcentaje de Capacidad Efectiva Neta (CEN) por departamento para proyectos solares y eólicos en Colombia para el horizonte 2030.	50
Figura 22 Serie temporal del Índice Oceánico de El Niño (ONI) en el periodo 1981-2020.....	51
Figura 23 Ciclo anual estandarizado de la precipitación para cada fase del ENSO.....	52
Figura 24 Ciclo anual estandarizado de la GHI para cada fase del ENSO	54
Figura 25 Ciclos anual estandarizado de la velocidad del viento para cada fase del ENSO	55
Figura 26 Matriz de correlación entre los recursos de generación solar e hidráulica, en los respectivos departamentos de mayor generación.	57
Figura 27 Ciclo anual de los recursos de generación hidráulica y solar para episodios El Niño..	58
Figura 28 Matriz de correlación entre los recursos de generación eólica e hidráulica en episodios El Niño, en los respectivos departamentos de mayor generación.	59
Figura 29 Ciclo anual de los recursos de generación hidráulica y eólica durante episodios de El Niño	60
Figura 30 Espectro de potencias mediante la Transformada de Fourier de la serie de anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4	61
Figura 31 Varianza explicada y componentes principales obtenidas del análisis de EOF a la precipitación estandarizada en Colombia.....	63
Figura 32 Espectros de potencia de las componentes principales 1 y 2 de la precipitación estandarizada y sus respectivos modos de oscilación	64
Figura 33 Varianza explicada y componentes principales obtenidas del análisis de EOF a la radiación solar estandarizada en Colombia.....	65
Figura 34 Espectros de potencia de las componentes principales 1 y 2 de la radiación solar estandarizada y sus respectivos modos de oscilación	66
Figura 35 Varianza explicada y componentes principales obtenidas del análisis de EOF a la velocidad del viento estandarizada en Colombia	67
Figura 36 Espectros de potencia de las componentes principales 1 y 2 de la velocidad del viento estandarizada y sus respectivos modos de oscilación	68

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ENSO	El Niño-Oscilación del Sur
TSM	Temperatura superficial del mar
CEN	Capacidad Efectiva Neta
SIN	Sistema Interconectado Nacional
ONI	Índice Oceánico de El Niño
EOF	Funciones Ortogonales Empíricas
CHIRPS	Climate Hazard group InfraRed Precipitation with Station
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
EOF	Funciones Ortogonales Empíricas

Resumen

Este estudio se centra en entender cómo los recursos solares, eólicos e hídricos se complementan en diferentes escalas temporales en Colombia. Se caracterizan y validan las variables climáticas fundamentales y se utiliza el índice ONI para agruparlas en las diferentes fases del ENSO. Aunque se espera una expansión de energía solar y eólica para 2030, se reconoce que la literatura existente sobre complementariedad se enfoca mayormente en países desarrollados, sin considerar fenómenos climáticos globales como el ENSO. En este trabajo, se busca cerrar esta brecha para mejorar la comprensión de la interacción entre estos recursos y los fenómenos macroclimáticos en Colombia. Además, se realizó un análisis de correlación multivariada entre las series mensuales en periodos de El Niño de los recursos de generación, utilizando el coeficiente de correlación de Spearman. Durante episodios de El Niño, se observó una tendencia hacia correlaciones negativas entre la radiación solar, la velocidad del viento y la precipitación en departamentos con alto potencial para generación de energía eólica y solar. Esto sugiere una complementariedad entre estos recursos en diferentes regiones, donde la disminución de un recurso se asocia con el aumento del otro. También se aplicó un análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) para identificar los principales modos de variabilidad de los recursos de generación. Este enfoque se justifica por la alta dimensionalidad y complejidad del clima, permitiendo una representación espacial y temporal de los datos climáticos, esencial para comprender su impacto en los recursos de generación renovable y garantizar un suministro energético confiable y eficiente en Colombia. Esta investigación es relevante para el sector eléctrico, autoridades gubernamentales y la sociedad en general, ya que todos dependen de un suministro de energía seguro y sostenible.

Repositorios GitHub: <https://github.com/manuelavrestrepo/monografia>

Palabras clave: Recursos renovables, ENSO, El Niño, complementariedad, correlación multivariada, Funciones Ortogonales Empíricas (EOF)

Abstract

This study focuses on understanding how solar, wind, and water resources complement each other on different temporal scales in Colombia. Fundamental climate variables are characterized and validated, and the ONI Index is used to group them into different phases of the ENSO. While solar and wind energy expansion is anticipated by 2030, it is recognized that existing literature on complementarity primarily focuses on developed countries, without considering global climatic phenomena such as the ENSO. Closing this gap is sought to enhance the understanding of the interaction between these resources and macroclimatic phenomena in Colombia. Additionally, a multivariate correlation analysis was conducted on monthly series during El Niño periods of generation resources, using the Spearman correlation coefficient. During El Niño episodes, a trend towards negative correlations between solar radiation, wind speed, and precipitation was observed in departments with high potential for solar and wind energy generation. This suggests complementarity between these resources in different regions, where the decrease of one resource is associated with the increase of another. Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis was also applied to identify the main modes of variability of generation resources. This approach is justified by the high dimensionality and complexity of the climate, allowing for a spatial and temporal representation of climatic data essential for understanding its impact on renewable generation resources and ensuring a reliable and efficient energy supply in Colombia. This research is relevant to the electricity sector, governmental authorities, and society at large, as everyone relies on a secure and sustainable energy supply.

Keywords: Renewable resources, ENSO, El Niño, complementarity, multivariate correlation, Empirical Orthogonal Functions (EOF)

1. Descripción del problema

1.1. Problema de negocio

El evento conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) se origina en el Pacífico tropical a través de interacciones entre la atmósfera y el océano, mediadas por la retroalimentación del viento en la superficie y la Temperatura Superficial del Mar (TSM). Es la variación interanual más energética del sistema climático de la Tierra, con eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) que ocurren aproximadamente cada 2 a 7 años. Los eventos ENSO alteran la circulación atmosférica y los patrones de variabilidad climática global, con efectos de gran alcance en los sistemas humanos y naturales (McPhaden, Santoso, & Cai, 2020).

La fase cálida del ENSO, conocida como El Niño, implica el calentamiento anómalo de las aguas superficiales del centro y este del Océano Pacífico tropical, el cual produce una profundización de la termoclina oceánica, el debilitamiento de los vientos alisios del este y el desplazamiento del centro de convección del oeste al centro del Océano Pacífico tropical (McPhaden, Santoso, & Cai, 2020). En Colombia, particularmente, se experimentan anomalías negativas de precipitación, humedad de suelo, evapotranspiración y caudales de ríos, cuya magnitud y sincronización varían según las principales regiones geográficas del país (Caribe, Andes, Pacífico, Orinoco y Amazonas), con importantes impactos socioeconómicos, ambientales y ecológicos (Salas, 2020).

La dependencia del recurso hídrico en Colombia es evidente, dado que el 65% de la Capacidad Efectiva Neta (CEN) del Sistema Interconectado Nacional (SIN) proviene de plantas de generación hidroeléctrica (XM, 2024), con una capacidad efectiva neta de las plantas despachadas centralmente de 12.237 MW (XM, 2024).

Durante eventos de El Niño en regiones clave para la generación de energía, como la zona Andina donde se ubican la mayoría de los embalses, se observa una marcada disminución en las lluvias. Esta reducción, afecta los caudales de los ríos y quebradas que alimentan estos embalses, disminuyendo la oferta energética basada en hidroelectricidad y aumentando los precios de la

energía eléctrica. En el caso más crítico, la escasez podría resultar en racionamiento energético, ya que no sería posible satisfacer la demanda con los recursos disponibles a nivel nacional.

Aunque actualmente la contribución de la energía solar y eólica en el país es limitada, se espera un cambio significativo para el horizonte del año 2030. Se proyecta la instalación de aproximadamente 13.000 MW de capacidad solar y 3000 MW de capacidad eólica. Estas proyecciones indican un compromiso sólido con la expansión de las energías renovables no convencionales según el Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052. Esta transición hacia un sistema energético sostenible y eficiente se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los principios de la Transición Energética Justa (TEJ).

Una de las principales contribuciones del PEN es la oportunidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. La transformación de la matriz energética hacia fuentes renovables y tecnologías más eficientes no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también disminuye la huella de carbono del país y fortalece la seguridad energética al diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia del recurso hídrico.

En general, la literatura sobre complementariedad se ha centrado principalmente en estudiar las condiciones climáticas de los países desarrollados en latitudes septentrionales, como Estados Unidos, países de Europa y China (Henaó, 2020), donde los factores y fenómenos climáticos difieren significativamente de las zonas ecuatoriales. Además, las perspectivas utilizadas para estudiar la complementariedad suelen estar relacionadas con fenómenos meteorológicos locales y de corto plazo, con escalas espaciales y temporales cortas, como el ciclo diurno, y sin incluir eventos climáticos globales a gran escala como el ENSO (Henaó, 2020).

En síntesis, el problema de negocio radica en el desconocimiento del grado de complementariedad que las energías renovables no convencionales pueden ofrecer al sistema eléctrico colombiano, que está dominado por la energía hidroeléctrica. Dado que el ENSO hace parte de la variabilidad climática natural y que el cambio climático puede intensificar sus efectos,

es imperativo evaluar la complementariedad entre los recursos. Esto permitirá desarrollar un sistema interconectado flexible, capaz de operar de manera económica, confiable y segura, manteniendo el equilibrio entre oferta y demanda, utilizando eficientemente la matriz de generación y aprovechando la complementariedad entre los recursos que la componen.

Este problema es de gran relevancia para el sector eléctrico colombiano, las autoridades gubernamentales encargadas de la planificación energética, organizaciones interesadas en la seguridad energética del país y la sociedad en general, que depende de un suministro confiable de energía.

1.2. Aproximación desde la analítica de datos

Debido a que las estaciones secas anuales y el fenómeno de El Niño pueden generar condiciones climáticas de escasez de recursos hídricos que ejercen una gran presión sobre el sector eléctrico colombiano, y considerando que en otros países se ha demostrado que la complementariedad entre las fuentes renovables (Kougias, Szabó, Monforti-Ferrario, Huld, & Bódis, 2016; Beluco, de Souza, & Krenzinger, 2012), como la hidráulica, solar y eólica, puede compensar su variabilidad y aumentar la confiabilidad del sistema, se busca evaluar el grado de complementariedad existente entre la energía solar, eólica e hídrica.

Para realizar esta evaluación, se emplearán tres variables climáticas fundamentales: precipitación, velocidad del viento y radiación solar, además del Índice Oceánico de El Niño (ONI), que es el indicador principal para la declaratoria oficial de las fases del ENSO. El ONI será utilizado para analizar y agrupar estas variables climáticas en las distintas fases del ENSO, particularmente en su fase cálida, que ejerce una mayor presión sobre el sistema eléctrico. Se considerará que existe complementariedad cuando se observe una correlación negativa entre el recurso hídrico y las fuentes de energía renovable no convencional.

La metodología desde la analítica de datos consiste en la caracterización de las variables climáticas en todo el territorio colombiano, a partir de la estimación de los promedios de largo plazo, ciclo anual y ciclos estacionales. Adicionalmente, se realizará un análisis de correlación

multivariada para evaluar el grado de complementariedad que los recursos de generación renovables no convencionales pueden ofrecer el sistema eléctrico colombiano, que está dominado por la energía hidroeléctrica.

1.3.Aproximación desde la analítica de datos

Debido a que las estaciones secas anuales y el fenómeno de El Niño pueden generar condiciones climáticas de escasez de recursos hídricos que ejercen una gran presión sobre el sector eléctrico colombiano, y considerando que en otros países se ha demostrado que la complementariedad entre las fuentes renovables, como la hidráulica, solar y eólica, puede compensar su variabilidad y aumentar la confiabilidad del sistema, se busca evaluar el grado de complementariedad existente entre la energía solar, eólica e hídrica.

Para realizar esta evaluación, se emplearán tres variables climáticas fundamentales: precipitación, velocidad del viento y radiación solar, además del Índice Oceánico de El Niño (ONI), que es el indicador principal para la declaratoria oficial de las fases del ENSO. El ONI será utilizado para analizar y agrupar estas variables climáticas en las distintas fases del ENSO, particularmente en su fase cálida, que ejerce una mayor presión sobre el sistema eléctrico. Se considerará que existe complementariedad cuando se observe una correlación negativa entre el recurso hídrico y las fuentes de energía renovable no convencional.

La metodología desde la analítica de datos consiste en la caracterización de las variables climáticas en todo el territorio colombiano, a partir de la estimación de los promedios de largo plazo, ciclo anual y ciclos estacionales. Adicionalmente, se realizará un análisis de correlación multivariada para evaluar el grado de complementariedad que los recursos de generación renovables no convencionales pueden ofrecer el sistema eléctrico colombiano, que está dominado por la energía hidroeléctrica.

Este enfoque se complementa con el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF), que considera el sistema atmosférico como el resultado de interacciones complejas entre múltiples modos o grados de libertad. Las EOF, introducidas en meteorología en la década de 1940,

descomponen el campo espacio-temporal en patrones espaciales e índices temporales asociados, contribuyendo significativamente al conocimiento atmosférico (Hannachi, Jolliffe, & Stephenson, 2007).

Las EOF permiten identificar los principales modos de variabilidad en la radiación, la velocidad del viento y la precipitación, explicando la mayor parte de la variabilidad observada en estos recursos climáticos. Este método es robusto para la compresión de datos y la **reducción de dimensionalidad**, ampliamente utilizado en meteorología y oceanografía (Hannachi, Jolliffe, & Stephenson, 2007), lo que facilita representar tanto la variabilidad espacial como la temporal de las variables climáticas y determinar los modos empíricos asociados con la variabilidad espacio-temporal.

1.4. Origen de los datos

Para evaluar el grado de complementariedad entre el recurso hídrico y las fuentes de energía renovable no convencional (solar y eólica), se utilizan datos de radiación solar, velocidad del viento y precipitación, además del índice ONI. Los datos provienen de fuentes climáticas confiables, abiertas y reconocidas, ERA5 y CHIRPS, que proporcionan información detallada de las variables en un amplio periodo de tiempo. Adicionalmente, se utiliza el índice ONI proporcionado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) para identificar las fases del ENSO en el Pacífico tropical.

ERA5: Es un reanálisis atmosférico del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), que proporciona datos horarios de múltiples variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas, basados en datos de modelos y un amplio conjunto de observaciones de calidad controlada. De esta fuente se extraen las variables de radiación y velocidad del viento a 100m. Los datos abarcan un extenso periodo de tiempo desde 1958 hasta la actualidad. La información está disponible en la página web (ECMWF-Copernicus-Climate Change Service, 2024)

CHIRPS (Climate Hazard group InfraRed Precipitation with Station): Es un conjunto de datos de alta resolución basado en interpolación inteligente, que incorpora imágenes satelitales con datos de estaciones in situ para crear series temporales de lluvia. El proceso para la generación de los datos de CHIRPS se basa en tres principales componentes: Climate Hazards Precipitation Climatology (CHPClim); Climate Hazard Group Infrared Precipitation (CHIRP) y observaciones in situ de precipitación obtenidas a partir de varias fuentes. Los datos están en el periodo de tiempo correspondiente a enero 1981 hasta la actualidad, la información está disponible en formato en la página web (CHIRPS, 2024)

- ONI (Índice Oceánico de El Niño): Es un índice estándar que la NOAA utiliza para la identificación de los eventos El Niño y La Niña en el Pacífico tropical. Se calcula a partir de anomalías de la temperatura superficial del mar en la región El Niño 3.4 (situada en el Pacífico ecuatorial central, está formada por parte de Niño 3 y Niño 4, delimitándose por 120°O - 170°O y 5°N - 5°S). La serie de datos mensuales se encuentra disponible en la página web de la NOAA (NOAA, 2024).

En resumen, se usará información climática precisa y detallada, obtenida a través de métodos avanzados de reanálisis atmosférico, interpolación inteligente y mediciones directas. El periodo de estudio abarca décadas, permitiendo un análisis en diferentes escalas temporales.

1.5. Métricas de desempeño

En lo referente a las métricas de desempeño de los modelos, se utilizará la métrica del Coeficiente de Correlación de Spearman (ρ), para evaluar el grado de complementariedad entre el recurso hídrico y las fuentes de energía renovable no convencional (solar y eólica).

El desempeño del proceso de negocio se evaluará en función de la capacidad de prever y gestionar eficientemente la oferta y demanda de energía eléctrica, manteniendo un equilibrio adecuado, incluso en condiciones climáticas adversas como las asociadas a eventos del ENSO. Se considerará la capacidad del estudio para mejorar la confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico colombiano.

El éxito del modelo se medirá en función de la capacidad de correlacionar de manera efectiva las variables climáticas, no existe un valor mínimo predeterminado para las métricas.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Caracterizar e identificar el grado de complementariedad de los recursos de generación solar, eólica e hídrica en el sistema eléctrico colombiano.

2.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar las variables climáticas fundamentales (precipitación, velocidad del viento y radiación solar) en Colombia, considerando promedios de largo plazo, ciclos anuales, ciclos estacionales y ciclos diurnos.
2. Utilizar el índice ONI para analizar y agrupar las variables climáticas en las distintas fases del ENSO, centrándose particularmente en la fase cálida.
3. Realizar un análisis de correlación multivariada en diferentes escalas temporales para evaluar el grado de complementariedad entre los recursos hídrico, solar y eólico en Colombia.
4. Aplicar el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas para identificar los principales modos de variabilidad de la radiación, la velocidad del viento y la precipitación.

3. Datos

3.1. Datos originales

- ***Radiación y velocidad del viento:***

Los datos crudos de radiación y velocidad del viento se encuentran en formato NetCDF, que es un formato comúnmente utilizado para almacenar datos climáticos y meteorológicos. Los datos están almacenados en 480 archivos, cada uno correspondiente a un mes y año específico, están nombrados según el formato: COL_AAAA-MM_ERA5.nc, donde AAAA representa el año y MM el mes. Las variables climáticas contenidas en los archivos son:

- t2m: Temperatura a 2 metros sobre el nivel del suelo.
- d2m: Punto de rocío a 2 metros sobre el nivel del suelo.
- ssrd: Radiación solar incidente en superficie.
- u100 y v100: Componentes zonales y meridionales del viento a 100 metros sobre el nivel del suelo.
- sp: Presión atmosférica a nivel del mar.

En la **Figura 1** y **Figura 2** se muestran las matrices tridimensionales correspondientes a la radiación solar, así como a las componentes zonal y meridional del viento a 100 metros sobre el nivel del suelo. Además, se presentan las unidades, el nombre largo y el nombre estándar asociados con cada una de estas variables. Las dimensiones principales de los datos son latitud, longitud y tiempo:

- latitude: 81 puntos de latitud.
- longitude: 61 puntos de longitud.
- time: 350.640 instantes de tiempo, representando cada hora desde enero de 1981 hasta diciembre de 2020.

Figura 1 Conjunto de datos (xarray) de la radiación solar incidente en superficie

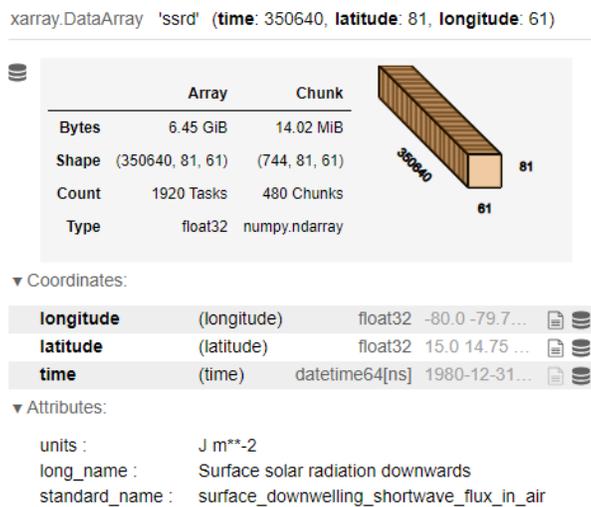
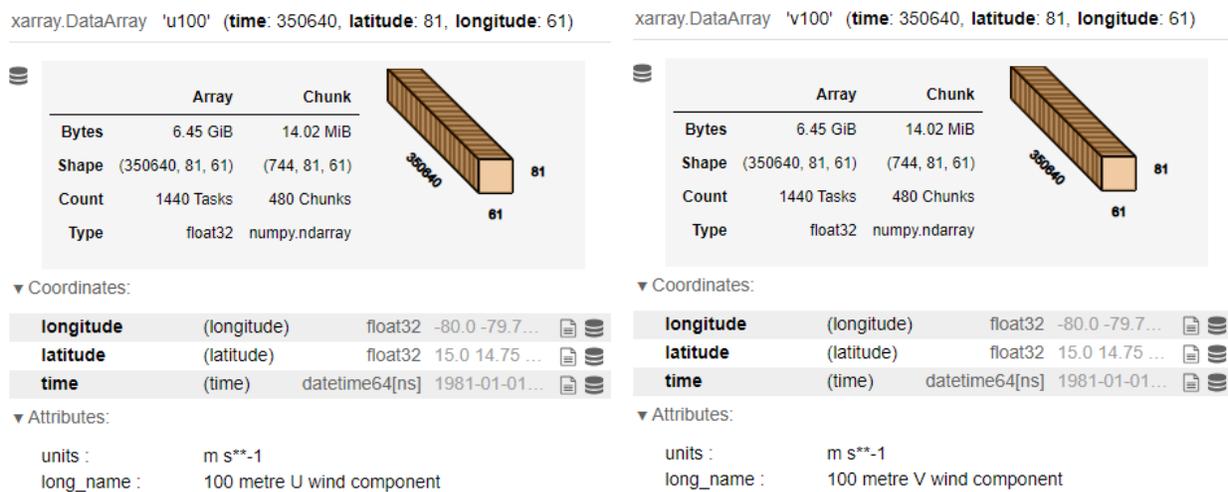


Figura 2 Conjunto de datos (xarray) de la componente zonal y meridional del viento a 100 metros sobre el nivel del suelo



La resolución espacial de los datos es de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, lo que equivale a aproximadamente 27.75 km. Son 480 archivos, cada uno pesa aproximadamente 42 MB, lo que implica un volumen considerable de información. Es relevante destacar que la carga de datos se gestiona de manera diferida mediante Dask, esta gestión de “lazy loading” permite trabajar con conjuntos de datos que podrían exceder la capacidad de memoria convencional, optimizando así la eficiencia en el manejo de grandes volúmenes de información.

Se accede a los datos con la biblioteca xarray en Python, específicamente, la función `xr.open_mfdataset` se emplea para abrir y combinar los 480 archivos NetCDF en un único conjunto de datos (`xr.Dataset`). Esta elección facilita la manipulación y análisis coherente de los datos climáticos en términos de latitud, longitud y tiempo.

En cuanto al acceso a la información es importante tener en cuenta que los datos provienen del ECMWF y están regidos por la Regulación (UE) No 1159/2013, el Acuerdo ECMWF y los Términos y Condiciones de la Comisión Europea. La licencia es gratuita, mundial, no exclusiva, libre de regalías y perpetua.

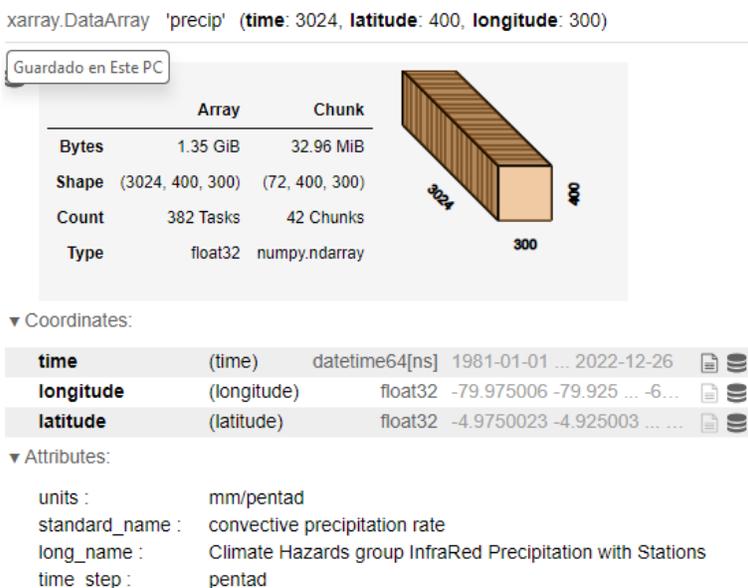
○ ***Precipitación:***

Los datos crudos de precipitación se encuentran en formato NetCDF y almacenados en 42 archivos, cada uno correspondiente a un año específico, están nombrados según el formato: `chirps-v2.0.AAAA.pentads.nc`, donde AAAA representa el año. La variable climática contenida en los archivos es “precip”: Precipitación acumulada pentadiaria.

En la **Figura 3** se muestran la matriz tridimensional correspondiente a la precipitación, además, se presentan las unidades, el nombre largo, el nombre estándar y la estampa de tiempo. Las dimensiones principales de los datos son latitud, longitud y tiempo:

- latitude: 400 puntos de latitud.
- longitude: 300 puntos de longitud.
- time: 3.024 instantes de tiempo, representando cada 5 días desde enero de 1981 hasta diciembre de 2020.

Figura 3 Conjunto de datos (xarray) de la precipitación



La resolución espacial de los datos es de $0,05^{\circ} \times 0,05^{\circ}$, lo que equivale a aproximadamente 5 km. Son 42 archivos, cada uno pesa aproximadamente 975 MB, lo que implica un volumen considerable de información. La carga de datos se gestiona de manera diferida mediante Dask, de la misma manera que los datos anteriormente mencionados.

Los datos se acceden mediante la biblioteca xarray en Python. Se realiza un filtro para acotar las dimensiones espaciales de latitud y longitud a la región de estudio, esto facilita un análisis coherente y específico para la ubicación de interés.

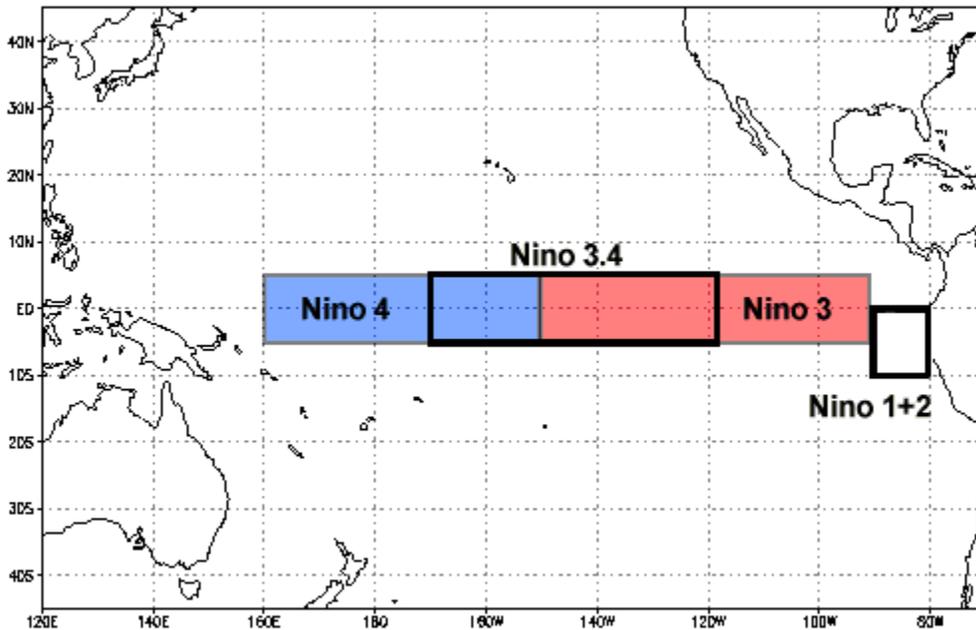
En cuanto al acceso a la información es importante tener en cuenta que los datos provienen de CHIRPS, con una licencia de “Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 IGO”. Esto implica que se pueden utilizar los datos para fines no comerciales, siempre y cuando se proporcione atribución al autor original y cualquier trabajo derivado se comparta bajo la misma licencia.

○ **Índice ONI:**

Los datos brutos del índice ONI se encuentran consolidados en un archivo único con formato xlsx, que comprende 524 registros correspondientes a valores mensuales desde enero de 1980 hasta diciembre de 2020. Estos datos se generan mediante el cálculo de la media móvil de tres meses consecutivos de las anomalías de la temperatura superficial del mar, medida por el sensor ERSST en la región El Niño 3.4 (ver **Figura 4**) del Océano Pacífico central.

Figura 4 Regiones El Niño

Fuente: NOAA



Valores positivos del ONI, mayores o iguales a $0,5^{\circ}\text{C}$ por 5 periodos consecutivos o más, indican la ocurrencia de un evento El Niño. Valores negativos del ONI, inferiores o iguales a $-0,5^{\circ}\text{C}$ por 5 periodos consecutivos o más, indican la ocurrencia de un evento La Niña. El umbral de anomalías se subdivide en eventos débiles ($0,5$ a $0,9^{\circ}\text{C}$), moderados ($1,0$ a $1,4^{\circ}\text{C}$), fuertes ($1,5$ a $1,9^{\circ}\text{C}$) y muy fuertes ($\geq 2,0^{\circ}\text{C}$).

La **Figura 5** presenta el contenido del archivo, el cual se organiza en cuatro columnas identificadas como SEAS, YR, TOTAL y ANOM. A continuación, se proporciona una descripción del significado de cada columna:

- SEAS: Indica el trimestre para el cual se estima la media.
- YR: Indica el año para el cual se estima la media.
- TOTAL: Valor de la media móvil de tres meses de la temperatura superficial del mar en la región El Niño 3.4.
- ANOM: Valor de la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar en la región El Niño 3.4.

Figura 5 Conjunto de datos del índice ONI

SEAS	YR	TOTAL	ANOM	Month	
fecha					
1981-01-01	DJF	1981	26.32	-0.26	1
1981-02-01	JFM	1981	26.32	-0.50	2
1981-03-01	FMA	1981	26.69	-0.47	3
1981-04-01	MAM	1981	27.11	-0.37	4
1981-05-01	AMJ	1981	27.31	-0.26	5
...
2020-08-01	JAS	2020	26.38	-0.57	8
2020-09-01	ASO	2020	25.87	-0.89	9
2020-10-01	SON	2020	25.54	-1.17	10
2020-11-01	OND	2020	25.40	-1.27	11
2020-12-01	NDJ	2020	25.43	-1.19	12

480 rows × 5 columns

En cuanto al acceso a la información es importante tener en cuenta que la licencia del índice ONI está sujeta al Freedom of Information Act (FOIA), que garantiza a cualquier persona el derecho de acceder a los registros de las agencias federales.

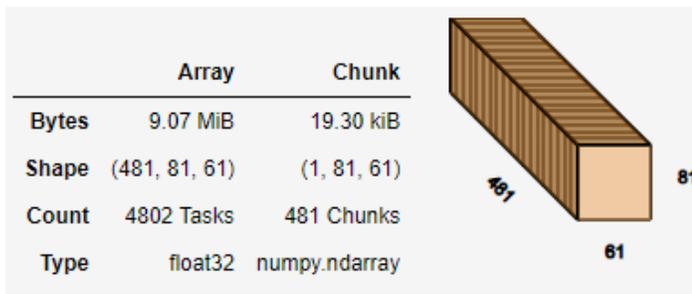
3.2. Datasets y analítica descriptiva

A continuación, se realiza una descripción detallada de los dataset obtenidos a partir de los datos crudos de las variables y un análisis descriptivo inicial de los mismos.

- **Radiación y velocidad del viento:**

A partir de los registros crudos de radiación y velocidad del viento, que contienen los valores horarios de cada variable, se derivaron los conjuntos de datos denominados `ghi_monthly` y `wind_monthly` respectivamente, los cuales se estimaron mediante la agrupación y el cálculo del promedio de las variables para cada uno de los 481 meses disponibles en el conjunto de datos, resultando los dataset mensuales promedio, que permiten estudiar la variabilidad mensual a lo largo del periodo de estudio.

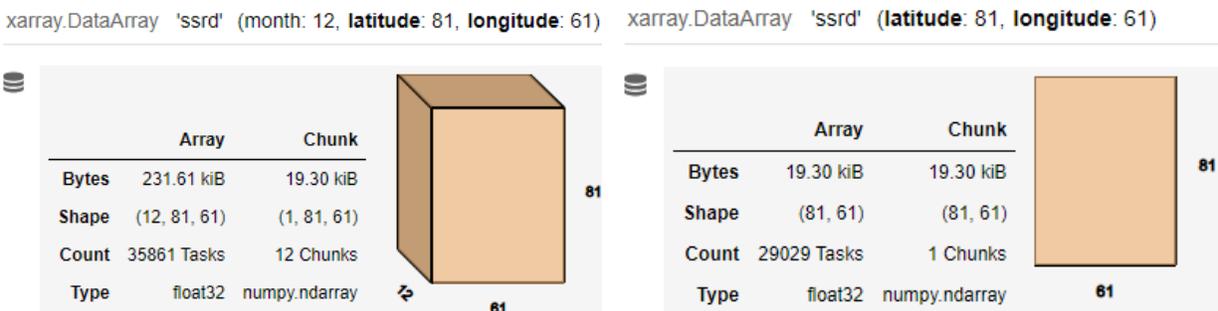
Figura 6 Dataset de la GHI `ghi_monthly`



A partir de este dataset se obtiene la serie mensual de GHI promedio para cada píxel en el dominio de estudio. Adicionalmente, se estimó el dataset `ghi_annual_cycle` a partir del conjunto de datos `ghi_monthly`. Mediante un procedimiento de agrupación, se determinaron las medias mensuales de la GHI diaria, resultando en una matriz promedio representativa para cada mes del año. Este conjunto de datos corresponde al ciclo anual de la GHI, el cual permite estudiar las variaciones estacionales de la radiación en Colombia.

En el dataset `ghi_value_day` se promedió la GHI diaria del ciclo anual promedio, para obtener la GHI diaria promedio anual de largo plazo. La **Figura 7** contiene información sobre las dimensiones y atributos de los dos dataset.

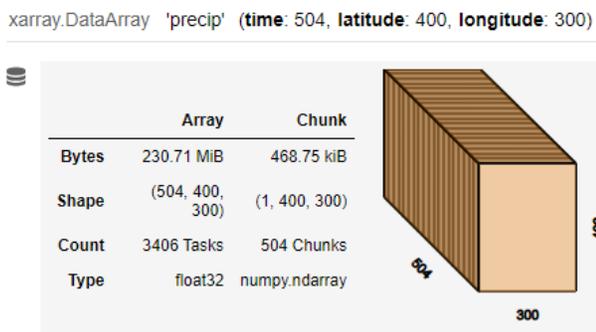
Figura 7 Datasets de la GHI *ghi_annual_cycle* y *ghi_value_day*



○ **Precipitación:**

A partir de los registros crudos de precipitación, que representan acumulados cada 5 días, se generó el conjunto de datos denominado *pcp_monthly*, el cual se estimó a partir de la agrupación y acumulación de los valores de precipitación de cada uno de los 504 meses disponibles en el conjunto de datos, resultando el dataset de precipitación mensual acumulada, el cual permite estudiar la variabilidad mensual a lo largo del periodo de estudio. La **Figura 8** contiene información sobre las dimensiones y atributos del dataset.

Figura 8 Dataset de precipitación *pcp_monthly*

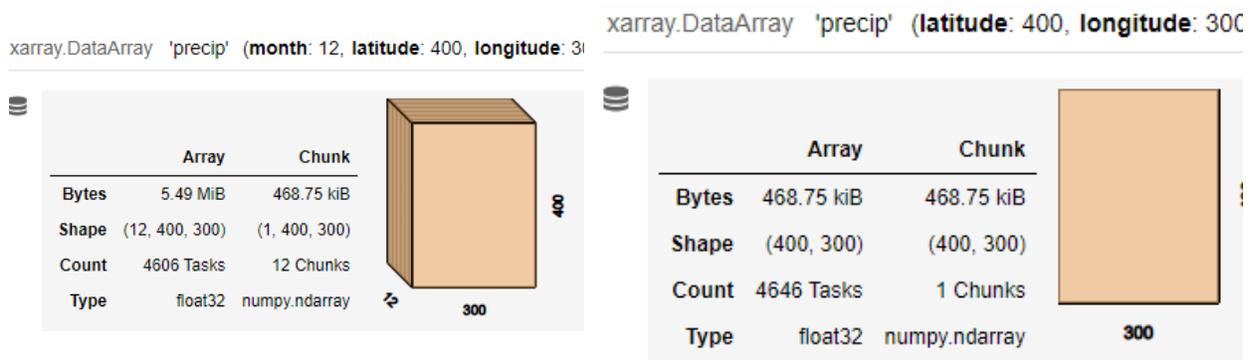


A partir de este dataset se obtiene la serie mensual de precipitación acumulada para cada píxel en el dominio de estudio. Adicionalmente, se estimó el dataset *pcp_annual_cycle* a partir del conjunto de datos *pcp_monthly*. Mediante un procedimiento de agrupación, se determinaron las medias mensuales, resultando en una matriz promedio representativa para cada mes del año. Este

conjunto de datos corresponde al ciclo anual de la precipitación, el cual permite estudiar las variaciones estacionales de la precipitación en Colombia.

En el dataset `pcp_annual` se acumuló la precipitación del ciclo anual, para obtener la precipitación media anual de largo plazo. La **Figura 9** contiene información sobre las dimensiones y atributos de los dos dataset.

Figura 9 Datasets de precipitación `pcp_annual_cycle` y `pcp_annual`



○ **Índice ONI:**

A partir de los datos crudos del índice ONI, se realizan diferentes transformaciones a las columnas SEAS y YR para obtener una columna denominada “fecha”, con la cual se podrá operar para realizar diferentes filtraciones de los datos para las fases del ENSO. La **Figura**

10 presenta el contenido del dataset obtenido, el cual se organiza en 2 columnas identificadas como fecha y ANOM.

Figura 10 Dataset del índice ONI

	ANOM
fecha	
1981-01-01	-0.26
1981-02-01	-0.50
1981-03-01	-0.47
1981-04-01	-0.37
1981-05-01	-0.26
...	...
2020-08-01	-0.57
2020-09-01	-0.89
2020-10-01	-1.17
2020-11-01	-1.27
2020-12-01	-1.19

480 rows × 1 columns

4. Metodología

4.1 Caracterizar las variables climáticas y validar las fuentes de datos con información oficial

A partir de la información transformada, se realizó una caracterización temporal y espacial de las variables de precipitación, radiación y velocidad del viento en el territorio colombiano, mediante la estimación del promedio anual multianual, el ciclo anual (promedio mensual para cada uno de los 12 meses) y en el caso de la radiación y la velocidad del viento que tenían una resolución temporal horaria, se obtuvo el ciclo diurno (promedio horario para cada una de las 24 horas).

El estudio, además de la caracterización general, incluyó una evaluación de los resultados obtenidos, comparándolos con los mapas de referencia emitidos como producto de una sinergia entre el IDEAM, y la UPME, en un convenio marco para desarrollar actividades conjuntas a fin de favorecer el desarrollo y aprovechamiento de las fuentes de energía alternativas y renovables en Colombia.

En cuanto a la radiación, *Radiación solar global promedio multianual* emitido en 2010, obtenido del Centro de Descarga de Información Geográfica Oficial del IDEAM. Este mapa de referencia se elaboró a partir de la información recopilada por el IDEAM, que incluye datos de estaciones convencionales y automáticas, los sensores de estas últimas se han instalado en el país desde el año 2005 (IDEAM, 2024). En cuanto a la velocidad del viento, se realizó una comparación con el mapa de *Velocidad Viento Superficie Promedio Multianual Periodo 1980-2000*, obtenido del mismo centro de descarga. Este mapa de referencia se estimó a partir de 111 estaciones del IDEAM, localizadas principalmente en la región Andina y Caribe junto con 122 datos de frontera tomados de modelos regionales y datos complementarios (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2024).

Es importante señalar que la distribución espacial no homogénea, los métodos de interpolación y el período de registro limitado de las estaciones utilizadas para los mapas de

referencia pueden contribuir a imprecisiones en la estimación de la radiación y la velocidad del viento. En contraste, los datos utilizados para estimar los mapas en este estudio provienen de un reanálisis con un sofisticado sistema de asimilación de datos y un modelo numérico global del sistema terrestre con periodo de tiempo de más de 40 años y una resolución espacial fina (Hersbach, 2020).

En relación con la precipitación, se efectuó una comparación con el mapa de *Precipitación Media Total Anual, Promedio Multianual 1981 – 2010*, obtenido del Centro de Descarga de Información Geográfica Oficial del IDEAM. Los datos empleados para generar este mapa provienen de las estaciones meteorológicas del IDEAM en toda el área continental e Insular de Colombia, las cuales registran la precipitación total durante las 24 horas del día.

Aunque la red de estaciones meteorológicas es robusta, la presencia de la barrera orográfica que constituyen los tres ramales de la cordillera de los Andes induce la formación de climas locales y regionales de alta complejidad (Poveda G. , 2004) e implica la necesidad de aumentar el número de estaciones para una representación más precisa de la variabilidad espacial de la lluvia en el país. En cuanto a la fuente de información CHIRPS utilizada para la estimación en este estudio, ha sido evaluada para Colombia y presenta varias fortalezas. Entre ellas, se destaca su alta resolución espacial, que es la más alta entre los productos actualmente disponibles para Colombia, la representación adecuada de los valores medios multianuales, la estacionalidad y la precipitación acumulada total (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2016) y su extenso periodo de registro permite capturar diversos fenómenos de la variabilidad climática natural.

Dadas las limitaciones de formato y resolución de los mapas oficiales, se llevó a cabo una comparación visual, asegurando la coherencia y similitud en los órdenes de magnitud y la variabilidad espacial entre los mapas de referencia y los estimados en este estudio, para efectos prácticos se usó la barra de colores de los mapas oficiales en los mapas generados en la investigación para facilitar la comparación.

4.2 Identificar los departamentos con mayor generación solar, eólica e hidráulica.

En primer lugar, se procede a identificar los departamentos con mayor generación hidráulica actual, ya que se estima que no habrá un considerable desarrollo de proyectos de este tipo en los próximos años. Utilizando la información publicada por XM (XM, 2024), se ha generado un listado de las plantas despachadas centralmente y se han identificado los departamentos en los cuales operan dichas plantas.

En segundo lugar, se consultó el “Informe de registro de proyectos de generación” emitido por la UPME (UPME, 2024) para obtener detalles sobre los proyectos de generación solar y eólica que se espera entren en operación en los próximos años. Este informe incluye información como el nombre del proyecto, su ubicación, capacidad efectiva neta y fecha probable de entrada en operación, entre otros datos relevantes.

Con base en la información recopilada, se han identificado los departamentos con mayor generación actual de plantas hidráulicas y aquellos con mayor potencial de generación, considerando los proyectos solares y eólicos que se espera entren en operación antes de 2030. Este proceso implica filtrar la información según el tipo de tecnología, agruparla por departamentos y sumar la capacidad efectiva neta de cada tipo de tecnología. Luego, se divide la capacidad agregada por departamento por la capacidad efectiva neta total de cada tecnología para identificar el porcentaje de capacidad efectiva neta disponible o esperada en cada uno de los departamentos.

4.3 Utilizar el índice ONI para analizar y agrupar las variables climáticas en las distintas fases del ENSO, centrándose particularmente en la fase cálida.

Se emplea la serie temporal del Índice Oceánico de El Niño (ONI), que comprende el período desde enero de 1980 hasta diciembre de 2020, para identificar los meses asociados a eventos de El Niño, La Niña o fase Neutra, conforme a los umbrales definidos de anomalías de la temperatura superficial del mar.

Posteriormente, se procedió a estandarizar las series medias mensuales de radiación, velocidad del viento y precipitación. Este proceso implica restar la media mensual, $\mu_{(i)}$, a cada uno de los valores de la serie, $V_{(i,t)}$ y dividir la diferencia por la desviación estándar del respectivo mes, $\sigma_{(i)}$ (Arango-Ruda & Poveda, 2018), como se describe a detalle en Montgomery y Rugner (1996):

$$v(i, t) = \frac{V_{(i,t)} - \mu_{(i)}}{\sigma_{(i)}}$$

Donde i denota los meses y $t = 1, \dots, T$ denota los años del registro de longitud total, T .

Finalmente se realiza un filtrado de las series estandarizadas de radiación, velocidad del viento y precipitación, seguido por la estimación de los ciclos anuales para cada fase del ENSO. Este análisis se centra en los departamentos identificados previamente con mayor potencial de generación, considerando cada tipo de generación (solar, eólica e hidráulica).

La estandarización ofrece varias ventajas: se obtienen series mensuales con promedio nulo y desviación estándar unitaria, lo que permite eliminar la variabilidad anual de las series mensuales de cada variable climática y la extracción de la variabilidad interanual (Arango-Ruda & Poveda, 2018), y con ello una comprensión más profunda de la influencia de los eventos del ENSO en las variables climáticas asociadas a la generación de energía eléctrica en Colombia.

4.4 Análisis de correlación multivariada entre las series mensuales en periodos El Niño de los recursos de generación

Utilizando los datos de las series promedio mensuales de radiación y velocidad del viento en los 10 departamentos con mayor potencial para plantas solares y eólicas, respectivamente, junto con las series mensuales de precipitación en los 10 departamentos con mayor desarrollo de proyectos hidroeléctricos, se procede a calcular la correlación entre cada par de variables del conjunto de datos y se construye una matriz de correlación de dimensiones 10x10. Estas series

corresponden a datos filtrados para periodos de El Niño, con un énfasis particular en esta fase, dado que ejerce una mayor presión sobre el sistema eléctrico.

Para estimar la correlación, se utiliza el coeficiente de correlación de Spearman, una medida no paramétrica que no asume una distribución específica de los datos y es más adecuada cuando los datos pueden no seguir una distribución normal o cuando la relación entre las variables no es lineal. Esta correlación se representa como ρ y se calcula utilizando la fórmula (Spearman, 1904):

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde, d_i es la diferencia entre los rangos de las observaciones para cada par de variables y n es el número total de observaciones. La correlación de Spearman evalúa la relación entre las clasificaciones de los datos en lugar de los valores brutos, lo que la hace más robusta ante valores atípicos y datos no lineales (Marín Salazar, 2017). Este enfoque es apropiado debido a que los recursos de generación renovable están influenciados por condiciones climáticas variables y complejas.

Es importante tener presente que, en todos los análisis realizados en este estudio, un ρ más negativo indicaría una relación inversa, o complementaria, más fuerte entre ambos pares. Por lo tanto, se considerará que existe complementariedad cuando se observe una correlación negativa significativa entre el recurso hídrico y las fuentes de energía renovable no convencional.

En resumen, este análisis de correlación multivariada busca evaluar el grado de complementariedad que las energías renovables no convencionales pueden ofrecer al sistema eléctrico colombiano, dominado por la energía hidroeléctrica. Dado el posible impacto del ENSO y el cambio climático, comprender la complementariedad entre los recursos es esencial para desarrollar un sistema eléctrico flexible, eficiente y confiable, capaz de adaptarse a las condiciones climáticas cambiantes y mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda de energía.

4.5 Aplicar el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas para identificar los principales modos de variabilidad de los RECURSOS de generación

En primer lugar, a partir de la serie de anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4, se realiza un análisis espectral de la serie utilizando la transformada inversa de Fourier. Estas anomalías son publicadas por la NOAA, y sirven como base para estimar el índice ONI y oficializar los eventos ENSO.

El propósito del análisis espectral es trasladar los datos del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias, tratando la serie como una señal en función de la frecuencia. Esto permite observar las series como una combinación de señales armónicas, es decir, en términos de su contenido frecuencial, estableciendo así la relación entre el tiempo y la frecuencia. Los espectros resultantes son gráficos que muestran las frecuencias dominantes presentes en los datos, lo que proporciona información sobre las recurrencias o ciclicidades presentes en la serie de tiempo. En este contexto, los espectros permiten identificar los periodos u oscilaciones más característicos de una señal específica, como las señales asociadas a eventos ENSO (Fajardo Barreto & Franco Ovalle, 2004), por tanto, este análisis permitió determinar los cuasiperiodos de recurrencia de los eventos de El Niño y La Niña, los cuales serán posteriormente considerados en este estudio.

El clima constituye fenómenos de alta dimensionalidad y complejidad, el sistema atmosférico es el resultado de interacciones altamente complejas entre muchos grados de libertad o modos. Para comprender mejor este comportamiento dinámico/físico involucrado, es útil intentar entender sus interacciones en términos de un número mucho menor de modos prominentes de variabilidad. Esto ha llevado al desarrollo por parte de los investigadores atmosféricos de métodos que ofrecen una representación espacial y temporal de grandes conjuntos de datos atmosféricos (Hannachi, Jolliffe, & Stephenson, 2007).

Las funciones ortogonales empíricas (EOF, por sus siglas en inglés) se utilizaron por primera vez en meteorología a finales de la década de 1940. Este método, que descompone un campo espacio-temporal en patrones espaciales e índices temporales asociados, ha contribuido

significativamente al avance del conocimiento atmosférico (Hannachi, Jolliffe, & Stephenson, 2007). Debido a las ventajas de estos métodos, en este estudio se realiza un Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) a las fuentes de generación renovable, que incluyen precipitación, velocidad del viento y radiación solar.

Las Funciones Ortogonales Empíricas constituyen la base ortogonal de un conjunto de series de tiempo F en distintos sitios de medición. La relación entre estas funciones se define mediante la matriz de covarianza entre las series (VAUTARD, YIOU, & GHIL, 1992), que es una matriz cuadrada y simétrica $A = F^t F$. En esta matriz, los valores diagonales deben ser unitarios, ya que representan la covarianza de cada serie consigo misma.

Para encontrar las EOF, se calculan los valores propios (λ) y los vectores propios (χ) de la matriz A , donde los vectores propios se corresponden con las EOF. La relación es expresada por la ecuación $A\chi = \lambda\chi$, donde λ es una matriz diagonal que contiene los valores propios de A , y χ^i es el vector propio de A asociado a cada λ^i .

Cada EOF, representado como un mapa, describe una oscilación estacionaria, mientras que la evolución temporal de una EOF muestra cómo varía este patrón a lo largo del tiempo. Para observar la evolución temporal de EOF_1 , calculamos los componentes a_1 , son las proyecciones de las series de tiempo sobre EOF_1 . Estos componentes forman una serie temporal que representa la evolución de EOF_1 . De manera similar, para cada EOF_j , obtenemos un conjunto correspondiente de componentes a_j , conocidos como Componentes Principales (CP) o coeficientes de expansión de los EOF (Björnsson & Venegas, 1997).

$$a_j = F \cdot (EOF_j)$$

Una vez obtenidas las EOF, se calculan las Componentes Principales (CP) como las proyecciones de las series de tiempo sobre las EOF. Esto nos proporciona tantas CP como EOF existentes (Yepes & Poveda, 2012). Los datos originales pueden ser reconstruidos a partir de las EOF y los coeficientes de expansión según la fórmula:

$$F = \sum_{j=1}^N a_j EOF_j$$

Donde N representa el tamaño de la serie de tiempo. La primera CP (a_1) captura el mayor porcentaje de variabilidad de la serie, determinado por los valores propios de la matriz A .

Una vez identificadas las CP que más varianza aportan a la serie, se realiza un análisis espectral de cada una para determinar las frecuencias dominantes e identificar aquellas que corresponden a la oscilación del ENSO, es decir, a los eventos de El Niño y La Niña. Luego, se procede a estimar los modos de oscilación (proyecciones de los datos originales en las CP) que son patrones espaciales que describen cómo varían los datos a lo largo de diferentes dimensiones (Hannachi, Jolliffe, & Stephenson, 2007) y permiten identificar las anomalías asociadas a los fenómenos dominantes en esa frecuencia. Este proceso permite comprender la relación entre los eventos de El Niño y La Niña y la variabilidad de los recursos de generación renovable.

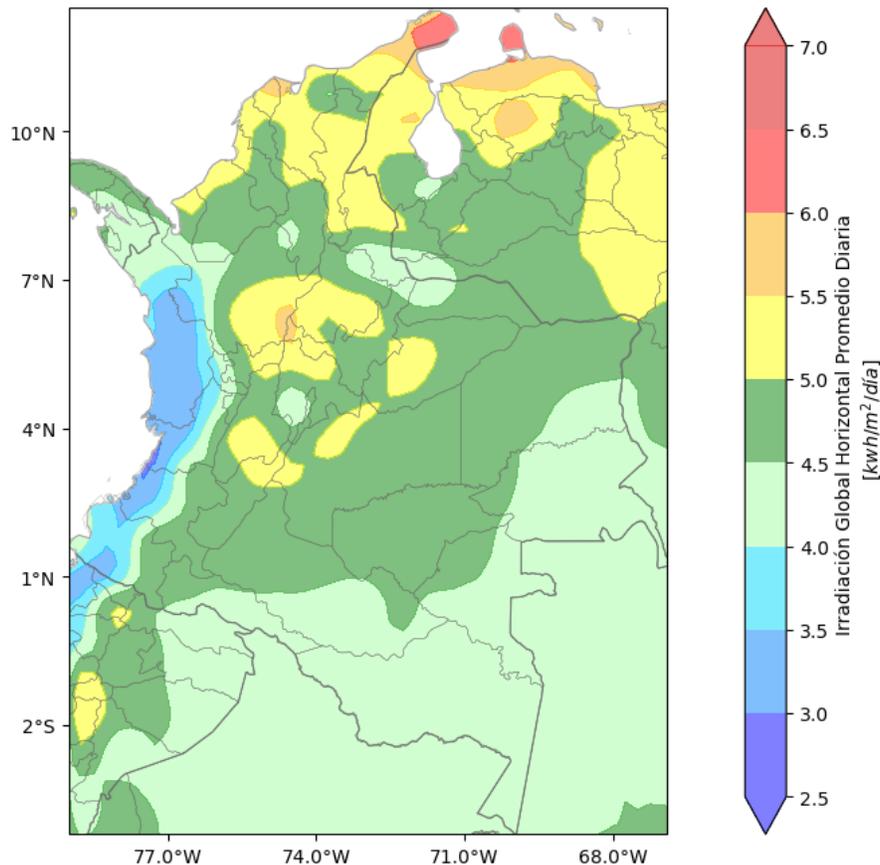
5. Resultados y discusión

5.1 Caracterizar las variables climáticas y validar las fuentes de datos con información oficial

○ *Radiación*

El conocimiento de la distribución espacial y temporal del potencial energético solar es necesario para identificar las regiones estratégicas donde la energía solar es más adecuada para abordar las necesidades energéticas. El promedio anual multianual de la Irradiación global horizontal (GHI), estimado para el período 1981-2020 (conjunto de datos denominado “ghi_value_day”) se muestra en la **Figura 11** y representa la cantidad agregada de energía en kilovatios-hora (kWh) que en promedio inciden durante el día sobre un metro cuadrado, expresada en kWh/m² por día.

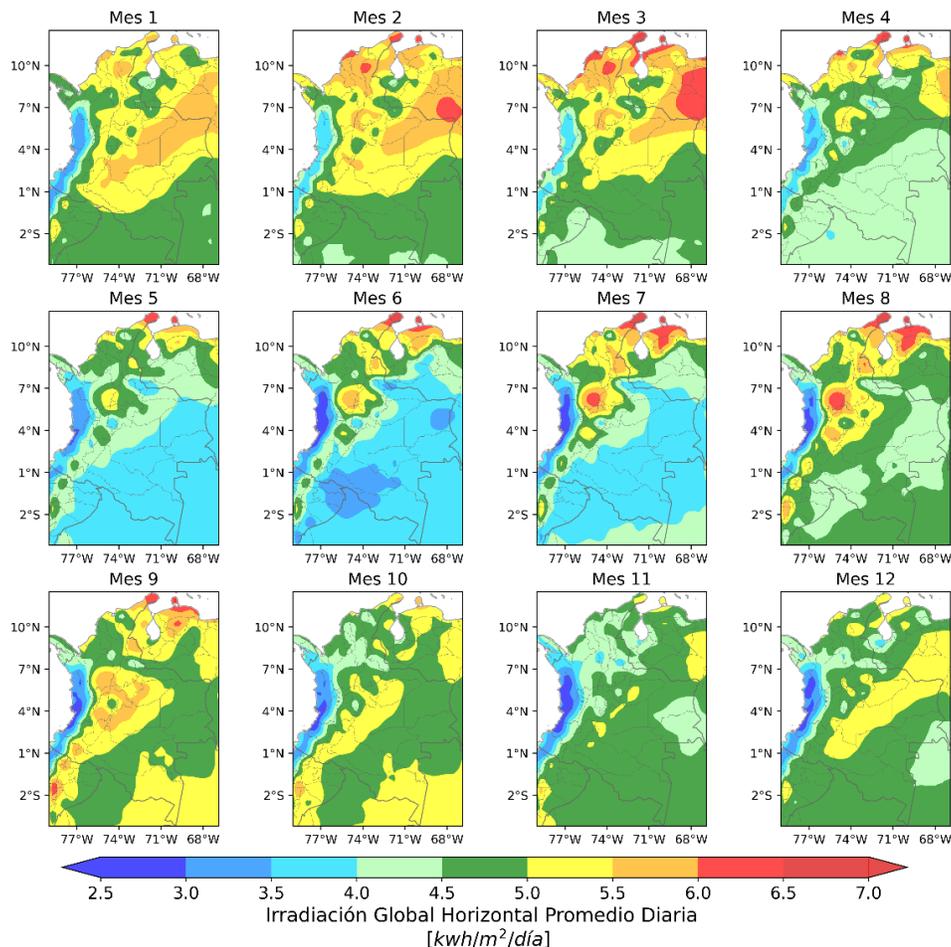
Figura 11 Irradiación global horizontal (GHI) promedio anual de largo plazo



En Colombia, las mayores magnitudes de radiación global se localizan en la región Caribe, extensas áreas de la Orinoquía y los valles interandinos. Por otro lado, las menores magnitudes se observan en amplias zonas de la región Pacífica y Amazónica, así como en algunos sectores dispersos a lo largo de las tres cordilleras.

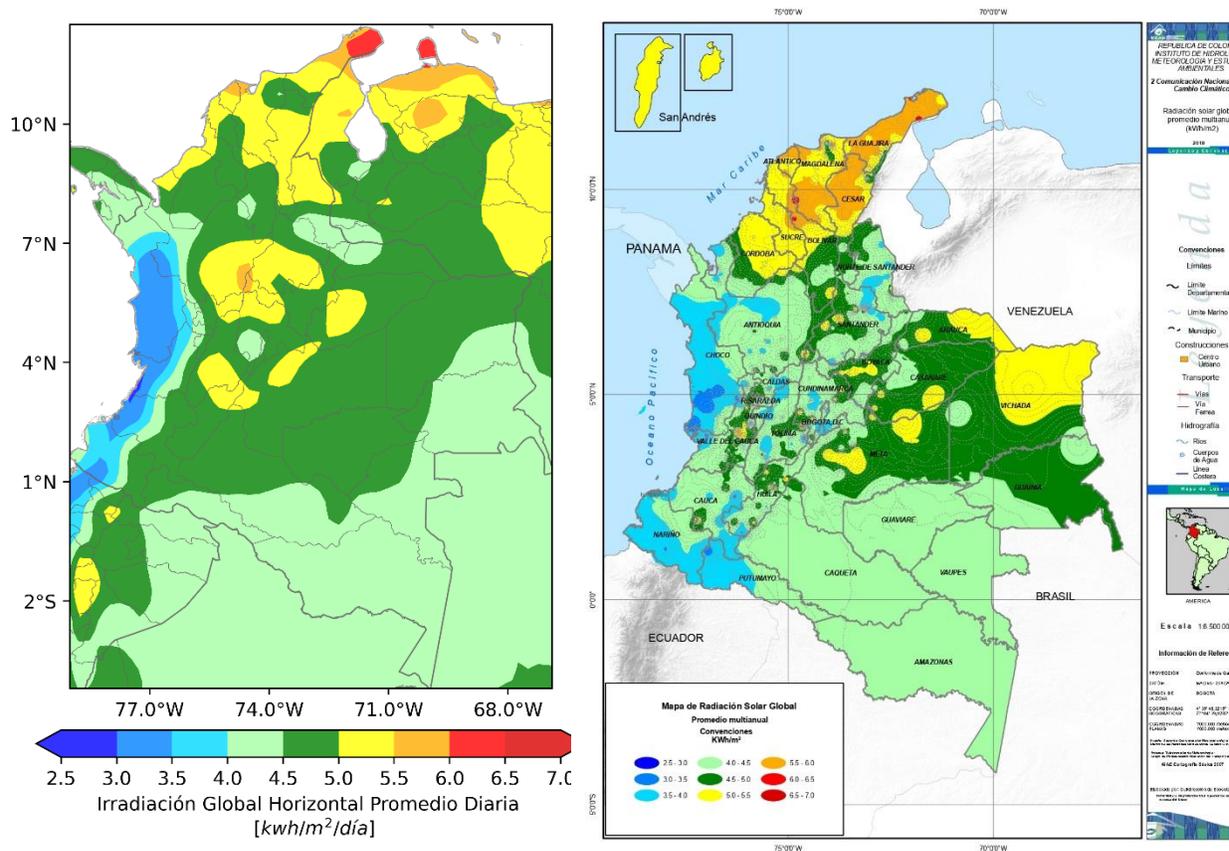
La **Figura 12** muestra el ciclo anual promedio de la GHI (conjunto de datos denominado “ghi_annual_cycle”), que ilustra las variaciones mensuales de la Irradiación Global en Colombia. En la región Andina y Caribe, se evidencian dos períodos de alta y baja irradiación al año, con picos en enero/febrero y julio/agosto, y mínimos en abril, mayo, octubre y noviembre. Por otro lado, las regiones Pacífica, Amazónica y Orinoquía muestran un comportamiento monomodal, con picos al inicio y finales del año y mínimos a mediados del año.

Figura 12 Ciclo anual de la GHI en Colombia



A continuación, en la **Figura 13**, a la izquierda se presenta el mapa promedio anual multianual de la GHI, como se mostró anteriormente, mientras que a la derecha se encuentra el mapa de referencia de la GHI emitido por el IDEAM. Al realizar una comparación visual, se observa que existe coherencia y similitud en los órdenes de magnitud y en la distribución espacial de la GHI a lo largo del territorio nacional. Con ligeras diferencias principalmente en algunos departamentos de la región Andina y la Orinoquia.

Figura 13 Comparación del mapa promedio anual multianual de la GHI estimada y el mapa de referencia del IDEAM.

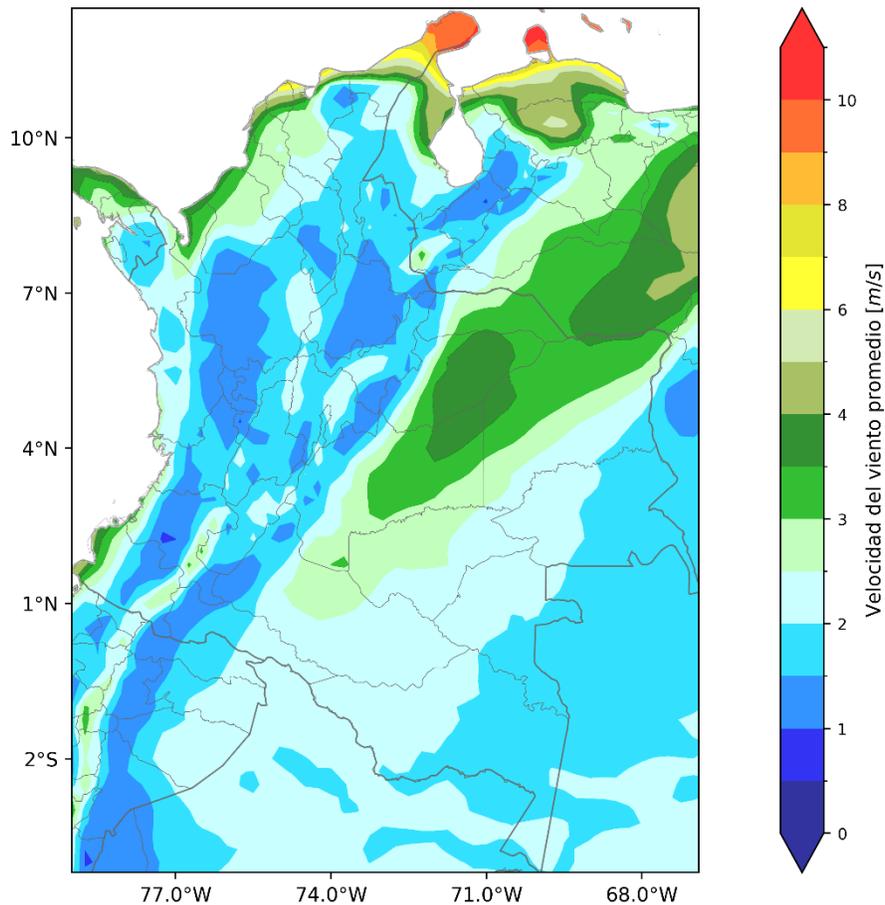


○ **Velocidad del viento**

Debido a su posición en la franja tropical, su variada topografía y localización frente al mar Caribe y al océano Pacífico, Colombia adquiere una condición privilegiada en cuanto a recursos renovables de energía, incluyendo aquellos asociados con el viento. Para estudios relacionados con

la energía eólica, se considera que vientos con intensidades iguales o superiores a 5 m/s ofrecen una óptima alternativa para la utilización de este recurso natural en la generación de energía (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2024). El promedio anual multianual de la velocidad del viento, estimado para el período 1981-2020 (conjunto de datos denominado “wind_annual”) se muestra en la **Figura 14**.

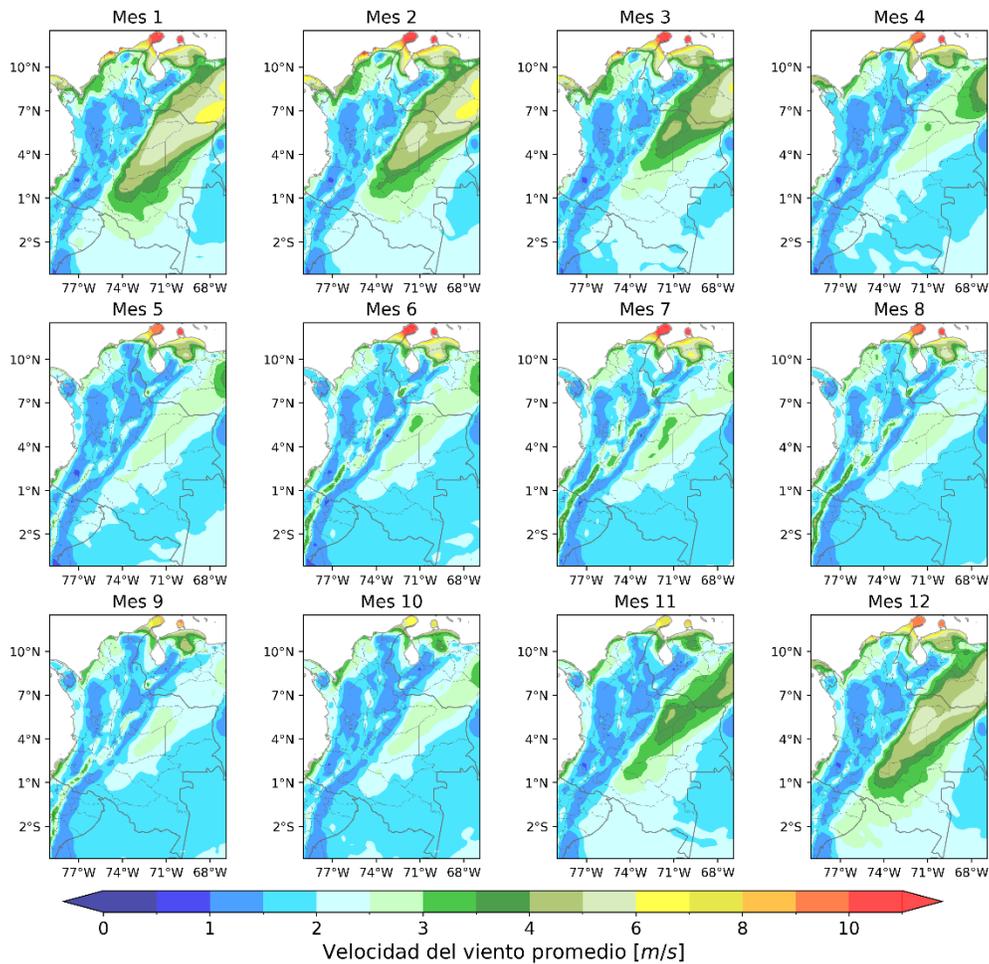
Figura 14 Promedio anual multianual de la velocidad del viento



Se observan velocidades del viento superiores a 5 m/s en el mar Caribe y a lo largo del litoral de los departamentos de Bolívar, Atlántico y Magdalena, así como en el norte de La Guajira, donde se alcanzan velocidades promedio de 10 m/s en la alta Guajira. En contraste, en las regiones Andina, Pacífica y Amazónica, las velocidades promedio del viento no superan los 2.5 m/s, mientras que en algunos departamentos de la región Orinoquía oscilan entre 2.5 y 4 m/s.

La **Figura 15** muestra el ciclo anual promedio de la velocidad del viento (conjunto de datos transformados denominado “wind_annual_cycle”), es decir, las variaciones mensuales de la velocidad del viento en Colombia. A nivel estacional, se observa un aumento en las velocidades del viento sobre el mar Caribe durante los periodos de diciembre a marzo (DEFM) y junio a agosto (JJA). Por el contrario, en los meses de abril y mayo se registra una reducción significativa en la intensidad de los vientos en la región Caribe y en la Orinoquia, debido a la presencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que trae consigo vientos más débiles. De manera similar, durante octubre y noviembre, los vientos se debilitan nuevamente debido al segundo paso de la ZCIT por el territorio colombiano. En el centro del país, no se evidencian diferencias significativas en la velocidad del viento a lo largo del año.

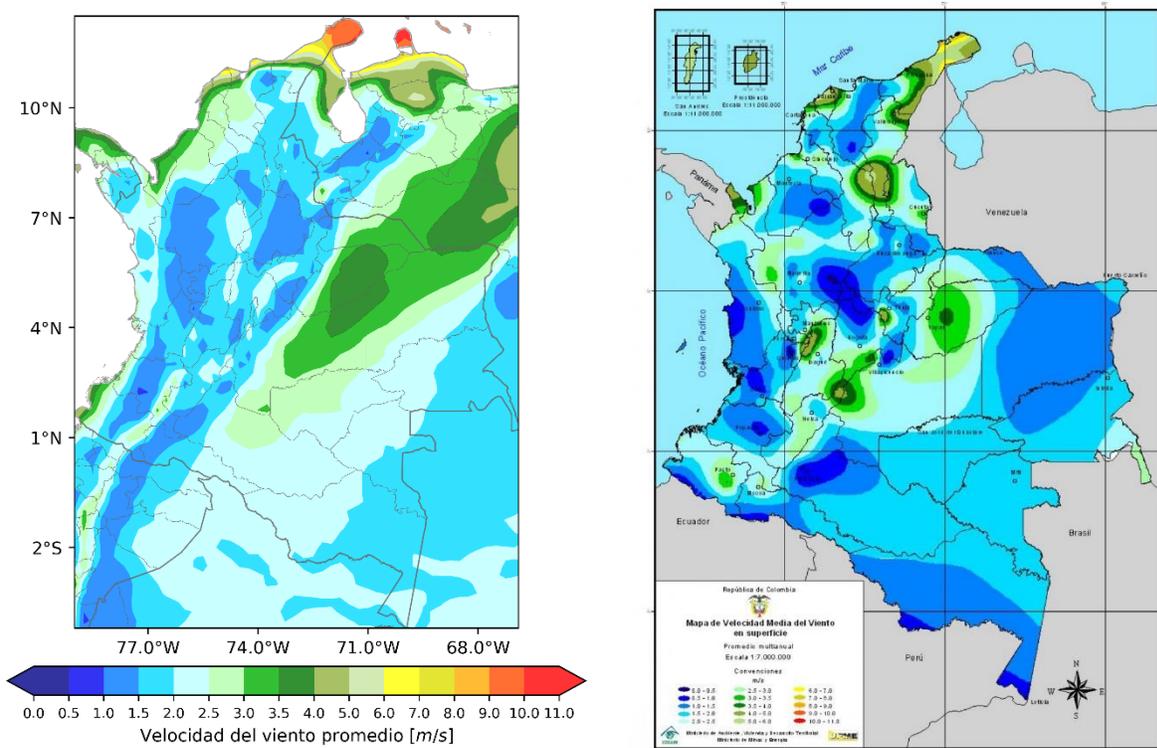
Figura 15 Ciclo anual de la velocidad del viento en Colombia



A continuación, en la **Figura 16** a la izquierda se presenta el mapa promedio anual multianual de la velocidad del viento, como se mostró anteriormente, mientras que a la derecha se encuentra el mapa de referencia emitido por el IDEAM. Al comparar visualmente ambos mapas, se destacan notables diferencias, especialmente en la alta Guajira y en el litoral de los departamentos de Bolívar, Atlántico y Magdalena, donde se observan valores significativamente superiores en comparación con el mapa de referencia. Además, se aprecia que los departamentos del norte de la Orinoquia presentan valores ligeramente más elevados. Sin embargo, en términos generales, se observan órdenes de magnitud y distribución espacial similares de la velocidad del viento en todo el territorio nacional.

Es importante mencionar que la estimación del mapa de referencia corresponde a un promedio de 20 años (1980-2000) además de las limitaciones asociadas a las pocas estaciones y los métodos de interpolación, mientras que el mapa estimado en este estudio abarca un periodo de 40 años, este extenso registro temporal permite capturar una mayor diversidad de fenómenos asociados a la variabilidad climática natural que es posible que el mapa de referencia no haya logrado capturar completamente. Por lo tanto, es posible observar diferencias significativas en algunas regiones del país entre ambos mapas.

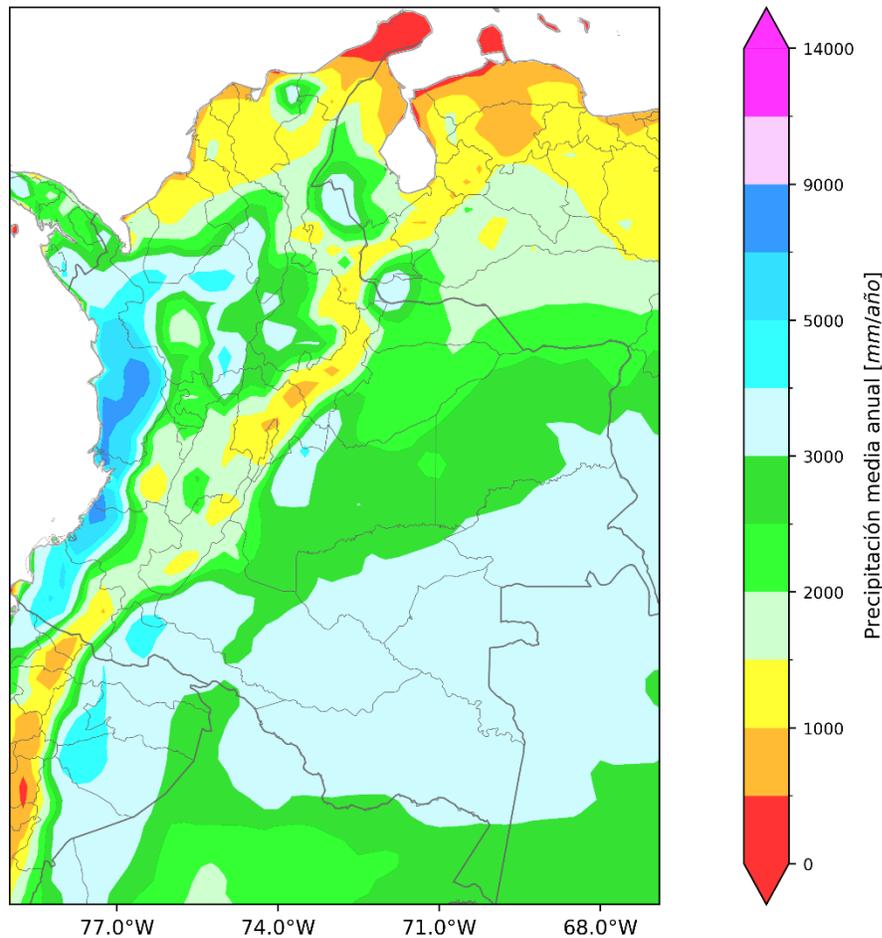
Figura 16 Comparación del mapa promedio anual multianual de la velocidad del viento estimada y el mapa de referencia del IDEAM.



○ **Precipitación**

La posición geográfica de Colombia en el noroccidente de Suramérica propicia la influencia de los procesos de los océanos Atlántico y Pacífico. Donde la interacción del Océano Pacífico con la circulación monzónica y la ZCIT en el occidente del país genera una alta humedad en la Cordillera Occidental, convirtiendo esta región en una de las más lluviosas del planeta (IDEAM - UNAL, 2018). Además, al encontrarse al noroeste de la cuenca Amazónica, recibe importantes cantidades de humedad y precipitación, que afectan la parte sur de la región Andina, especialmente en las zonas altas de los ríos Putumayo, Caquetá y Magdalena (IDEAM - UNAL, 2018). El promedio anual de largo plazo de la precipitación, estimado para el período 1981-2020 (conjunto de datos transformados denominado “pcp_annual”) se muestra en la **Figura 17**.

Figura 17 Precipitación promedio anual de largo plazo en Colombia

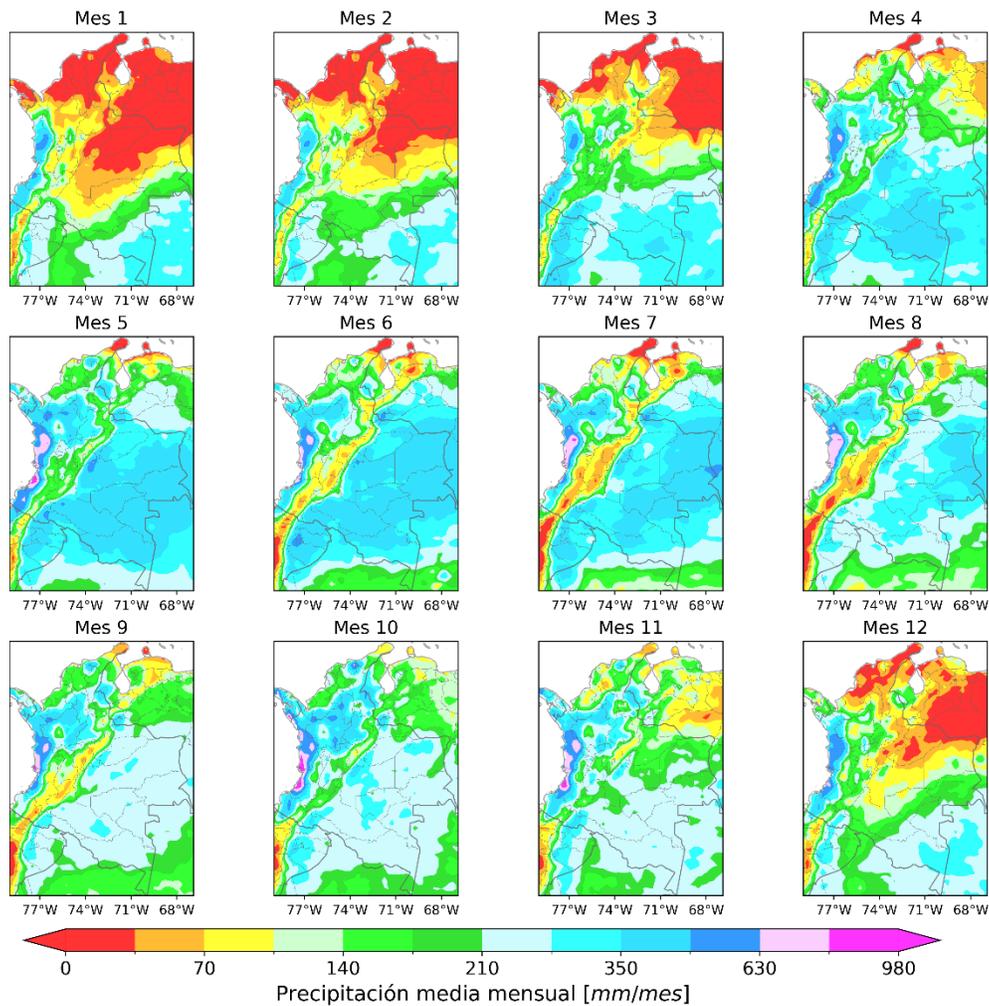


En el país, se destacan áreas con precipitaciones superiores a los 4.000 milímetros anuales, que se ubican en el sur, centro y norte de la región Pacífica, así como en el departamento de Antioquia y en sectores específicos de los departamentos de Putumayo y Meta. En el Pacífico, hay zonas extremadamente lluviosas, como en el departamento del Chocó y en áreas aisladas de los departamentos del Cauca y Valle del Cauca, donde la precipitación anual supera los 7.000 milímetros. Por otro lado, la península de La Guajira registra la menor precipitación, entre 500 y 1.000 milímetros anuales, mientras que una gran extensión del territorio la precipitación oscila entre 1.000 y 3.000 milímetros anuales.

A continuación, en la **Figura 18** se presenta la representación gráfica del conjunto de datos transformado `pcp_annual_cycle`, que muestra las variaciones mensuales de la precipitación en

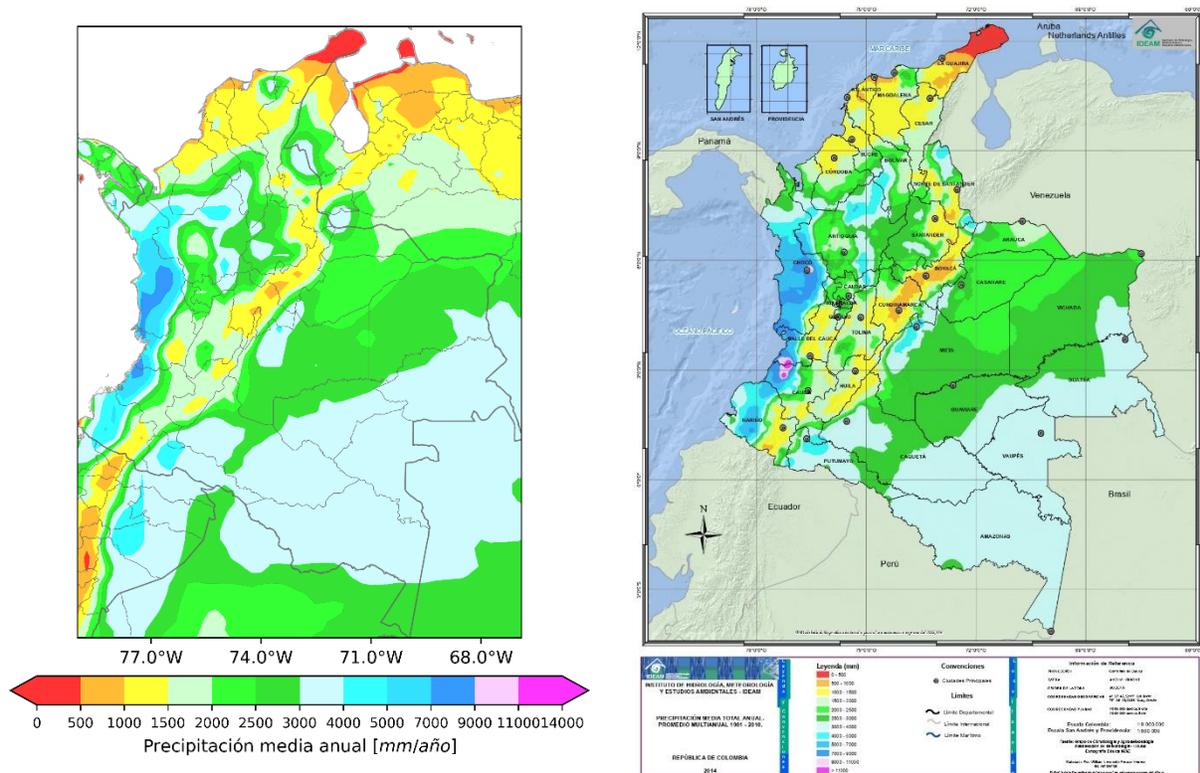
Colombia. Se observa en la Orinoquia, que las lluvias son abundantes durante la mitad del año y se presenta un único máximo pluviométrico. Por otro lado, en las regiones Andina y Pacífica, se observan dos temporadas de lluvias intensas (una de marzo a mayo y otra de septiembre a noviembre), alternadas con períodos secos, debido al movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) de sur a norte en el primer semestre y de norte a sur en el segundo (IDEAM - UNAL, 2018). En la región Caribe, se registra un máximo pluviométrico a mediados de año, seguido de una disminución leve en julio y agosto, y un incremento significativo en septiembre y octubre. Este primer máximo está relacionado con la ZCIT, mientras que el segundo se asocia con las ondas del Este y los ciclones tropicales activos durante esta época (IDEAM - UNAL, 2018).

Figura 18 Ciclo anual de la precipitación en Colombia



En la **Figura 19**, en la izquierda se muestra la precipitación promedio anual de largo plazo estimada, mientras que en la derecha se presenta el mapa de referencia emitido por el IDEAM. Al comparar visualmente ambos mapas, se observa una consistencia notable en la magnitud y variabilidad espacial de la lluvia, con diferencias mínimas en áreas específicas. Esto confirma que ambos mapas logran capturar la alta variabilidad de la lluvia, reflejando las condiciones físico-geográficas del territorio.

Figura 19 Comparación del mapa promedio anual multianual de la precipitación estimada y el mapa de referencia del IDEAM.



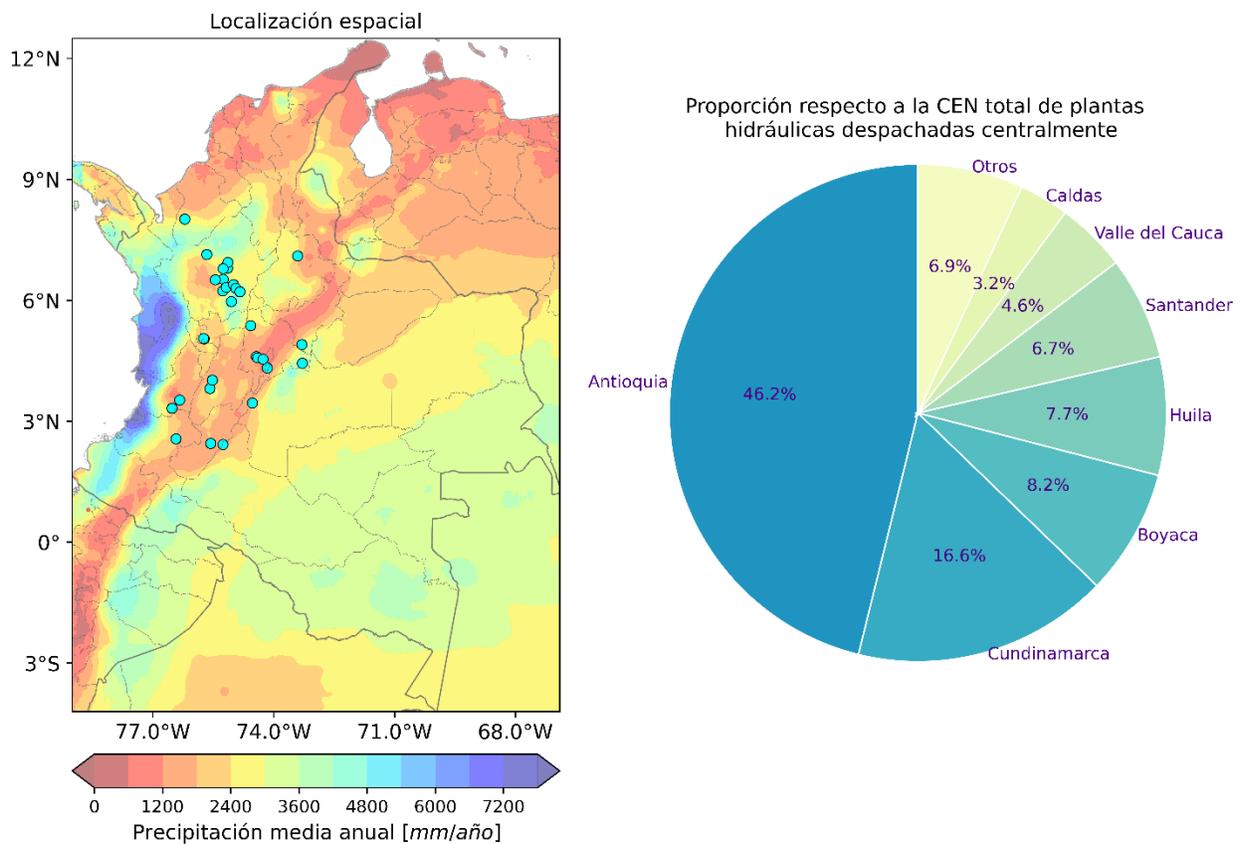
5.2 Identificar los departamentos con mayor generación solar, eólica e hidráulica

La **Figura 20** muestra la distribución espacial de las plantas hidráulicas despachadas centralmente en Colombia, destacando la concentración de Capacidad Efectiva Neta (CEN) en

varios departamentos. Antioquia lidera con una proporción significativa de CEN, representando el 46.15% del total, seguido por Cundinamarca, Boyacá y Huila. En total, estas regiones acumulan aproximadamente el 79.5% de la capacidad efectiva neta de las plantas hidráulicas en el país. La CEN total de las plantas despachadas centralmente alcanza los 12.237 MW.

Considerando los proyectos futuros, se espera un aumento de la generación hidráulica hasta alcanzar los 1.700 MW para el horizonte 2030, con 30 de los 42 proyectos planeados ubicados en Antioquia. Esta proyección sugiere un crecimiento en la capacidad hidráulica, en áreas donde ya existe una presencia significativa de infraestructura hidroeléctrica.

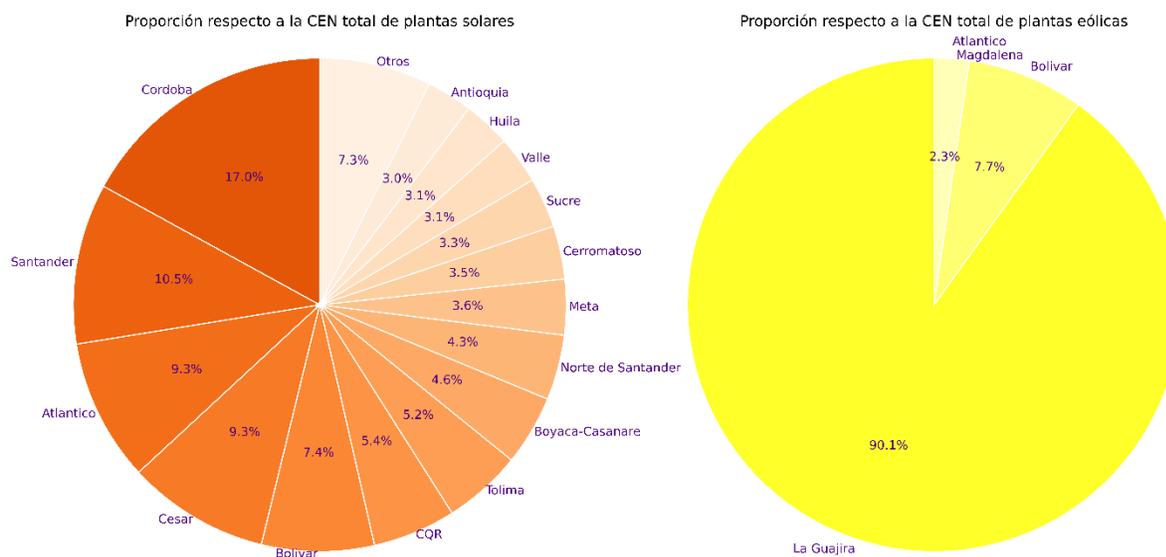
Figura 20 Distribución espacial de las plantas hidráulicas despachadas centralmente y porcentaje de capacidad efectiva neta agregada por departamento respecto a la total



La **Figura 21** presenta el análisis del porcentaje de CEN por departamento para proyectos solares y eólicos en Colombia para el horizonte 2030. Respecto a los proyectos solares, se destaca una distribución significativa de la capacidad entre varios departamentos, liderada por Córdoba con el 17% de la capacidad total, seguido de Santander, Atlántico, Cesar y Bolívar. Es importante señalar que los departamentos de Córdoba, Atlántico, Cesar y Bolívar, ubicados en la región Caribe representan el 43% de la capacidad solar, destacando un papel crucial de esta región en el panorama energético del país. Estos resultados reflejan una diversificación geográfica de la generación solar con una CEN total de 12.611 MW.

Por otro lado, en los proyectos eólicos se observa una concentración notable en La Guajira, que aporta el 90% de la capacidad total, resaltando su importancia estratégica en el desarrollo de la energía eólica en Colombia. Con una CEN total de 2.614 MW para proyectos eólicos, se vislumbra una perspectiva prometedora para la diversificación de la matriz energética nacional.

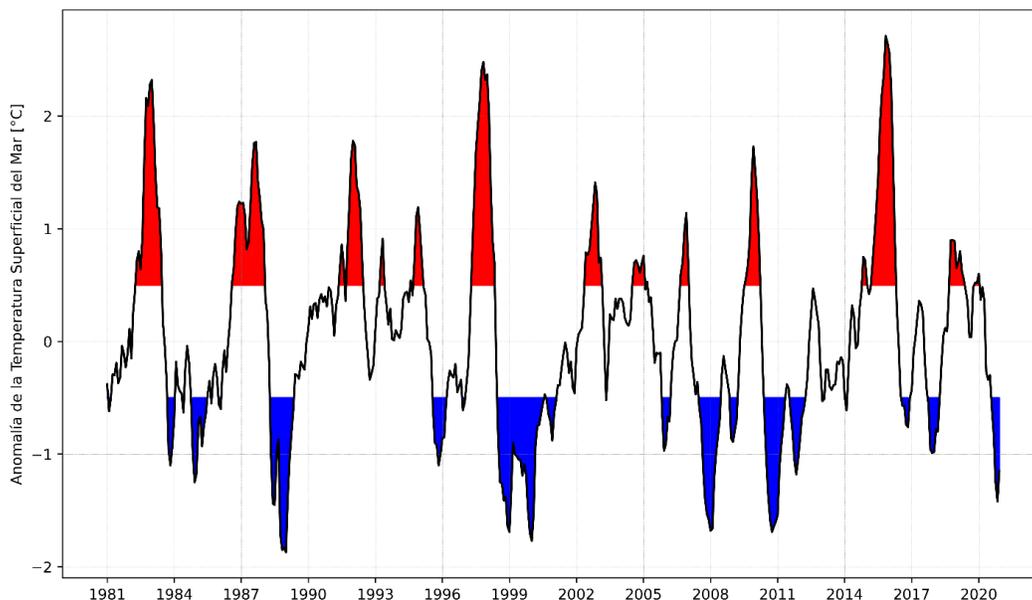
Figura 21 Porcentaje de Capacidad Efectiva Neta (CEN) por departamento para proyectos solares y eólicos en Colombia para el horizonte 2030.



5.3 Utilizar el índice ONI para analizar y agrupar las variables climáticas en las distintas fases del ENSO, centrándose particularmente en la fase cálida.

La **Figura 22** muestra la serie temporal del ONI en el periodo 1981-2020 en la cual se observa una dinámica significativa en los eventos de El Niño, La Niña y fase neutra. Los valores de anomalías de temperatura superficial del mar superiores a $0,5^{\circ}\text{C}$, resaltados en color rojo, denotan los periodos de El Niño, mientras que aquellos inferiores a $-0,5^{\circ}\text{C}$, en azul, indican los periodos de La Niña. La fase neutra se representa mediante la línea negra. Se observa que a lo largo de este periodo de tiempo se presentan suficientes periodos con las tres fases del fenómeno, lo cual brinda una base sólida para realizar un análisis robusto de los datos y entender mejor la variabilidad climática asociada a estos eventos.

Figura 22 Serie temporal del Índice Oceánico de El Niño (ONI) en el periodo 1981-2020

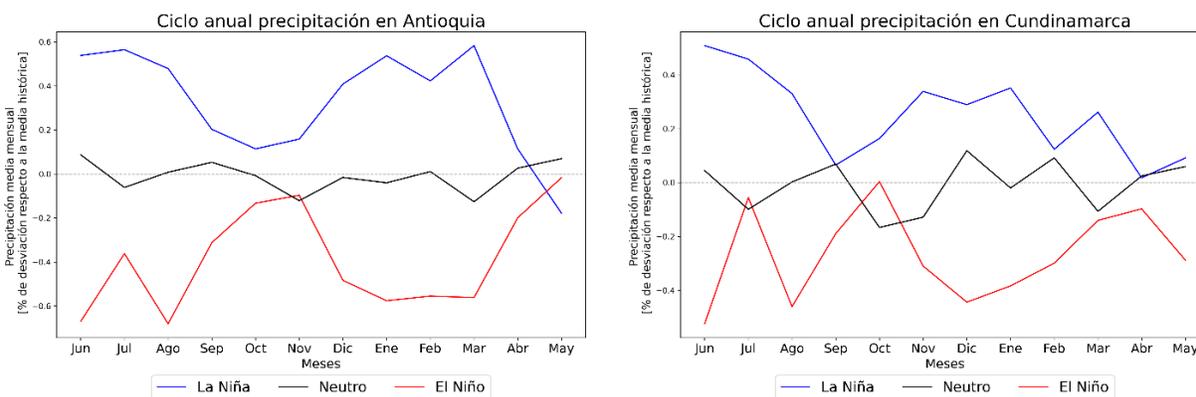


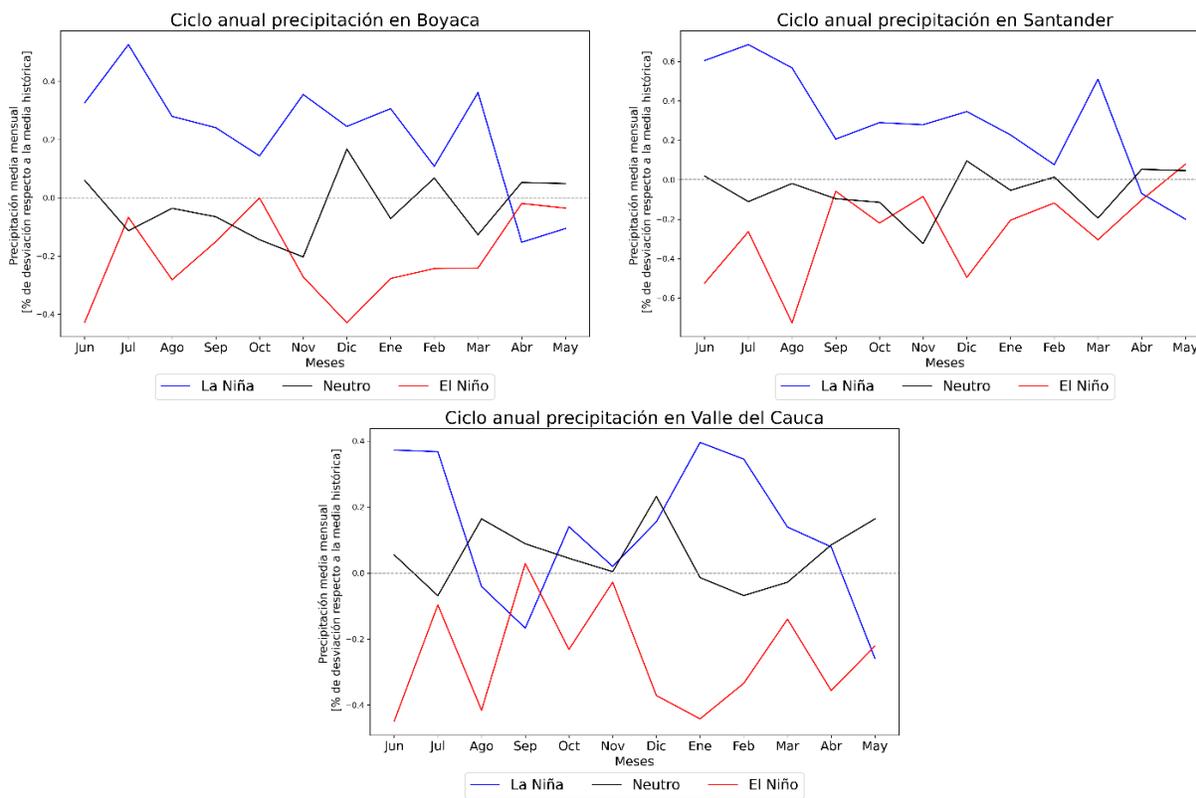
En términos generales, el ENSO ha sido ampliamente explorado en el territorio colombiano y se han identificado patrones de respuesta de la precipitación de diferentes regiones del país frente a sus diferentes fases. Estudios previos (IDEAM-DPAD, 2002; Poveda, 2004; Pabón & Torres, 2006; Montealegre, 2009; Guzmán et al., 2014; Montealegre, 2014) han demostrado que el primer y último trimestre del año son los más marcados por la influencia de estos eventos y que durante episodios de El Niño se registra un déficit de precipitaciones en las regiones Caribe, Andina central y norte del Pacífico, así como en la Orinoquía y la Amazonía, con excepción de los piedemontes amazónico y llanero, donde pueden presentarse excesos de precipitación. Por otro lado, durante La

Niña, la tendencia es inversa, con abundantes precipitaciones en la mayor parte del país, excepto en los piedemontes (IDEAM - UNAL, 2018).

En la **Figura 23** se muestra el ciclo anual estandarizado de la precipitación para cada fase del ENSO en los 5 departamentos con mayor generación hidráulica del país. El ciclo anual se presenta de junio a mayo, considerando el año hidrológico en Colombia, que comienza el 1° de junio del año i y terminando el 31 de mayo del año siguiente $i+1$, este enfoque temporal se justifica por la dinámica del ENSO y su relación con el ciclo anual de la hidrología de Colombia (Poveda & Álvarez, 2012). Los resultados corroboran estudios previos, evidenciando que durante el primer y último trimestre del año existe una marcada diferencia entre las líneas roja y azul, correspondientes a El Niño y La Niña, respectivamente. Además, durante El Niño se observa un déficit de precipitaciones en la región Andina central (Antioquia, Cundinamarca, Boyacá y Santander) y en el norte del Pacífico (Valle del Cauca) y durante La Niña un exceso de precipitaciones.

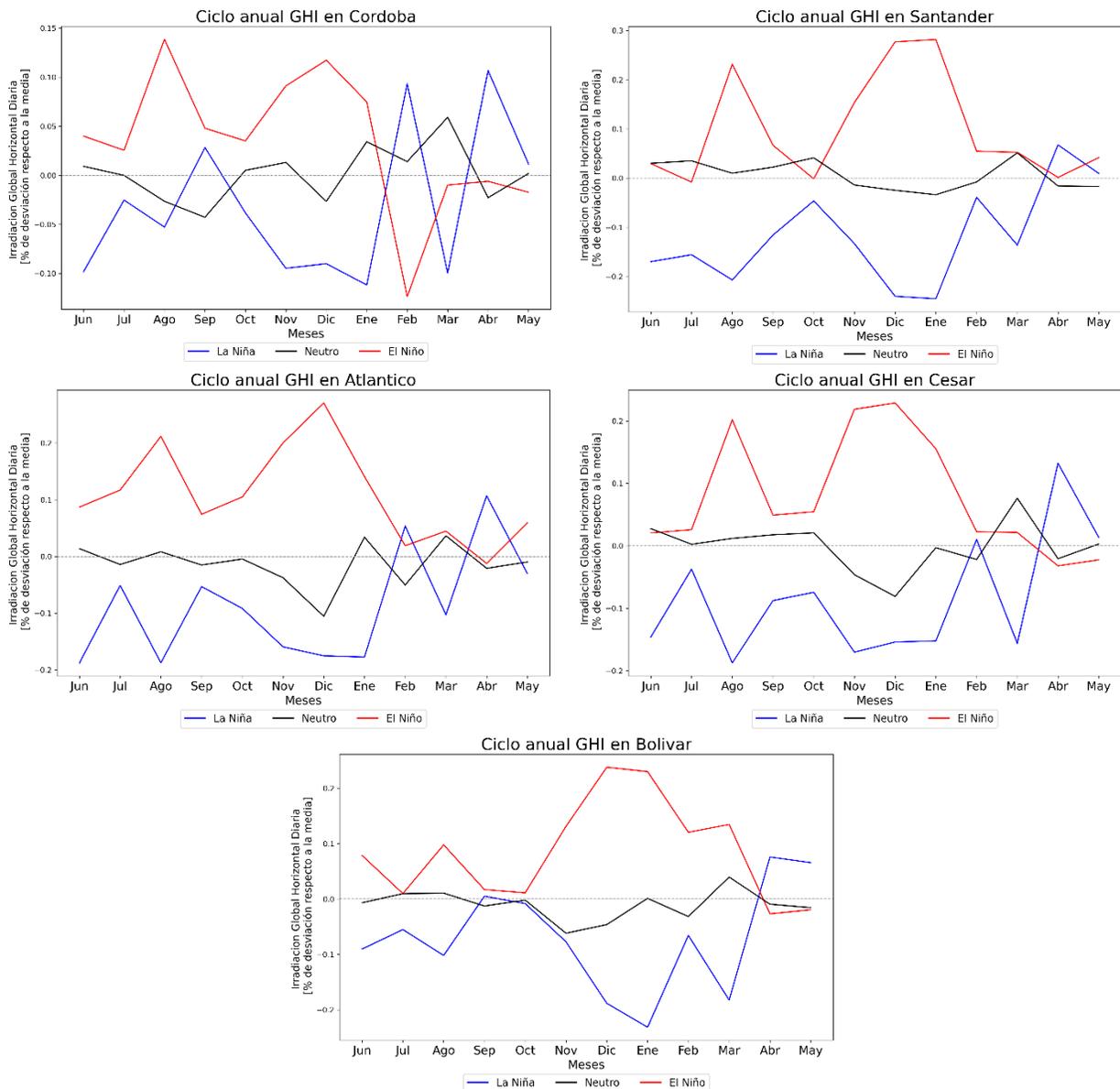
Figura 23 Ciclo anual estandarizado de la precipitación para cada fase del ENSO





En la **Figura 24** se muestra el ciclo anual estandarizado de la GHI para cada fase del ENSO en los 5 departamentos con mayor potencial de generación solar en el país. A diferencia de la precipitación, la investigación sobre la radiación y la velocidad del viento en relación con las diferentes fases del ENSO es limitada, lo que convierte este estudio en un área novedosa de investigación. No obstante, existe una hipótesis relacionada con la nubosidad que sugiere que durante los episodios de El Niño se espera una mayor radiación incidente debido a que los cielos del país tienden a estar más despejados. Si bien esta hipótesis fue parcialmente confirmada, se observaron algunas discrepancias. En los cuatro departamentos de la región caribe analizados, se evidenció el comportamiento esperado; sin embargo, durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo, el comportamiento fue contrario o muy similar tanto en El Niño como en La Niña.

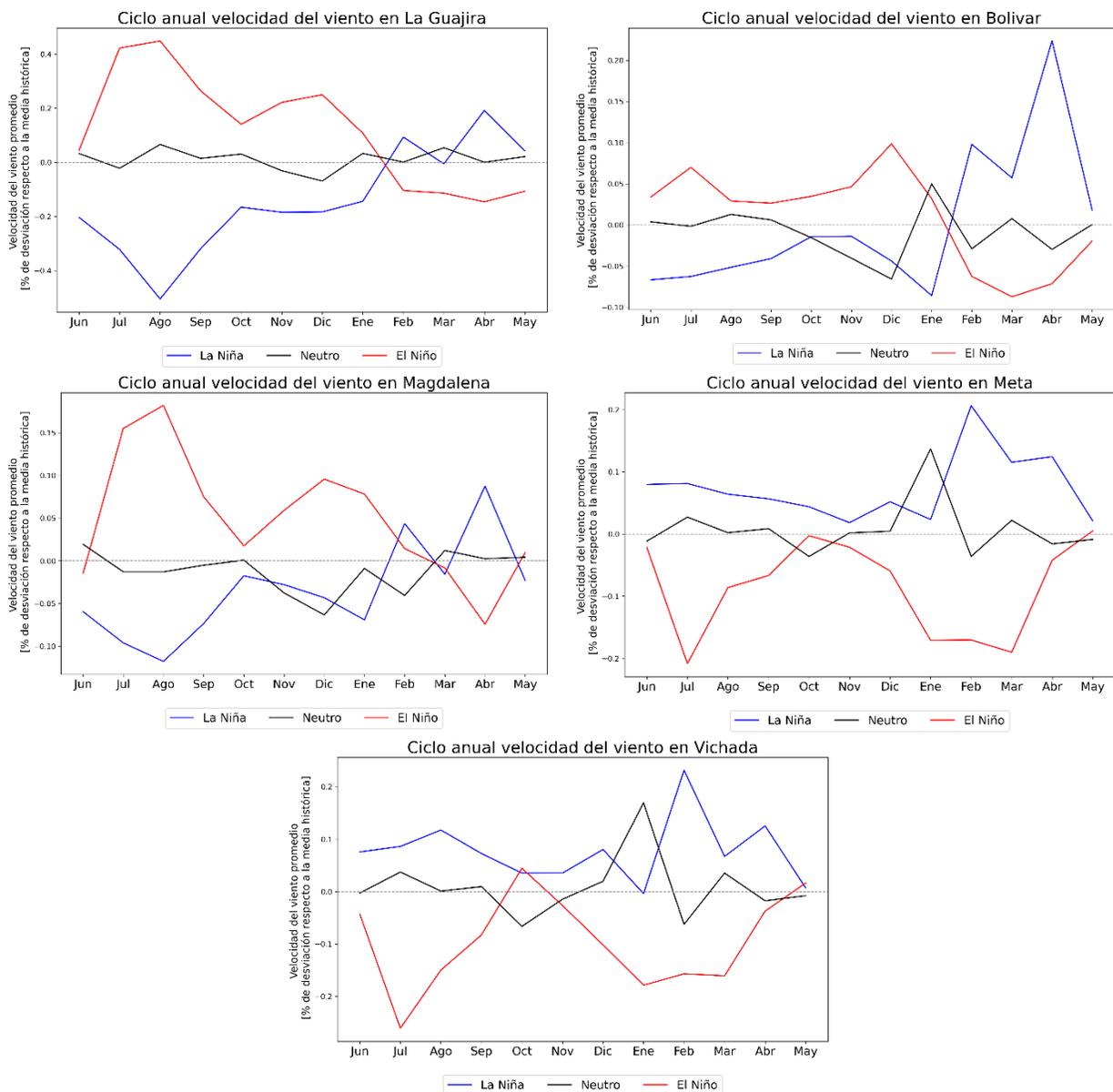
Figura 24 Ciclo anual estandarizado de la GHI para cada fase del ENSO



En la **Figura 25** se muestra el ciclo anual estandarizado de la velocidad del viento para cada fase del ENSO en los 5 departamentos con mayor potencial de generación eólica en el país. A pesar de la noción generalizada sobre el debilitamiento de los vientos alisios en el centro-oeste de la cuenca del océano Pacífico tropical durante los episodios de El Niño, un estudio del IDEAM (IDEAM-METEO, 2019), indica que no se observa un debilitamiento de las magnitudes del viento en la zona continental de Colombia en los niveles más superficiales de la atmósfera.

Por el contrario, se identificó en los tres departamentos de la región Caribe una anomalía positiva de los vientos durante los episodios de El Niño, en la mayoría de los meses del año, exceptuando febrero, marzo, abril y mayo, mientras que en los departamentos de la Orinoquia se manifestó un comportamiento opuesto, donde las anomalías positivas corresponden a los episodios de La Niña. Por lo tanto, no hay un comportamiento generalizado a lo largo del país que predomine en las magnitudes de la velocidad del viento durante los eventos del ENSO.

Figura 25 Ciclos anual estandarizado de la velocidad del viento para cada fase del ENSO



5.4 Análisis de correlación multivariada entre las series mensuales en periodos El Niño de los RECURSOS de generación

La **Figura 26** presenta la matriz de correlación entre las series medias mensuales en episodios El Niño de precipitación y radiación solar en pares específicos de departamentos con alto potencial para la generación de energía renovable. Cada celda de la matriz contiene un coeficiente de correlación de Spearman, que indica la fuerza y dirección de la relación entre la precipitación y la radiación solar en cada par de departamentos.

Las correlaciones negativas reflejan una relación inversa entre las variables, si una variable aumenta, la otra disminuye y viceversa. Una correlación negativa alta, con coeficientes entre -0,7 y -1,0 indica una asociación fuerte y consistente en la dirección opuesta entre las variables. En contraste, una correlación negativa media, entre -0,4 y -0,7, muestra una asociación moderada entre variables, mientras que una correlación negativa baja, de -0,0 a -0,4, indica una relación débil o insignificante.

Figura 26 Matriz de correlación entre los recursos de generación solar e hidráulica, en los respectivos departamentos de mayor generación.



En la matriz se observa una tendencia hacia correlaciones negativas entre el recurso de generación hidroeléctrica en ciertos departamentos y el recurso de generación solar en otros. Esto sugiere la existencia de una complementariedad entre los recursos energéticos en diferentes regiones, revelando una relación inversa entre la precipitación y la radiación solar.

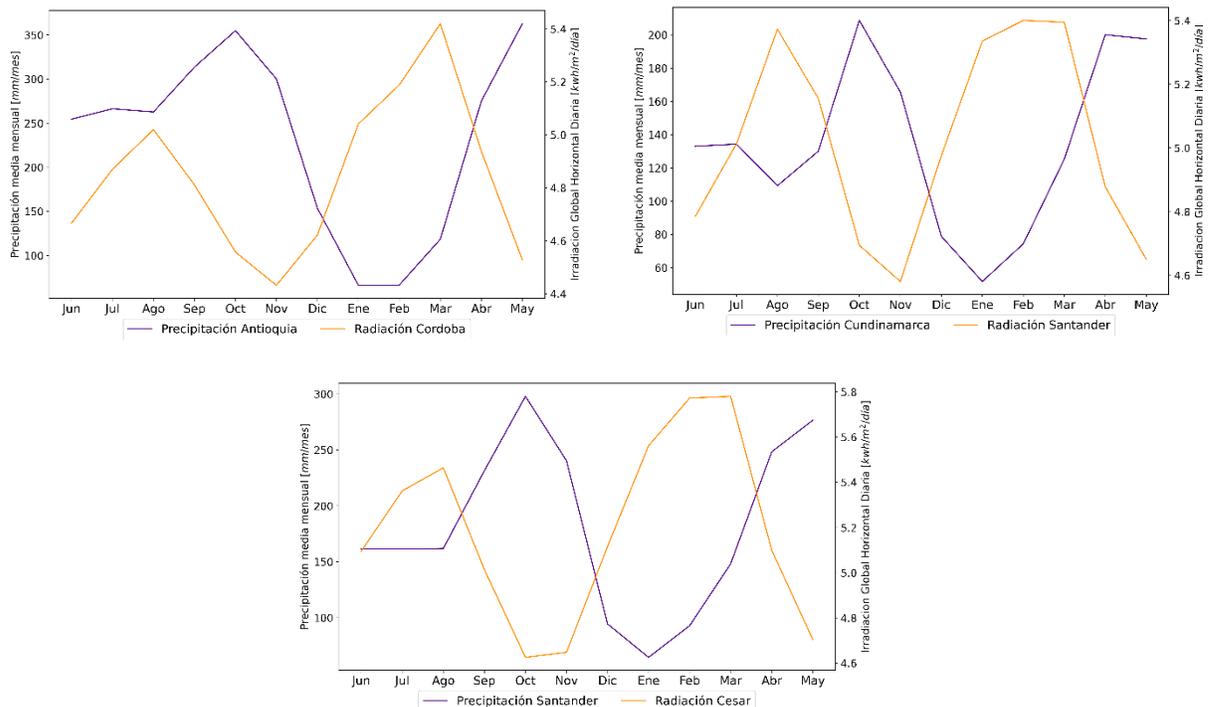
En el primer cuadrante de la **Figura 26**, marcado en rojo, se destacan principalmente correlaciones de intensidad alta a moderada en casi todas las combinaciones. Sin embargo, se observa una excepción en el recurso hídrico del Huila, donde se evidencian correlaciones más débiles con el recurso solar de tres de los cinco departamentos con los que se correlacionó.

Se observa una fuerte correlación entre el recurso hídrico de los departamentos de Antioquia y Valle del Cauca y el recurso solar en la región Caribe. Para el horizonte 2030, se planea

instalar más de 5.500 MW en plantas solares en la región Caribe, lo que sugiere una alta complementariedad entre estos recursos. Por otro lado, en el departamento de Santander, donde se proyecta la instalación de 1.300 MW en plantas solares, se observa una correlación moderada a alta entre su recurso solar y el recurso hídrico de los departamentos analizados.

En la **Figura 27**, se presenta el ciclo anual de los recursos de generación hidráulica y solar para episodios El Niño, esto con el propósito de destacar la complementariedad entre estos recursos de generación a lo largo del año. Se identifica un patrón bimodal en ambas variables, acompañado de una asociación negativa, donde la disminución de un recurso se relaciona con el aumento del otro. Se muestran los ciclos anuales de precipitación en Antioquia y radiación en Córdoba, con una correlación estimada en la matriz de correlación de 0,65 (ver **Figura 26**). La precipitación en Cundinamarca y la radiación en Santander, con una correlación de 0,63 y se destaca una correlación alta de 0,70 entre la precipitación en Santander y la radiación en Cesar (ver **Figura 26**).

Figura 27 Ciclo anual de los recursos de generación hidráulica y solar para episodios El Niño



La **Figura 28** presenta la matriz de correlación entre las series medias mensuales en episodios El Niño de precipitación y velocidad del viento en pares específicos de departamentos con alto potencial para la generación de energía renovable.

Figura 28 Matriz de correlación entre los recursos de generación eólica e hidráulica en episodios El Niño, en los respectivos departamentos de mayor generación.



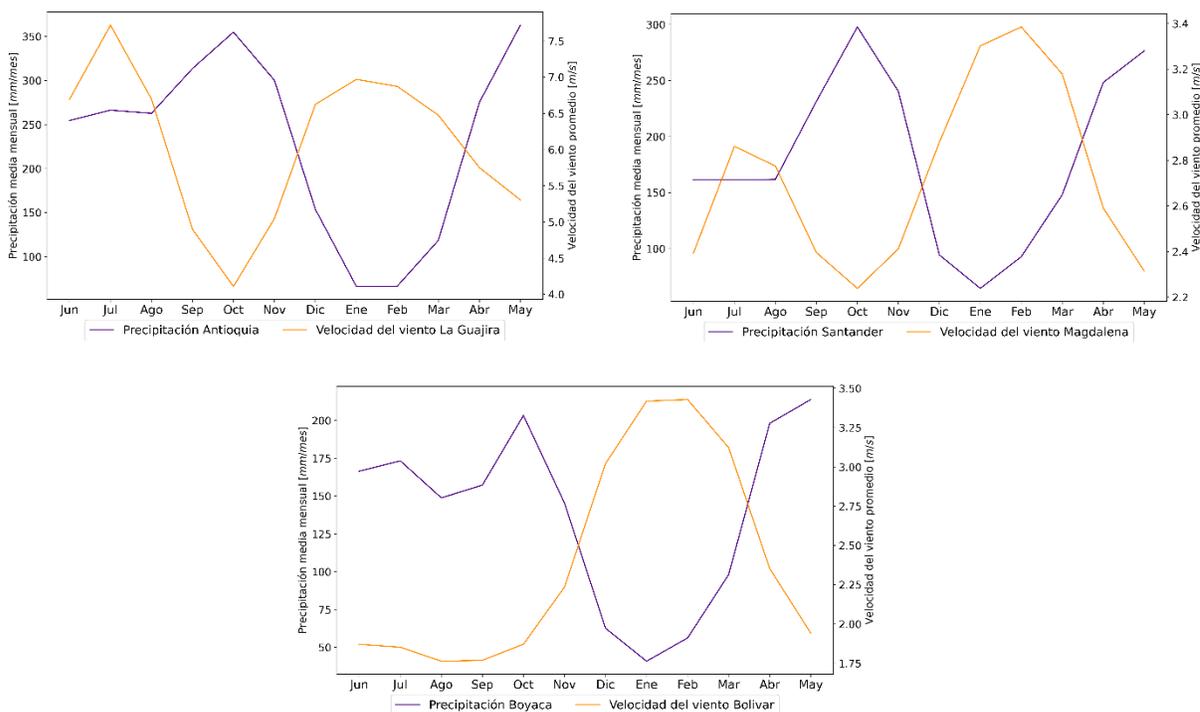
En términos generales, la matriz se observa una tendencia hacia correlaciones negativas entre el potencial de generación hidroeléctrica en ciertos departamentos y el potencial de generación eólica en otros. Dentro del primer cuadrante, resaltado en rojo, predominan principalmente correlaciones de intensidad alta a moderada en la mayoría de las combinaciones de departamentos. Sin embargo, se observa una excepción en las correlaciones entre el recurso hídrico del departamento de Huila y el recurso solar de los cinco departamentos del cuadrante.

Además, el recurso eólico en el departamento de La Guajira no presenta correlaciones altas con el recurso hídrico de los departamentos analizados. Mientras que el recurso hídrico en Antioquia

exhibe una alta complementariedad con el recurso eólico de los otros tres departamentos, donde se prevé el desarrollo de proyectos eólicos.

En la **Figura 29**, se presenta el ciclo anual de los recursos de generación hidráulica y eólica durante episodios de El Niño, con el objetivo de resaltar la complementariedad entre estos recursos a lo largo del año. Se observa un patrón bimodal claro en ambas variables, junto con una asociación negativa donde la disminución de un recurso se asocia con el aumento del otro. Esta complementariedad es especialmente notable durante los trimestres de septiembre a noviembre y de enero a marzo. Se muestran los ciclos anuales de precipitación en Antioquia y la velocidad del viento en La Guajira, con una correlación moderada estimada en la matriz de correlación de 0,57 (ver **Figura 28**). Además, se registran correlaciones cercanas a niveles altos, alrededor de 0,65, entre la precipitación en Santander y la velocidad del viento en Magdalena, así como entre la precipitación en Boyacá y la velocidad del viento en Bolívar (ver **Figura 28**).

Figura 29 Ciclo anual de los recursos de generación hidráulica y eólica durante episodios de El Niño

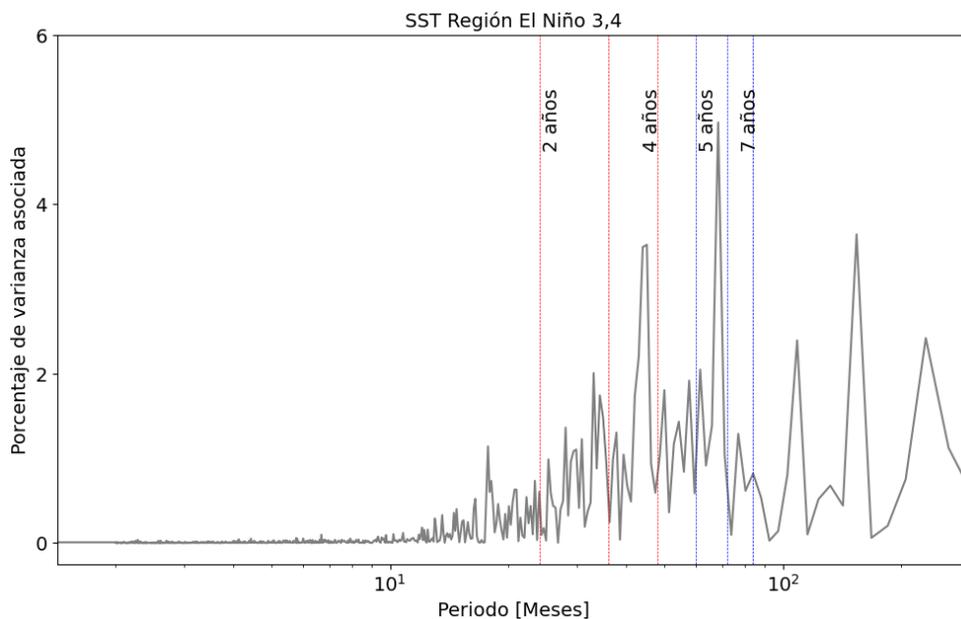


5.5 Aplicar el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas para identificar los principales modos de variabilidad de los RECURSOS de generación

A nivel regional, El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) es el principal mecanismo de modulación de la variabilidad climática en Colombia. Este fenómeno climático, en su fase cálida (El Niño) ocurre típicamente entre tres y cuatro años y en su fase fría (La Niña) ocurre típicamente entre seis y ocho años (Arango-Ruda & Poveda, 2018; Muñoz, Poveda, Arbeláez, & Vélez, 2021). Otros autores proponen que el intervalo total de ocurrencia del ENSO oscila entre 2.5 – 8 años, y que los eventos El Niño tienden a ocurrir más frecuentemente que los eventos La Niña (CAPOTONDI, 2020).

En la **Figura 30** se muestra el periodograma o espectro de Fourier de la serie de anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4, esta figura permite ver las frecuencias de los datos. Dicho de otro modo, muestra las recurrencias o ciclicidades que se presentan en la serie de tiempo, estableciendo los periodos u oscilaciones más características para una determinada señal. Los espectros presentan en el eje de las abscisas las frecuencias y en el eje de las ordenadas los coeficientes de Fourier al cuadrado de la función seno.

Figura 30 Espectro de potencias mediante la Transformada de Fourier de la serie de anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4

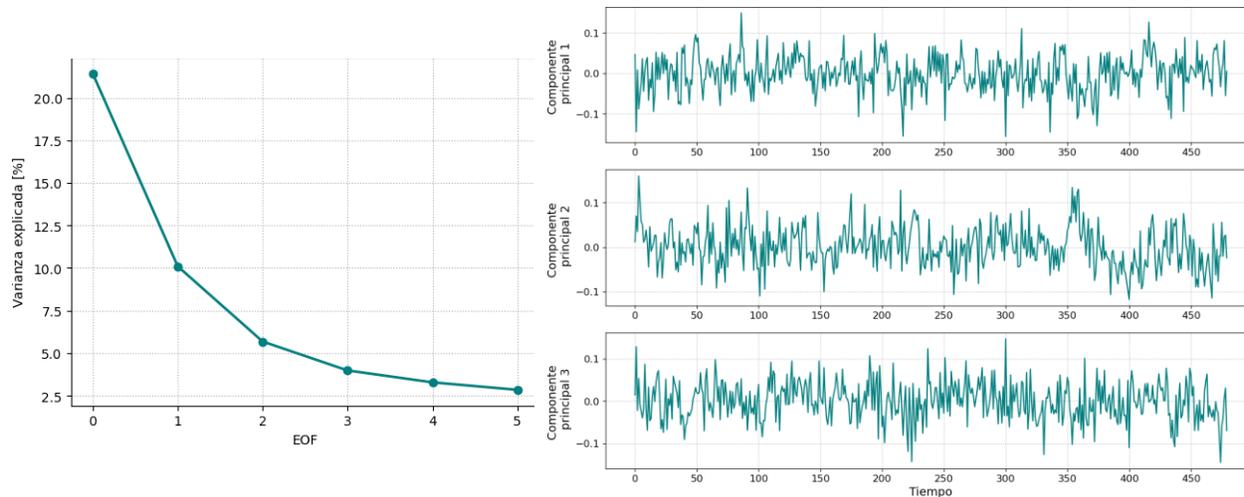


En la **Figura 30** se observan picos que corresponden a períodos u oscilaciones características, destacándose porcentajes mayores de varianza asociada entre 2 y 4 años, periodo que puede asociarse a eventos de la fase cálida del ENSO, y otro importante intervalo asociado a los períodos entre 5 y 7 años, que podría relacionarse con eventos de la fase fría del ENSO. Estas interpretaciones se basan en resultados de otros estudios citados anteriormente que respaldan la periodicidad de estos fenómenos.

Tras identificar los periodos de oscilación predominantes en la serie de anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 asociadas a las fases del ENSO, se llevó a cabo una estimación preliminar de los valores y vectores propios de la matriz de covarianza del conjunto de datos de precipitación cruda. Los valores propios derivados proporcionan una medida del porcentaje de variación explicada por cada Función Ortogonal Empírica (EOF), o patrón de oscilación, de la precipitación. Se determinó que más del 90% de la variabilidad estaba asociada al primer EOF, el cual correspondía al patrón de oscilación del ciclo anual. Por consiguiente, se procedió a eliminar el ciclo anual y a reestimar las funciones ortogonales empíricas para la precipitación sin este ciclo, con el objetivo de identificar los demás patrones de oscilación interanual que contribuyen significativamente a la variabilidad de la precipitación.

A continuación, en la **Figura 31** se presenta el porcentaje de varianza asociado a los primeros seis modos de oscilación del conjunto de datos de precipitación, con el ciclo anual eliminado y las componentes principales que son las series temporales de cada modo y son una medida de la amplitud de la variabilidad de los modos de oscilación. Se analizarán únicamente los componentes principales y los modos de oscilación que exhiben un porcentaje de varianza asociada superior al 5%. Estos corresponden a los tres primeros modos, con porcentajes de 21%, 10% y 6% respectivamente. Los modos restantes no serán considerados en los análisis posteriores.

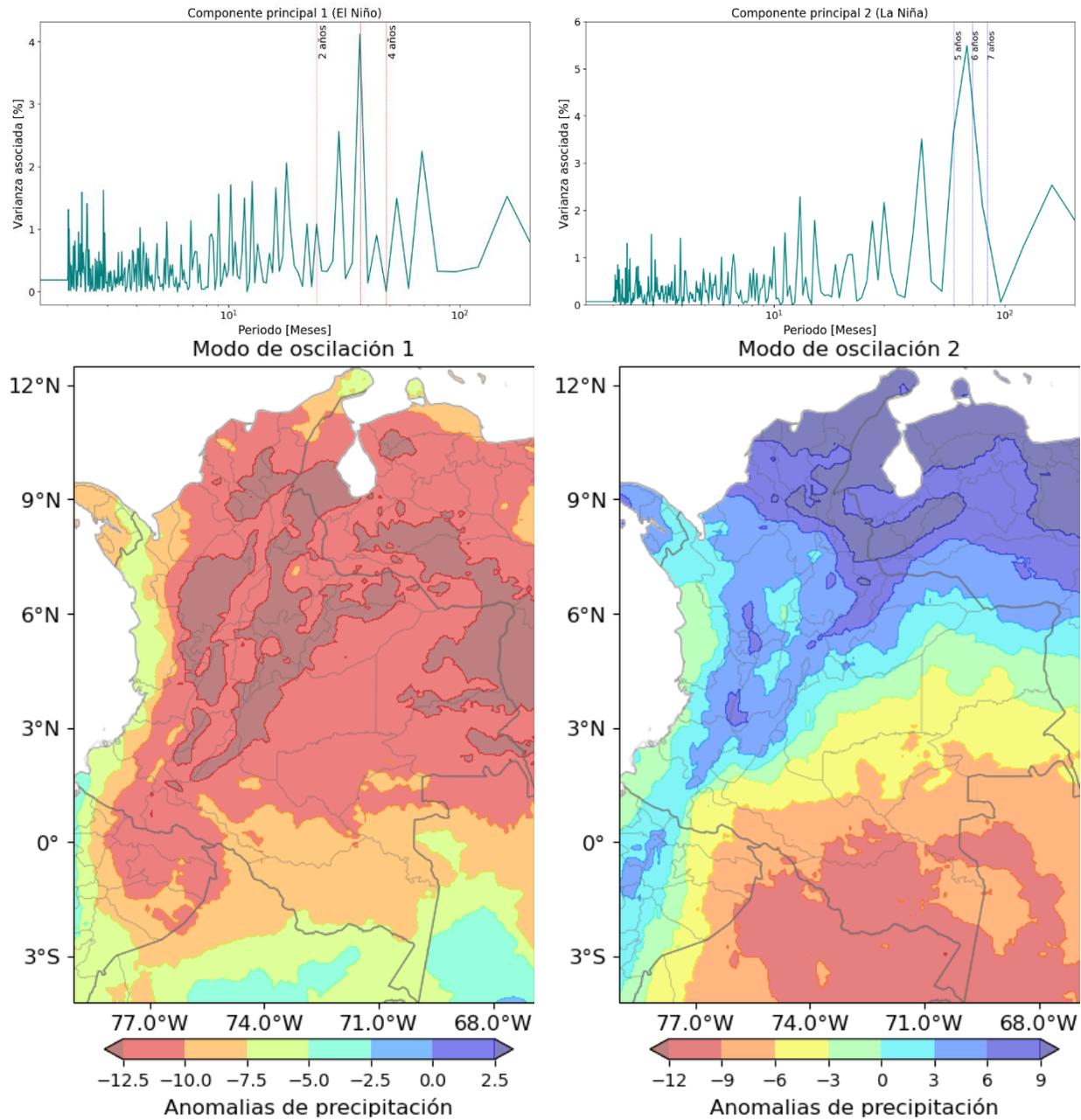
Figura 31 Varianza explicada y componentes principales obtenidas del análisis de EOF a la precipitación estandarizada en Colombia.



Para identificar las frecuencias que contribuyen de manera significativa a las series temporales asociadas a cada modo de oscilación, se calcularon los espectros de Fourier para las tres primeras componentes principales. En la **Figura 32** se presentan estos espectros junto con las frecuencias predominantes en cada una de las componentes analizadas. Se observa que la primera componente principal (CP1) exhibe porcentajes más altos de varianza asociada en el rango de 2 a 4 años, lo que sugiere una influencia del fenómeno El Niño. Por otro lado, la segunda componente principal (CP2) muestra porcentajes mayores de varianza asociada en el intervalo de 5 a 7 años, indicativo de una influencia de La Niña.

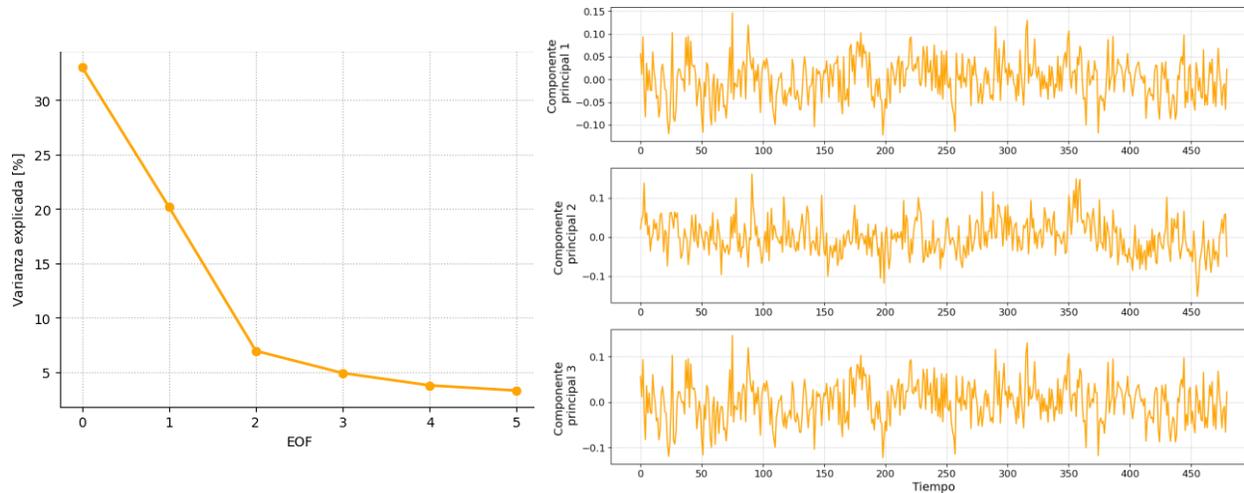
Además de los espectros de Fourier, en esta misma figura se presentan los modos de oscilación correspondientes a estas dos componentes principales. Estos modos son patrones espaciales que describen la variabilidad de los datos a lo largo de diferentes dimensiones. En el modo 1, se observa un patrón espacial generalizado de anomalías negativas en todo el país, lo que coincide con la disminución considerable de las precipitaciones durante la fase de El Niño. Por otro lado, en el modo 2, asociado a La Niña, se observan principalmente anomalías positivas de la precipitación en las regiones Caribe y Andina, mientras que en otras regiones no se observan estas anomalías, lo que sugiere que La Niña puede tener una influencia menos pronunciada en estas áreas.

Figura 32 Espectros de potencia de las componentes principales 1 y 2 de la precipitación estandarizada y sus respectivos modos de oscilación



Al igual que en el caso de la precipitación, la **Figura 33** presenta el porcentaje de varianza asociado a los primeros seis modos de oscilación del conjunto de datos de radiación solar, después de eliminar el ciclo anual y las tres componentes principales con porcentajes de varianza asociada mayores a 5%, con valores de 33%, 20% y 7%, respectivamente.

Figura 33 Varianza explicada y componentes principales obtenidas del análisis de EOF a la radiación solar estandarizada en Colombia



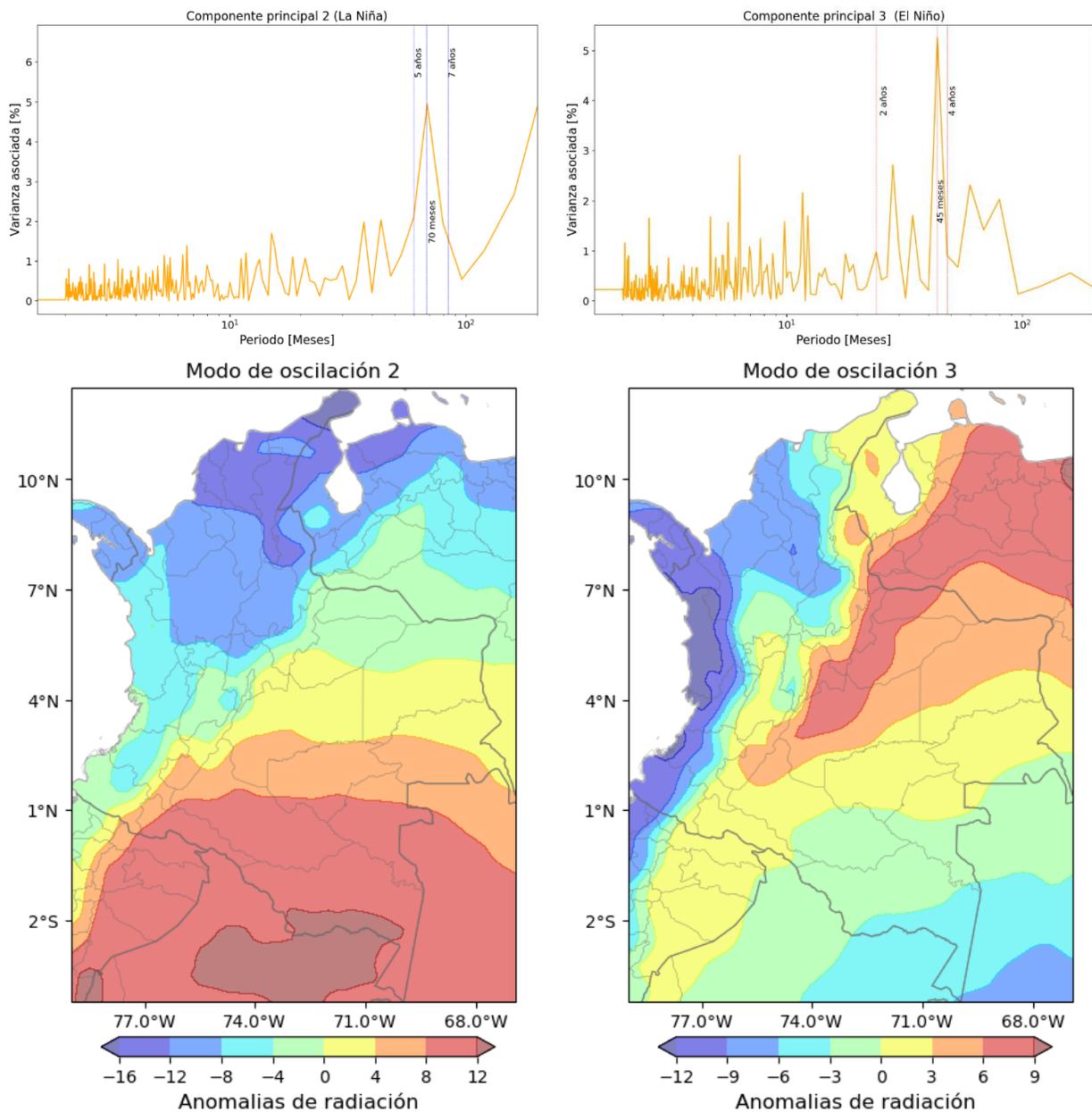
En la **Figura 34** se presentan los espectros de Fourier para las tres primeras componentes principales de la radiación solar junto con las frecuencias predominantes en cada una. Se destaca que la segunda componente principal (CP2) exhibe porcentajes más altos de varianza asociada en el rango de 5 a 7 años, lo que sugiere una influencia del fenómeno de La Niña. Por otro lado, la tercera componente principal (CP3) muestra porcentajes mayores de varianza asociada en el intervalo de 2 a 4 años, indicativo de una influencia de El Niño.

Además de los espectros de Fourier, se presentan los modos de oscilación correspondientes a la CP2 y CP3. Estos modos son patrones espaciales que describen la variabilidad de los datos a lo largo de diferentes dimensiones. En el modo 2, se observa un patrón espacial de anomalías negativas de radiación en norte del país y en el sur de la región Pacífica, mientras que en el sureste del país se evidencian anomalías positivas de radiación. Este comportamiento puede indicar que durante episodios de La Niña, se produce una reducción significativa de la radiación incidente, principalmente en el norte del país.

Por otro lado, en el modo de oscilación 3, asociado a El Niño, se observan principalmente anomalías positivas, es decir mayor radiación incidente en casi todo el país, exceptuando la región

Pacífica y los departamentos de Córdoba, Bolívar, Atlántico, Sucre siendo estos últimos relevantes en el potencial de generación solar proyectado para el 2030.

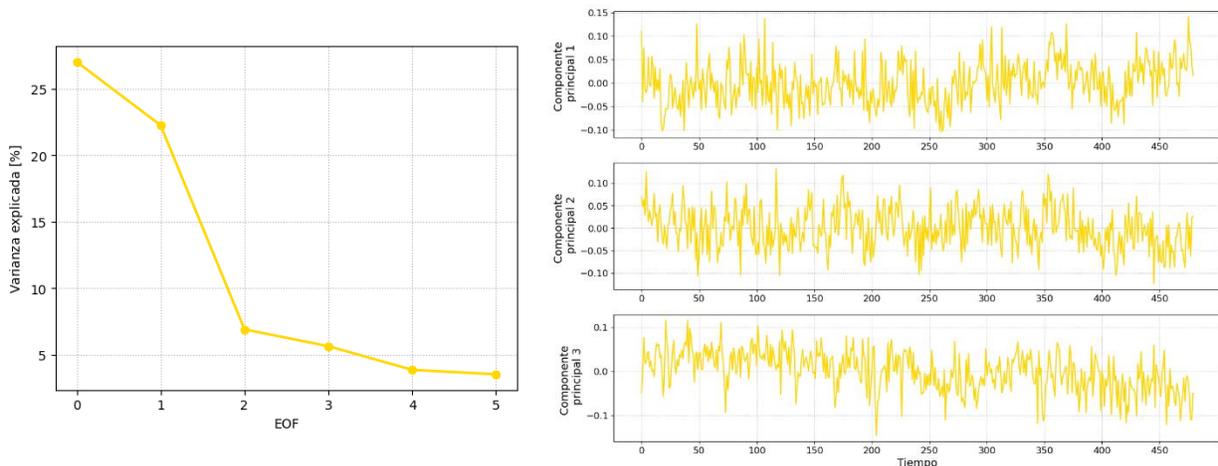
Figura 34 Espectros de potencia de las componentes principales 1 y 2 de la radiación solar estandarizada y sus respectivos modos de oscilación



La **Figura 35** presenta el porcentaje de varianza asociado a los primeros seis modos de oscilación del conjunto de datos de velocidad del viento, después de eliminar el ciclo anual y las

tres componentes principales con porcentajes de varianza asociada mayores a 5%, con valores de 27%, 22% y 7%, respectivamente.

Figura 35 Varianza explicada y componentes principales obtenidas del análisis de EOF a la velocidad del viento estandarizada en Colombia



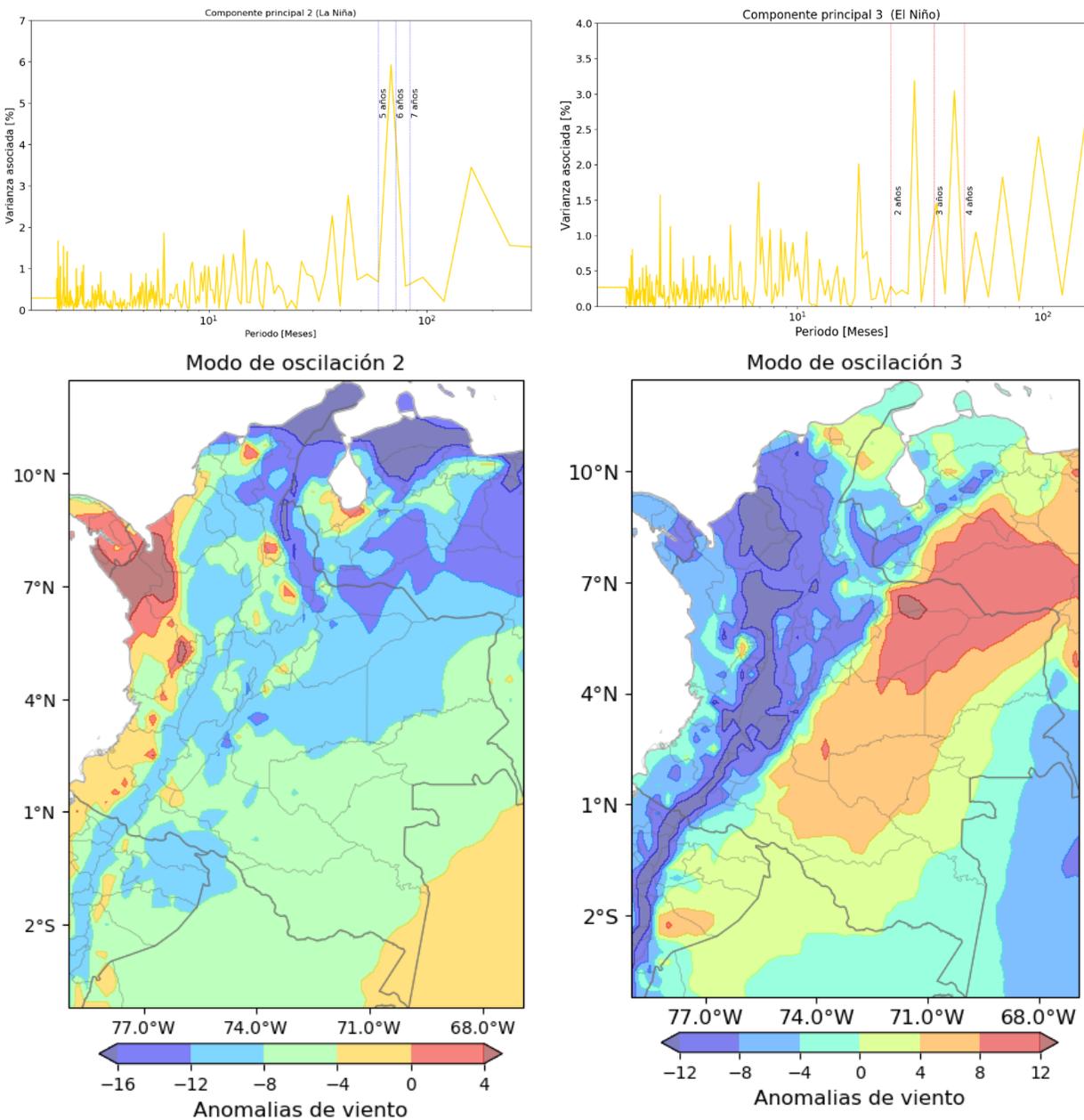
En la **Figura 36** se presentan los espectros de Fourier para dos de las componentes principales de la velocidad del viento junto con las frecuencias predominantes en cada una. Se destaca que la segunda componente principal (CP2) exhibe porcentajes más altos de varianza asociada en el rango de 5 a 7 años, lo que sugiere una influencia del fenómeno La Niña. Por otro lado, la tercera componente principal (CP3) muestra porcentajes mayores de varianza asociada en el intervalo de 2 a 4 años, indicativo de una influencia de El Niño.

Además de los espectros de Fourier, se presentan los modos de oscilación correspondientes a la CP2 y CP3. Estos modos son patrones espaciales que describen la variabilidad de los datos a lo largo de diferentes dimensiones. En el modo 2, se observa un patrón espacial generalizado de anomalías negativas de la velocidad del viento en todo el país, exceptuando el norte del departamento del Chocó y especialmente intensas en el norte del departamento de La Guajira, el de mayor potencial eólico según las proyecciones.

En el modo de oscilación 3, asociado a El Niño, se observa un patrón anomalías dividido geográficamente por la cordillera oriental. donde las anomalías negativas del recurso eólico se

presentan al noroeste de la cordillera y las positivas al sureste de la misma. Es decir, durante La Niña se presenta una disminución en las magnitudes de la velocidad del viento de la cordillera hacia arriba y un aumento de la cordillera hacia abajo.

Figura 36 Espectros de potencia de las componentes principales 1 y 2 de la velocidad del viento estandarizada y sus respectivos modos de oscilación



6. Conclusiones

La distribución de la radiación solar en Colombia destaca la importancia estratégica de la región Caribe, la extensa zona de la Orinoquia y los valles interandinos, donde se registra la mayor intensidad de radiación. Esta evaluación revela una consistencia notable entre los datos obtenidos y los mapas de referencia del IDEAM, respaldando así la fiabilidad de las fuentes de información utilizadas. En cuanto a la velocidad del viento, se observa que las áreas con velocidades superiores a 5 m/s se encuentran a lo largo del litoral de los departamentos de Bolívar, Atlántico y Magdalena, así como en el norte de La Guajira, donde se alcanzan velocidades promedio de 10 m/s. Por otro lado, en las regiones Andina, Pacífica y Amazónica, las velocidades son más bajas. Aunque existen algunas discrepancias entre los mapas estimados y los de referencia, ambos reflejan la distribución esperada del viento en Colombia.

La distribución de la precipitación resalta áreas con altos niveles pluviométricos en el sur, centro y norte de la región Pacífica, así como en algunas zonas de Antioquia, Putumayo y Meta. Por el contrario, La Guajira presenta las menores cantidades de precipitación. Los mapas comparados reflejan de manera precisa la variabilidad y la magnitud de la precipitación en el país. Estos hallazgos de la caracterización de los recursos proporcionan una visión detallada de la distribución y comportamiento de la radiación solar, la velocidad del viento y la precipitación en Colombia. Este conocimiento contribuye significativamente a comprender los recursos naturales disponibles para la generación de energía renovable en el país.

La distribución geográfica de la Capacidad Efectiva Neta (CEN) de las plantas hidroeléctricas en Colombia, evidenciada en la **Figura 20**, destaca la preeminencia de Antioquia, seguida de Cundinamarca, Boyacá y Huila, que en conjunto representan casi el 80% de la capacidad hidroeléctrica del país. Además, se proyecta un aumento significativo en la capacidad hidroeléctrica para el año 2030, principalmente en Antioquia, lo que sugiere un crecimiento continuo en áreas ya consolidadas en este tipo de infraestructura.

En relación con los proyectos futuros de energía solar y eólica, la **Figura 21** revela una distribución diversa de la capacidad efectiva neta por departamento. En el caso de la energía solar,

se destaca la importancia de departamentos como Córdoba, Santander, Atlántico, Cesar y Bolívar, que en conjunto representan una parte significativa de la capacidad total solar. Por otro lado, la energía eólica se concentra mayormente en La Guajira, consolidando su papel estratégico en este ámbito. Estos hallazgos sugieren un panorama prometedor para la diversificación de la matriz energética nacional, con un enfoque en la expansión de fuentes renovables en diferentes regiones del país.

Se ratificó lo documentado en investigaciones anteriores que han evidenciado la influencia del ENSO en la precipitación, especialmente durante el primer y último trimestre del año. Durante los eventos de El Niño se registran déficits de precipitación, mientras que durante La Niña se observan excesos en varias regiones del país, que quedan claramente representadas en el ciclo anual estandarizado de la precipitación para cada fase del ENSO, como se ilustra en la **Figura 23**, la cual presenta estas diferencias en los 5 departamentos con mayor generación hidroeléctrica.

Aunque se esperaba un debilitamiento de los vientos durante los episodios de El Niño, no se observa un patrón generalizado en toda Colombia. Los resultados muestran una anomalía positiva de los vientos durante El Niño en la región Caribe y una anomalía positiva durante La Niña en la región Orinoquía. Estos hallazgos sugieren que los efectos del ENSO en la velocidad del viento son más complejos y varían según la región geográfica. En resumen, este análisis permite comprender mejor cómo el ENSO afecta las variables climáticas clave en Colombia, lo que contribuye a una mejor planificación y gestión de los recursos energéticos renovables en el país.

El análisis de correlación multivariada durante episodios de El Niño entre la radiación solar, la velocidad del viento y la precipitación en departamentos con alto potencial para generación de energía revela una tendencia hacia correlaciones negativas, sugiriendo una complementariedad entre estos recursos en diferentes regiones. Donde la disminución de un recurso se asocia con el aumento del otro, este comportamiento es especialmente notable durante ciertos trimestres del año. Esto resalta la importancia de entender estas relaciones para optimizar la gestión de recursos energéticos en Colombia.

En particular, se destaca una alta complementariedad entre el recurso hídrico de los departamentos de Antioquia y Valle del Cauca, y el recurso solar de la región Caribe, donde se planea instalar más de 5.500 MW en plantas solares para el horizonte 2030. En Santander, donde se proyecta la instalación de 1.300 MW en plantas solares, se observa una complementariedad de grado medio a alto entre su recurso solar y el recurso hídrico de los departamentos analizados. Sin embargo, el recurso eólico en La Guajira no presenta correlaciones altas con el recurso hídrico de los departamentos estudiados. Por otro lado, el recurso hídrico en Antioquia exhibe una alta complementariedad con el recurso eólico de los otros tres departamentos, donde se anticipa el desarrollo de proyectos eólicos.

El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) emerge como el principal motor de la variabilidad climática a nivel regional en Colombia. Los análisis, respaldados por múltiples estudios, revelan una periodicidad típica de 2 a 4 años en la fase cálida del ENSO, y de 5 a 7 años, en la fase fría.

Los modos de oscilación asociados a estos componentes principales revelan patrones espaciales de variabilidad en la precipitación. Durante El Niño, se observa una reducción generalizada de las precipitaciones en todo el país, mientras que durante La Niña, predominan anomalías positivas en las regiones Caribe y Andina, con una influencia menos pronunciada en otras áreas.

Los modos de oscilación revelan patrones espaciales de variabilidad, como la disminución de la radiación durante La Niña en el norte del país y el aumento durante El Niño en la mayoría de las regiones, excepto en la región Pacífica y algunos departamentos. Además, se observa una disminución generalizada en la velocidad del viento durante La Niña, especialmente en áreas al norte de la cordillera oriental, mientras que, durante El Niño, se observa una disminución en el noroeste y un aumento en el sureste de la cordillera. Este análisis es crucial para comprender y prever la variabilidad de los recursos de generación en el país y optimizar su gestión.

Referencias

- Arango-Ruda, E., & Poveda, G. (2018). Efectos de El Niño y La Niña sobre la hidrología de la Amazonia colombiana. *REVISTA COLOMBIA AMAZÓNICA*, 33-58.
- Beluco, A., de Souza, P., & Krenzinger, A. (2012). A method to evaluate the effect of complementarity in time between hydro and solar energy on the performance of hybrid hydro PV generating plants. *Renewable Energy*, 24-30.
- Björnsson, H., & Venegas, S. A. (1997). A manual for EOF and SVD analyses of climatic data. *CCGCR Report*, 112-134.
- CAPOTONDI, A. e. (2020). ENSO and Pacific decadal variability in the Community Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*.
- CHIRPS. (2024, 01 12). *Climate Hazard Center*. Retrieved from <https://www.chc.ucsb.edu/data>
- ECMWF-Copernicus-Climate Change Service. (2024, 01 12). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>
- Fajardo Barreto, G. D., & Franco Ovalle, J. F. (2004). Análisis estadístico de la relación del fenómeno ENOS El niño oscilación sur en las variables hidrometeorológicas de caudal y temperatura en la cuenca alta del Río Magdalena.
- Hannachi, A., Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (2007). Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 1119-1152.
- Henao, F. V. (2020). Annual and interannual complementarities of renewable energy sources in Colombia. . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Hersbach, H. e. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999-2049.
- IDEAM - UNAL. (2018). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*. Bogotá.
- IDEAM. (2024, 05 22). *PROGRAMA NACIONAL DE RADIACIÓN*. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/programa-nacional-de-radiacion>

-
- IDEAM-METEO. (2019). Patrones sinópticos bajo las tres fases del ENSO visto a través del reanálisis cfsr y su respuesta en la precipitación para Colombia. *Grupo de Modelamiento de Tiempo y Clima* .
- Kougias, I., Szabó, S., Monforti-Ferrario, F., Huld, T., & Bódis, K. (2016). A methodology for optimization of the complementarity between small-hydropower plants and solar PV systems. *Renewable Energy*, 1023-1030.
- Marín Salazar, J. (2017). Dinámica de los eventos hidroclimáticos extremos en la cuenca del río Chinchiná por efecto de variabilidad climática. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Martínez Ortega, R. M., & et al. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman. *Habanera de Ciencias Médicas*.
- McPhaden, M. J., Santoso, A., & Cai, W. (2020). Introduction to El Niño Southern Oscillation in a changing climate. *El Niño Southern Oscillation in a changing climate*.
- Muñoz, E., Poveda, G., Arbeláez, M. P., & Vélez, I. D. (2021). Spatiotemporal dynamics of dengue in Colombia in relation to the combined effects of local climate and ENSO. *Acta Tropica* 224.
- NOAA. (2024, 01 12). *National Weather Service*. Retrieved from https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., & Álvarez, D. M. (2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambioy variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. *Revista de Ingeniería*, (36), 65-76.
- Salas, H. D. (2020). Generalized synchronization between ENSO and hydrological variables in Colombia: a recurrence quantification approach. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*.
- Spearman, C. (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 72–101.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2024, 05 22). *Velocidad del viento en superficie (Capítulo 1)*. Retrieved from <http://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/CAPITULO1.pdf>

- UPME. (2024, 01 25). *Sistema de información eléctrico colombiano (SIEL)*. Retrieved from <https://www1.upme.gov.co/siel/Pages/Inscripcion-proyectos-generacion.aspx>
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el período 1981-2014. *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- VAUTARD, R., YIOU, P., & GHIL, M. (1992). Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 95-126.
- XM. (2022). *Reporte integral de sostenibilidad, operación y mercado 2022*. Medellín.
- XM. (2024, 05 24). *PARATEC, Parámetros técnicos del SIN*. Retrieved from <https://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- Yepes, L. J., & Poveda, G. (2012). Diagnóstico y predictibilidad de la lluvia en Colombia a escala intraestacional." . *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.