



**COMPLEMENTARIEDAD ENERGÉTICA ENTRE LAS
CENTRALES ELÉCTRICAS RENOVABLES DE COLOMBIA**

AUTORES

**LAURA MARCELA PARRA GASCA
SARA VALENTINA GÓMEZ PIMENTEL
CAROLINA MONTOYA CASTILLO**

DIRECTOR DEL PROYECTO

JUAN FELIPE HENAO PIZA PH.D.

UNIVERSIDAD ICESI

FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS Y ECONÓMICAS

ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS

SANTIAGO DE CALI

2020

Agradecimientos

En primera instancia queremos dar gracias a Dios por permitirnos completar una meta más en nuestras vidas, por darnos el privilegio de culminar nuestro proceso de formación profesional de la mano de personas que lo han enriquecido. Agradecemos a nuestros padres, quienes con su dedicación y entrega nos han apoyado indudablemente en cada paso de nuestra vida académica.

De igual manera damos gracias a nuestro director de proyecto de grado, Juan Felipe Henao, por creer en este proyecto, en nuestro potencial y brindarnos su asesoría y apoyo integral y sincero durante el proceso de investigación y formación. También a la universidad Icesi, por acompañarnos en este camino de aprendizaje y formación y permitirnos convertirnos en profesionales, brindándonos las herramientas necesarias para lograrlo.

A nuestros compañeros, amigos y familiares quienes nos brindaron un consejo, una palabra de aliento y perseverancia durante este camino. Especialmente a Jairo Steven Jiménez, quien nos dedicó su tiempo y disposición durante la construcción de esta investigación con su experiencia y conocimientos. Finalmente, a todos aquellos que de una u otra manera han sido testigos de nuestro crecimiento como profesionales, gracias.

Resumen

El sistema eléctrico colombiano es altamente dependiente de la hidroelectricidad (65%) para satisfacer las necesidades de energía eléctrica del país. Esta alta dependencia del recurso hídrico hace que el sistema sea vulnerable a fenómenos climáticos de sequía, como los provocados por el Fenómeno del Niño Oscilación del Sur (ENSO). Frente a situaciones de sequía, centrales térmicas a gas y carbón, que son costosas y contaminantes, son usadas intensamente para respaldar el sistema eléctrico. En este trabajo se evalúa el grado de complementariedad energética que existe, o podría existir, entre las centrales eléctricas renovables de Colombia (hidráulica, eólica y solar), para reducir el uso de combustibles fósiles. Para ello, se emplean y contrastan el coeficiente de correlación de Pearson y la metodología de complementariedad de Beluco, Risso, & Canales (2019). Los resultados del estudio muestran que actualmente hay una baja complementariedad energética entre las centrales hídricas, pero buenas oportunidades de complementariedad con las tecnologías solar y eólica. Debido a esto, se recomienda continuar expandiendo el sistema eléctrico colombiano invirtiendo principalmente en centrales solares y eólicas, con el fin fortalecer el sistema eléctrico y obtener mayor complementariedad entre fuentes de energía limpias.

Palabras clave: Complementariedad, Energías renovables, Colombia, Correlación de Pearson, Complementariedad energética.

Abstract

The Colombian electricity system is highly dependent on hydroelectricity (65%) to satisfy the country's electricity needs. This high dependence on water resources makes the system vulnerable to drought weather phenomena, such as those caused by the Southern Oscillation Child Phenomenon (ENSO). In the face of drought situations, gas and coal-fired thermal power plants, which are expensive and polluting, are used intensively to support the electrical system. This work evaluates the degree of energetic complementarity that exists, or could exist, between Colombia's renewable power plants (hydro, wind and solar), to reduce the use of fossil fuels. For this, the Pearson's correlation coefficient and the complementary methodology of Beluco, Risso, & Canales (2019) are used and contrasted. The results of the study show that there is currently low energetic complementarity between hydropower plants, but good opportunities for complementarity with solar and wind technologies. Due to this, it is recommended to expand the Colombian electricity system, investing mainly in solar and wind power plants, in order to strengthen the electricity system and obtain greater complementarity between clean energy sources.

Keywords: Energetic Complementarity, Renewable energy, Pearson correlation, Hydropower.

Tabla de contenido

<i>1. INTRODUCCIÓN</i>	7
<i>2. COMPLEMENTARIEDAD ENTRE ENERGÍAS RENOVABLES</i>	9
2.1. Definición y tipos de complementariedad.....	9
2.2. Evaluaciones de complementariedad entre energías renovables en el mundo.....	10
<i>3. METODOLOGÍA Y DATOS</i>	12
3.1. Cálculo de la complementariedad energética.....	13
3.2. Datos.....	14
<i>4. RESULTADOS</i>	15
4.1. Evaluación de complementariedad por dos métodos.....	15
4.2. Comparación de metodologías.....	23
<i>5. DISCUSIÓN</i>	27
<i>6. CONCLUSIONES</i>	29
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	31

Tabla de figuras

Fig. 1: Ubicación geográfica de 35 ríos de Colombia	15
Fig. 2: Coeficiente r de correlación de Pearson.	18
Fig. 3: Resultado de los coeficientes Kt, Ke, Ka	20
Fig. 4: Diagrama de cajas y bigotes del resultado final Kfinal =Ka x Ke x Kt	22
Fig. 5: Comparación entre Guavio vs Amoyá	24
<i>Fig. 6: Comparación Bata vs Desv. Manso</i>	25
<i>Fig. 7: Comparación Sinú Urra vs Miel I</i>	26
Fig. 8: Comparación Alto Anchicaya vs Guadalupe	27
Tabla 1: Aportes energéticos promedio mensuales al SIN (GWh)	16

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los países con mayor riqueza hídrica, tanto en Latinoamérica, como a nivel global (CEPAL, 2013). De acuerdo a XM, el operador del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y administrador del Mercado de Energía Mayorista (MEM) de Colombia, hoy en día están en funcionamiento 28 centrales hidroeléctricas despachadas centralmente y 115 pequeñas centrales hidroeléctricas no despachadas centralmente. Así, la generación de energía eléctrica del país está basada en un 65% en el recurso hídrico y el 35% restante lo componen centrales a base de combustibles fósiles (gas y carbón principalmente).

Esta alta dependencia de los recursos hídricos ha hecho que el sistema eléctrico colombiano sea vulnerable a fenómenos climáticos de sequía, como los provocados por el Fenómeno del Niño Oscilación del Sur (ENSO). ENSO es un fenómeno natural que se desarrolla a partir del calentamiento anómalo de las aguas del Océano Pacífico cada tres a ocho años, y usualmente tiene una duración de 8 a 10 meses (Poveda, et al., 2011). La fase cálida de ENSO, conocida como El Niño, disminuye los promedios de los regímenes de lluvia en el territorio nacional. La fase fría del ENSO, conocida como La Niña, genera los efectos contrarios, i.e., incremento en los regímenes de lluvias. ENSO es uno de los principales determinantes de la variabilidad climática interanual en Colombia y la disminución anómala de las precipitaciones que produce, reduce los caudales que llegan a los embalses, afectando así la oferta o disponibilidad de energía para el sector eléctrico colombiano. Esto provoca incrementos en los costos de la electricidad y, en el peor de los escenarios, apagones (Franco & Dyner, 2018).

Además de su riqueza hídrica, Colombia también cuenta con abundantes recursos naturales renovables como el solar y eólico, que podrían ser empleados para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, éstos no son aprovechados en todo su potencial para la producción de electricidad a gran escala. Existe una planta solar de 10 MW en el occidente colombiano, un parque solar flotante capaz de generar 145 MWh en el noroccidente y una granja eólica de

19MW en el norte del país. Estas fuentes renovables no llegan a cubrir el 2% de la demanda nacional. By 2022, 1,360 MW of wind energy and 87.6 GWh / year of solar energy are expected to come into operation. (Colprensa, 2018; Sánchez, 2019).

Colombia necesita tener mayor capacidad para producir electricidad de fuentes de generación de energía limpias que sean energéticamente complementarias entre sí, para reducir su dependencia de la hidroelectricidad y de los combustibles fósiles. La complementariedad entre fuentes renovables de energía es un tema que recibe cada vez más atención por parte de investigadores a nivel mundial, pues es fundamental para la planificación de los sistemas eléctricos (J. Jurasz et al., 2020). Sin embargo, este tema no se ha estudiado aun en detalle para el caso colombiano.

El presente estudio tiene por objetivo evaluar el grado de complementariedad energética que existe (o podría existir) entre las diferentes centrales eléctricas renovables (hidráulica, eólica y solar) que hacen parte del SIN colombiano. Para esto, se evalúa la complementariedad que existe entre los aportes energéticos de los 35 ríos que alimentan el sistema hidroeléctrico de Colombia, y también con respecto a los aportes energéticos de la planta eólica Jepirachi y la planta solar Celsia Yumbo.

La complementariedad energética se estima empleando el coeficiente de correlación estadística de Pearson y la metodología propuesta por Beluco, Risso, & Canales (2019), la cual propone evaluar la complementariedad en función de los aportes energéticos promedio, el rango de variación de los aportes energéticos, y el comportamiento temporal de los mínimos aportes energéticos. Gran parte de los estudios realizados a nivel mundial con respecto a la complementariedad emplean solamente coeficientes de correlación. Por lo anterior, en este trabajo se usarán ambas metodologías con el objetivo de analizarlas y contrastar sus resultados.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se muestra diferentes aproximaciones a la cuantificación de la complementariedad y estudios de caso a nivel mundial

y local. La sección 3, presenta la metodología a trabajar y los datos empleados en el estudio. En la sección 4, se presentan los resultados de la aplicación de las dos metodologías al caso colombiano y se resaltan algunos ejemplos puntuales los cuales se usan para contrastar las metodologías empleadas. En la sección 5, se discuten los resultados del estudio y sus implicaciones. Finalmente, en la sección 6, se presentan las conclusiones finales del estudio.

2. COMPLEMENTARIEDAD ENTRE ENERGÍAS RENOVABLES

2.1. Definición y tipos de complementariedad

La complementariedad entre centrales renovables de energía se entiende como la capacidad que tiene una planta para compensar los déficits de otra planta, que, por razones climáticas, esté disminuida o fuera de funcionamiento. Dicha complementariedad se puede dar entre recursos ubicados en el mismo lugar geográfico, o en lugares diferentes (Risso, Beluco, & De Cássia Marques Alves, 2018). En la literatura, es común encontrar que los estudios de complementariedad se centren en caracterizar las fuentes renovables que alimentan las centrales de energía, sin distinguir el tamaño de las centrales o su capacidad. Así pues, la literatura reconoce varios tipos de complementariedad, que son: espacial, temporal, espacio-temporal y energética.

- ***Complementariedad temporal:*** se refiere a la complementariedad entre dos o más tipos de fuentes energéticas que están ubicadas en la misma región o lugar geográfico (Beluco, de Souza, & Krenzinger, 2008; Risso et al., 2018).
- ***Complementariedad espacial:*** se entiende como la complementariedad que se da entre recursos energéticos ubicados en lugares diferentes. (Risso et al., 2018).
- ***Complementariedad espacio-temporal:*** se entiende como la complementariedad dada simultáneamente entre fuentes energéticas en el tiempo y en ubicaciones diferentes (J. Jurasz, Canales, Kies, Guezgouz, & Beluco, 2020).

- **Complementariedad energética:** este tipo de complementariedad se calcula para centrales de generación de electricidad existentes, y no solo para sus fuentes. Ésta no solo busca que las fuentes se comporten de manera opuesta a lo largo del tiempo, sino también la capacidad de una planta logre cubrir la demanda de una segunda planta.

Estos diferentes tipos de complementariedades se evalúan por medio de diversas metodologías. Las más comunes usan técnicas estadísticas, tales como, los coeficientes de correlación de Pearson, Kendall, el rango de Spearman, entre otros. Otro tipo de índices o métricas, menos comunes en la literatura, se utilizan para resumir un conjunto de características físicas en un solo valor (Canales, et al., 2020; Jurasz. et al., 2020).

Por ejemplo, Beluco et al., (2008) evalúa la complementariedad energética entre parejas de centrales de energía renovable a través de una métrica adimensional la cual evalúa qué tanto difieren las dos centrales en términos de sus aportes energéticos promedio, el rango de variación de los aportes energéticos, y el comportamiento temporal de los mínimos aportes energéticos (ver también, Jurasz et al., 2020).

2.2. Evaluaciones de complementariedad entre energías renovables en el mundo

Investigadores de diferentes países del mundo como Brasil (Rodrigues et al., 2016; Silva et al., 2016), China (Han et al., 2019; Zhang et al., 2018), Polonia (Jurasz, Beluco, et al., 2018; Jurasz, 2017), Australia (Prasad, Taylor & Kay, 2017), Estados Unidos (Solomon, Kammen & Callaway, 2016), Península Ibérica (Santos-Alamillos et al., 2015), entre otros, han evaluado la complementariedad entre los recursos renovables, viento, agua y sol. Estas investigaciones se han centrado en estudiar la integración de dichas fuentes de energías renovables y cómo sería la complementariedad entre las mismas.

En Latinoamérica, Brasil es uno de los países con más estudios relacionados con la complementariedad entre recursos energéticos renovables. Risso et al., (2018), por ejemplo,

propusieron un método basado en el establecimiento de una red hexagonal de células y la determinación de rosas, para cuantificar la complementariedad espacial a lo largo del tiempo y poder expresarla en mapas. De Oliveira et al., (2017), emplearon la programación lineal y el coeficiente de correlación de Pearson para optimizar la combinación de tres energías renovables. Borba y Brito (2017) desarrollaron un método para calcular la complementariedad entre más de dos recursos energéticos empleando series de tiempo horarias y diarias. Por último, Cantão et al., (2017), desarrollaron mapas de correlación hidro-eólica para hacer análisis de complementariedad detallados entre ambos recursos energéticos.

En China, por ejemplo, Han et al., (2019) proponen un método para evaluar la complementariedad energética por medio de un examen riguroso de la fluctuación de la energía independiente y combinada. Encuentran que este método es mas preciso porque describe la complementariedad de dos aspectos, incluyendo su fluctuación y rampa. Ren et al., (2019) evalúan la complementariedad de la energía eólica y solar en función del coeficiente de correlación de Kendall, descubriendo que el método preferido para utilizar en China es combinar centrales de energía eólica y solar en el mismo lugar. Li et al., (2019) proponen cuatro métodos diferentes de optimización estocástica con el objetivo de mejorar el rendimiento de operación complementaria de una planta de energía híbrida. Por ultimo, en el trabajo de Wang et al., (2018) proponen un modelo con centrales hidro-térmicas-eólicas-fotovoltaicas demostrando que éste puede aumentar la generación de energía eólica y solar.

En Polonia, Jurasz et al., (2018) simularon el funcionamiento de la hibridación solar por medio de una regresión lineal múltiple y redes neuronales artificiales. En otra investigación, Jurasz & Kaźmierczak, et al., (2018) presentan un modelo matemático para simular y optimizar el funcionamiento de un híbrido eólico-solar a gran escala, considerando un enfoque simplificado para incorporar el costo relacionado con la red. Jurasz & Ciapała, (2017) presentan

un modelo matemático mixto para superar la variabilidad de la energía fotovoltaica al combinarla con una planta de energía eólica.

Por otro lado, también se han realizado investigaciones a mayor escala, incluyendo más de un país o a nivel intercontinental. Miglieta et al., (2017) realizaron su investigación para evaluar la posibilidad de combinar energía solar y eólica en todo Europa por medio del coeficiente de correlación de Pearson, encontrando que existe una aparente complementariedad de los recursos eólicos y solares en la escala de tiempo anual. Chattopadhyay et al., (2017) proponen un modelo matemático para calcular las necesidades de almacenamiento y respaldo para poder suministrar energía renovable confiable en toda Europa. Finalmente, François et al., (2016) analizaron por medio del coeficiente de correlación de Pearson, la integración de la energía hidroeléctrica (RoR) en la combinación de energía solar y eólica demostrando que esta aumenta significativamente la tasa de penetración en 12 regiones de Europa.

En Colombia, Paredes y Ramírez (2017) analizan la complementariedad entre los recursos eólico y solar en diferentes partes del territorio, con el recurso hídrico que abastece las centrales de generación del SIN. Para esto, calculan el coeficiente de correlación de Pearson por parejas de variables usando las series de tiempo de las fuentes de energía renovable. Sin embargo, no calculan la complementariedad energética real que se está dando entre las centrales renovables que componen el sistema interconectado.

3. METODOLOGÍA Y DATOS

Este trabajo tiene por objetivo evaluar la complementariedad energética entre las centrales renovables que hacen parte del sistema interconectado nacional colombiano. Para esto se emplea el coeficiente de correlación de Pearson y la metodología de 11 pasos propuesta por Beluco et al., (2019). En esta sección, se describen los pasos de la metodología de Beluco et al., (2019) para el cálculo de la complementariedad energética entre pares de centrales energéticas renovables, al igual que el origen de los datos empleados en este estudio.

3.1. Cálculo de la complementariedad energética

1. Seleccionar la serie de datos que se utilizarán para caracterizar los dos recursos energéticos que serán evaluados.
2. Identificar el mes en el que se produce el valor mínimo de disponibilidad del primer recurso energético, esta variable será m_1 . El valor de la variable debe indicar el mes del año y deberá ser un número entre 1 y 12.
3. Identificar el mes en el que se produce el valor mínimo de disponibilidad del segundo recurso energético, esta variable será m_2 . El valor de la variable debe indicar el mes del año y deberá ser un número entre 1 y 12.
4. Calcular el componente de complementariedad temporal K_t , comparando m_1 con m_2 y escogiendo el valor más pequeño entre los resultados de las siguientes ecuaciones (1):

$$K_t = \frac{|m_1 - m_2|}{6} \quad K_t = \frac{|m_2 - m_1 + 12|}{6} \quad (1)$$

5. Calcular el valor promedio de la primera fuente de energía, denominado e_1 .
6. Igualmente, calcular el valor promedio de la segunda fuente de energía, denominado e_2 .
7. Estimar el componente de la complementariedad energética, K_e , con la ecuación (2):

$$K_e = 1 - \frac{|e_1 - e_2|}{e_1 + e_2} \quad (2)$$

8. Determinar el rango o la diferencia entre la máxima y la mínima disponibilidad del primer recurso o fuente, denominado d_1 .
9. Igualmente, determinar el rango o la diferencia entre la máxima y la mínima disponibilidad del primer recurso o fuente, denominado d_2 .
10. Calcular el componente de complementariedad energética, K_a , con la siguiente ecuación (3):

$$\delta_1 = 1 - \frac{d_1}{e_1} \quad \delta_2 = 1 - \frac{d_2}{e_2}; \quad K_a = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\delta_1 - \delta_2}{1 - \delta_2}\right)^2 & se \delta_1 \leq \delta_2 \\ \frac{(1 - \delta_2)^2}{(1 - \delta_2)^2 + (\delta_1 - \delta_2)^2} & se \delta_1 \geq \delta_2 \end{cases} \quad (3)$$

11. Finalmente, determinar el valor final de complementariedad, K, multiplicando los valores obtenidos por los índices parciales, K_t , K_e , K_a estimados en los pasos 5, 6 y 7, respectivamente.

3.2. Datos

Los datos empleados en este estudio proceden de la base de datos de XM, operador del SIN y administrador del MEM (XM, 2019). Los datos consisten en series de tiempo mensuales, del 2000 al 2019, de los aportes energéticos de los 35 ríos que alimentan las principales centrales hidroeléctricas del país: San Lorenzo, Alto anchicaya, Amoya, Bata, Betania, Bogotá N.R, Calima, Carlos Lleras, Cauca Salvajina, Chuza, Concepción, Cucuana, Desv. Eeppm (Nec,Paj,Dol), Desv. Guarino, Desv. Manso, Desv. San Marcos, Digua, El Quimbo, Florida Ii, Grande, Guadalupe, Guatape, Guavio, Magdalena Betania, Miel I, Nare, Otros Ríos (Estimados), Porce II, Porce III, Porce2 Cp, Prado, San Carlos, Sinu Urra, Sogamoso y Tenche. La figura 1 muestra la ubicación geográfica de los 35 ríos del SIN.

Adicionalmente, se incluyeron los aportes energéticos de dos centrales de energía limpia alternativa que operan en Colombia, estas son Jepirachi (eólica) ubicada en el norte del país y CELSIA Solar Yumbo ubicada en el occidente colombiano.

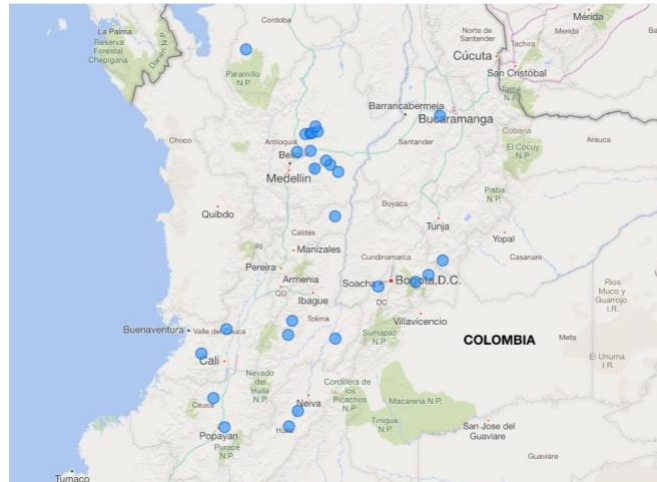


Fig. 1: Ubicación geográfica de 35 ríos de Colombia

(Fuente: Elaboración propia).

4. RESULTADOS

4.1. Evaluación de complementariedad por dos métodos

Con las series de tiempo mencionadas en la sección anterior, se calcularon los promedios mensuales de los aportes energéticos de los 35 ríos del SIN, la planta eólica de Jepirachi y la granja solar Celsia Yumbo (ver Tabla 1). En la Tabla 1, se puede ver que las centrales que más aportan al SIN son Nare, Guavio y Bata, y dentro de las que menos aportan se destacan la planta Yumbo Solar, Jepirachi y Desv. Manso. También, se puede apreciar que los meses del año de mayores aportes energéticos son mayo, junio y julio, y los de menos aportes son enero, febrero y marzo, debido al ciclo climatológico bimodal de lluvias y tiempo seco en Colombia (Poveda et al., 2011).

Tabla 1: Aportes energéticos promedio mensuales al SIN (GWh)

A. SAN LORENZO	ALTOANCHICAYA	AMOYA	BATA	BETANIA CP	BOGOTA N.R.	CALIMA	CARLOS LLERAS	CAUCA SALVAJINA	CHUZA	CONCEPCION	CUCUANA	DES. EPPM (NEC,PAJ,DOI)
162	139	34	75	62	104	15	117	104	29	37	7	57
139	113	25	58	42	92	10	100	81	27	28	8	46
187	135	37	110	78	221	15	143	99	75	31	18	53
257	167	55	283	87	475	20	243	109	155	43	24	62
378	176	84	514	102	630	22	267	109	229	65	39	64
323	130	102	771	100	607	15	186	84	282	61	31	56
284	107	101	841	102	515	10	113	63	235	58	32	62
298	93	86	752	69	412	8	121	45	149	60	26	65
317	110	69	449	51	262	9	132	33	98	60	20	63
356	176	64	352	57	357	17	187	59	100	67	22	65
309	206	50	333	76	563	26	171	120	107	64	19	56
209	168	41	169	55	356	24	153	140	57	46	14	60

DES. GUARINO	DES. MANSO	DES. SAN MARCOS	DIGUA	EL QUIMBO	FLORIDA II	GRANDE	GUADALUPE	GUATAPE	GUAVIO	MAGDALENA BETANIA	MIEL I
9	7	3	11	200	6	179	101	141	122	126	131
7	5	3	8	164	5	145	84	114	108	123	110
12	5	5	10	243	6	191	97	157	248	174	132
33	6	5	15	308	7	263	149	193	515	203	118
16	6	7	16	387	7	340	229	233	822	232	137
18	2	7	12	488	9	296	217	178	1021	273	81
0	1	7	11	507	9	255	201	160	971	259	60
1	1	7	11	343	9	242	206	175	760	210	53
2	4	9	11	250	6	255	208	209	516	142	75
9	7	8	19	222	6	313	210	246	399	154	118
18	9	6	20	197	7	349	189	238	388	184	160
12	7	4	16	169	9	257	137	183	220	190	156

NARE	OTROS RIOS (ESTIMADOS)	PORCE II	PORCE III	PORCE2 CP	PRADO	SAN CARLOS	SINU URRRA	SOGAMOSO	TENCHE	JEPIRACHI	YUMBO SOLAR
357	117	170	34	96	15	65	49	187	20	3,11	1,26
291	97	136	29	72	17	52	28	162	22	3,27	1,20
404	136	163	38	91	26	78	48	323	27	3,92	1,32
567	174	223	47	137	32	115	93	608	34	3,25	1,07
737	175	302	60	286	27	141	152	707	47	3,06	1,04
588	141	249	52	184	13	101	165	432	43	3,39	1,00
508	111	214	39	173	9	90	161	335	39	4,09	0,87
470	98	221	52	182	6	102	142	300	39	3,18	0,43
567	100	230	42	219	6	118	140	279	39	2,23	0,82
667	130	284	55	240	21	154	135	492	40	1,58	0,82
706	162	284	52	191	37	158	130	547	37	1,85	0,79
486	142	214	42	122	29	104	97	312	26	2,60	1,95

Fuente: Elaboración propia

Coeficiente de correlación de Pearson

La evaluación de la complementariedad inicia calculando el coeficiente de correlación de Pearson para cada una de las parejas de centrales renovables del SIN. La figura 2 muestra los nombres de las centrales en los ejes x y y , y los valores de correlación en escala de colores. Los valores de correlación negativos se muestran en colores rojos, estos se interpretan como alta complementariedad entre centrales; mientras que los valores positivos, se presentan en

color azul, y se interpretan como acoplamiento o simultaneidad en el comportamiento entre centrales. Los valores cercanos a 0 se presentan en color blanco y representan ausencia o poca relación entre las centrales. Como se puede ver en la figura 2, la mayoría de las centrales están acopladas y en su mayoría cuentan con correlación positiva, es decir, poca complementariedad. Esto indica que los aportes de los ríos fluctúan de manera similar en su componente temporal. Centrales como Grande, Bogotá NR y Nare muestran un gran acoplamiento con las demás, es decir una poca complementariedad temporal.

Las centrales solar y eólica muestran un alto grado de complementariedad con las centrales eléctricas de componente hídrica, indicando complementariedad espacial. Por otra parte, Desv Guarino, Cauca Salvajina y Florida, también muestran un comportamiento de complementariedad con las demás centrales eléctricas.

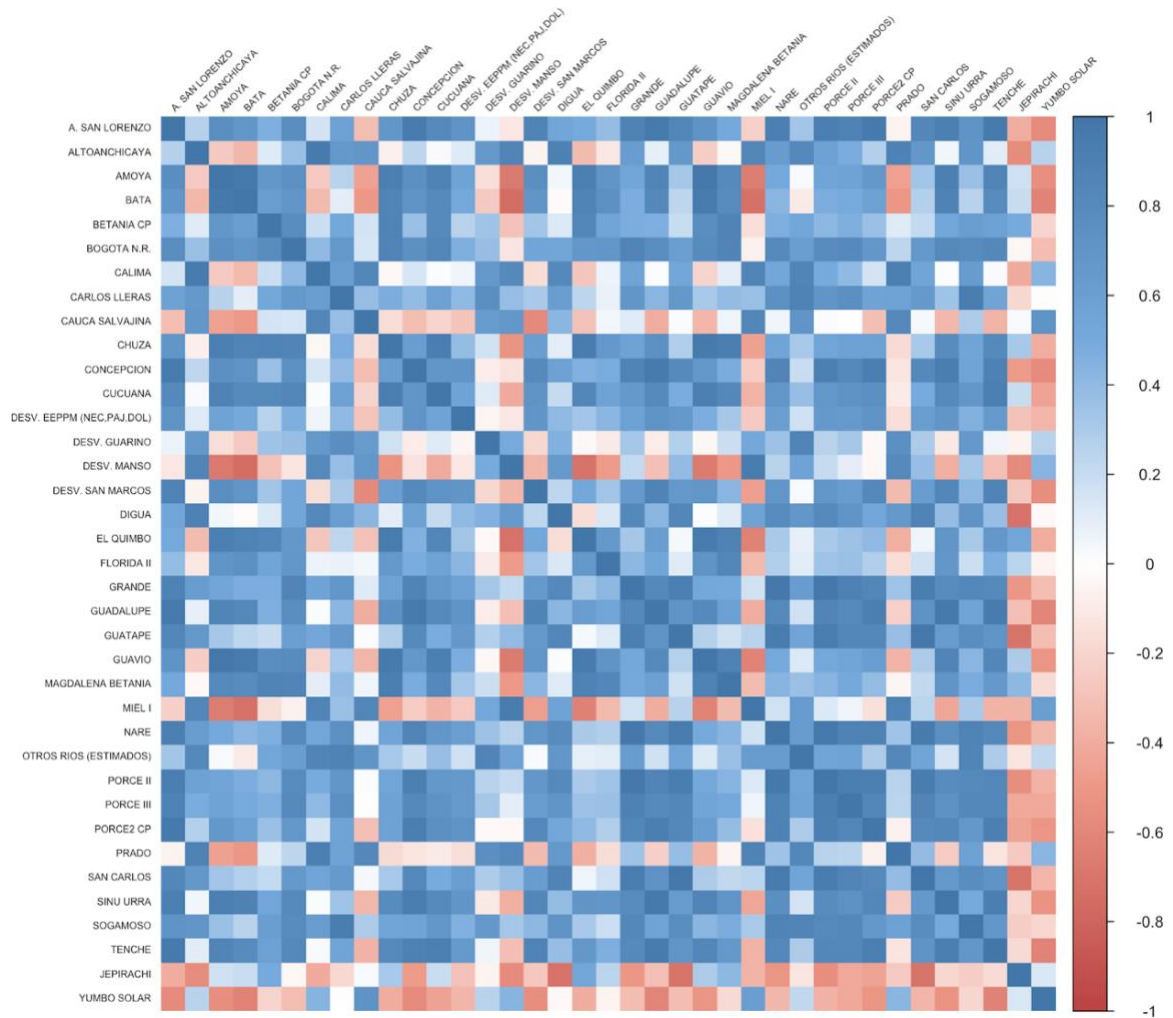


Fig. 2: Coeficiente r de correlación de Pearson.

(Fuente: Elaboración propia)

Métrica de complementariedad de Beluco et al., (2019)

Luego de calcular la correlación de Pearson, se aplicó la metodología de Beluco et al., (2019), empleando los aportes energéticos promedio (Tabla 1). La figura 3 muestra el resultado de estos coeficientes K_t , K_e , y K_a , al comparar, por parejas, todas las centrales renovables entre sí. Las centrales renovables aparecen en los ejes x y y en el mismo orden alfabético presentado en la figura 2. Las matrices reflejan el valor de cada índice K al comparar parejas de centrales. La diagonal es la comparación de una planta consigo misma, cuyo valor será siempre de cero.

Los colores claros significan que hay poca complementariedad energética entre centrales, mientras que los colores oscuros representan una fuerte complementariedad energética.

K_i refleja el grado de complementariedad que existe entre dos centrales renovables a lo largo de un año. Valores cercanos a 0 representan poca complementariedad, y esto se da cuando los valores mínimos de ambas centrales coinciden en los mismos meses; mientras que valores cercanos a 1 representan alta complementariedad, y se da cuando los valores mínimos de ambas centrales tienen una separación entre sí de 6 meses.

En este orden de ideas, las centrales Miel I, Calima, Alto anchicaya, Yumbo Solar, Desv Guarino, Desv Manso, Tenche, Prado y Jepirachi presentan las mayores complementariedades con relación al resto de centrales, ya que sus aportes energéticos mínimos no coinciden con los meses de donde se ubican los valores mínimos de las demás centrales.

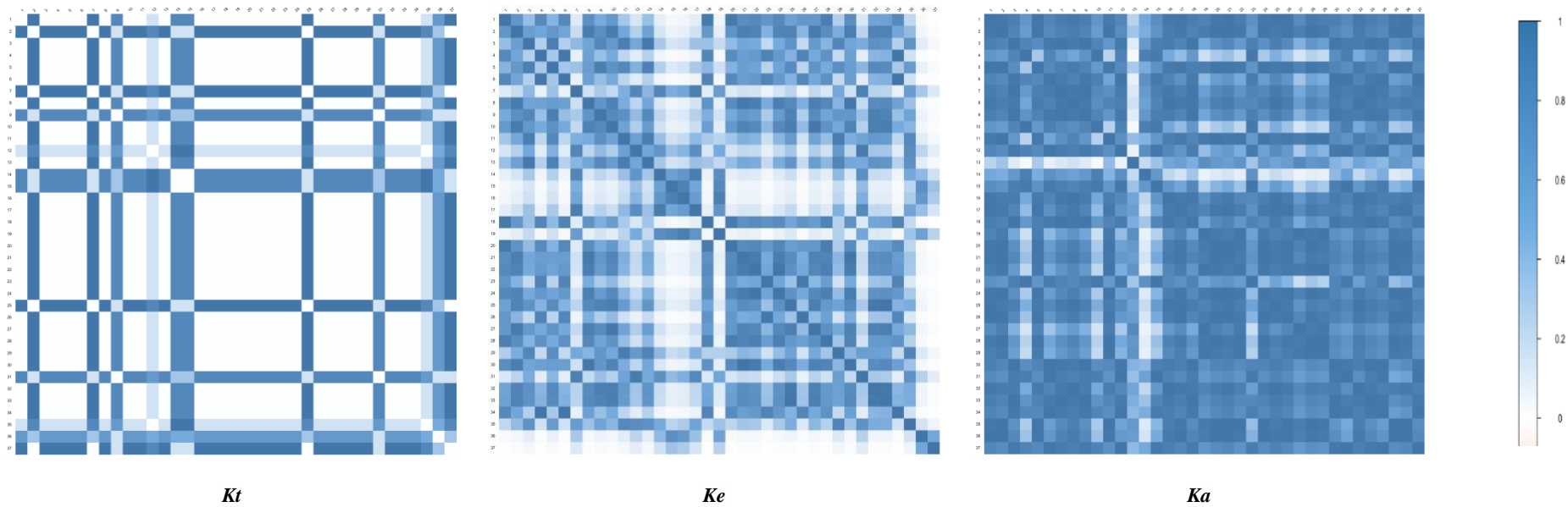


Fig. 3: Resultado de los coeficientes K_t , K_e , K_a .

(Fuente: Elaboración propia).

El coeficiente K_e explica si la magnitud de los valores promedios de dos centrales eléctricas es similar o muy diferente. Los valores cercanos a 0 significan mucha disparidad en cuanto al tamaño de medias, mientras que los valores próximos a 1 indican que las medias de las dos centrales son similares entre sí. Como se observa en la figura 2, en K_e , la mayoría de las centrales cuentan con algo de similitud con respecto a sus medias, es decir son complementarias, pues predomina un color azul. Sin embargo, las centrales Yumbo Solar, Jepirachi, Desv. Manso, Desv. San Marcos, Florida II y Desv. Guarino muestran un menor grado de complementariedad pues su tamaño o capacidad de generación es muy pequeño en comparación con las demás centrales. Las centrales Yumbo Solar y Jepirachi, que entraron en operación en los años 2018 y 2014, cuentan con una capacidad instalada de 19.5 MW y 9.8 MW, respectivamente. Como se ve, sus capacidades están muy por debajo del promedio de las demás centrales del SIN, siendo este de 392MW aproximadamente.

El coeficiente K_a muestra el rango de variación de los valores mínimos y máximos con respecto a la media. Valores de K_a cercanos a 1 indican que la variación de los recursos con respecto a la media de ambas centrales es de la misma intensidad, es decir, ambos recursos tienen la misma amplitud, generando fluctuaciones similares y con igual intensidad. Mientras que valores de K_a próximos a 0 indican amplias diferencias o disparidades en la fluctuación de los recursos energéticos.

En este caso, la mayoría de los recursos fluctúan con la misma intensidad. Esto se observa en la figura 2, en donde la matriz de K_a aparece casi en su totalidad en color azul. Esto se debe, a que los aportes energéticos en promedio se desvían de forma similar de su media.

Luego de calcular las 3 matrices, éstas se multiplican entre sí para determinar una métrica K_{final} de complementariedad energética ($K_{final} = K_t * K_e * K_a$). Dicho índice, cuyos valores están entre 0 y 1, muestra el grado de complementariedad final que existe entre las centrales eléctricas renovables. Valores cercanos a 1 quiere decir que dos centrales renovables, tienen

sus valores mínimos separados 6 meses entre sí, que sus capacidades de generación máximas son similares y que los recursos de ambas centrales fluctúan con la misma intensidad con respecto a su media. Esto es alta complementariedad. Mientras que valores cercanos a cero, significan baja complementariedad, pues las dos centrales son muy dispares entre sí. La figura 4, muestra a través de un diagrama de cajas y bigotes, el resumen de las multiplicaciones K obtenidas para cada central con las restantes. En este gráfico se puede ver que el comportamiento de la mayoría de las centrales con respecto a las demás no es complementario, es decir que casi todos sus resultados son cercanos a cero. Esto significa que la mayor parte de los ríos están acoplados entre sí, con algunas pocas excepciones como son las centrales Altoanchicaya, Miel I y Cauca Salvajina, que presentan valores finales de complementariedad altos.

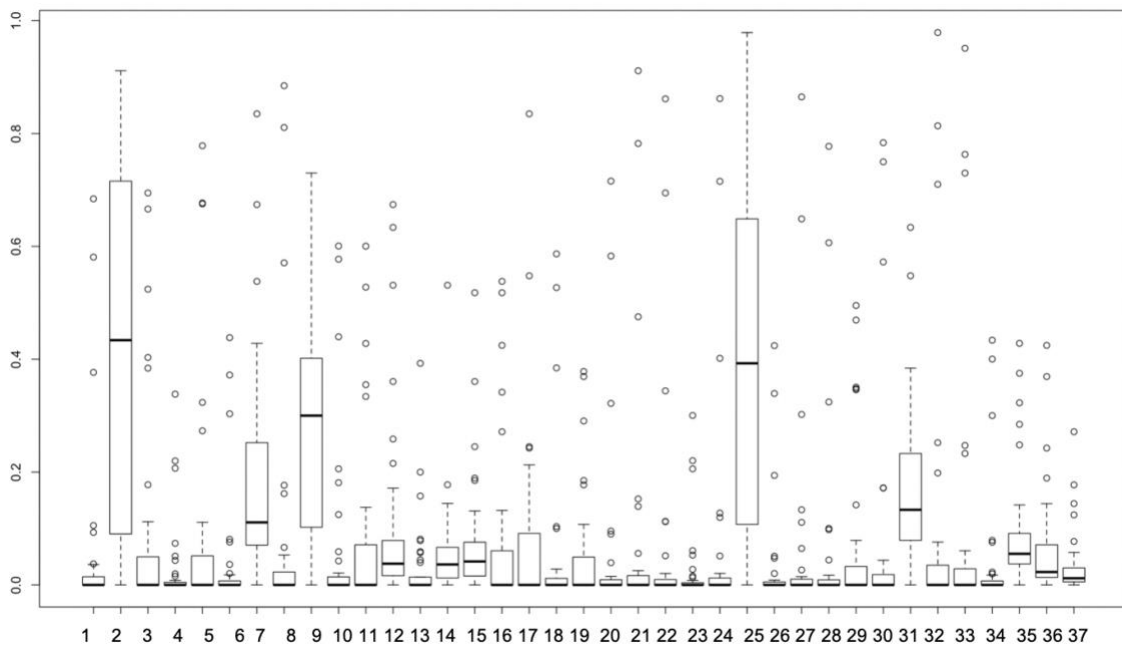


Fig. 4. Diagrama de cajas y bigotes del resultado final $K_{final} = K_a \times K_e \times K_t$.

(Fuente: Elaboración propia).

En la siguiente sección se analizan cuatro ejemplos puntuales de relaciones de complementariedad entre parejas de centrales, combinado diferentes resultados de correlación y K final. El propósito es contrastar y apreciar las diferencias ambas metodologías.

4.2. Comparación de metodologías

En esta subsección se presentan, a manera de ejemplo, diferentes relaciones de complementariedad entre parejas de centrales con base a los índices anteriores. El objetivo es contrastar las diferencias ambas metodologías.

Caso 1: Baja complementariedad con Pearson y con K_{final}

La figura 5 muestra los valores promedios mensuales de las centrales Guavio y Amoyá. Como se puede observar, ambas centrales tienen un comportamiento que parece no ser complementario, sino más bien sincrónico o acoplado.

Para estas dos centrales, el coeficiente de correlación de Pearson da un valor de 0.981, lo que sugiere sincronismo entre ambas centrales. Mediante el índice de Beluco et al., (2019) se encontró que el valor del coeficiente K_a es de 0.9034, lo que significa, que ambos recursos tienen la misma variación o amplitud; K_e tiene un valor de 0.2186, indicando una complementariedad baja entre ambas centrales en cuanto a sus tamaños; y K_r es de 0 mostrando que los mínimos de aportes energéticos de ambas centrales coinciden en el mismo mes, febrero. Por último, el K_{final} es de 0.0038, lo que muestra en definitiva que existe una muy baja complementariedad en ambas centrales coincidiendo con el resultado de Pearson.

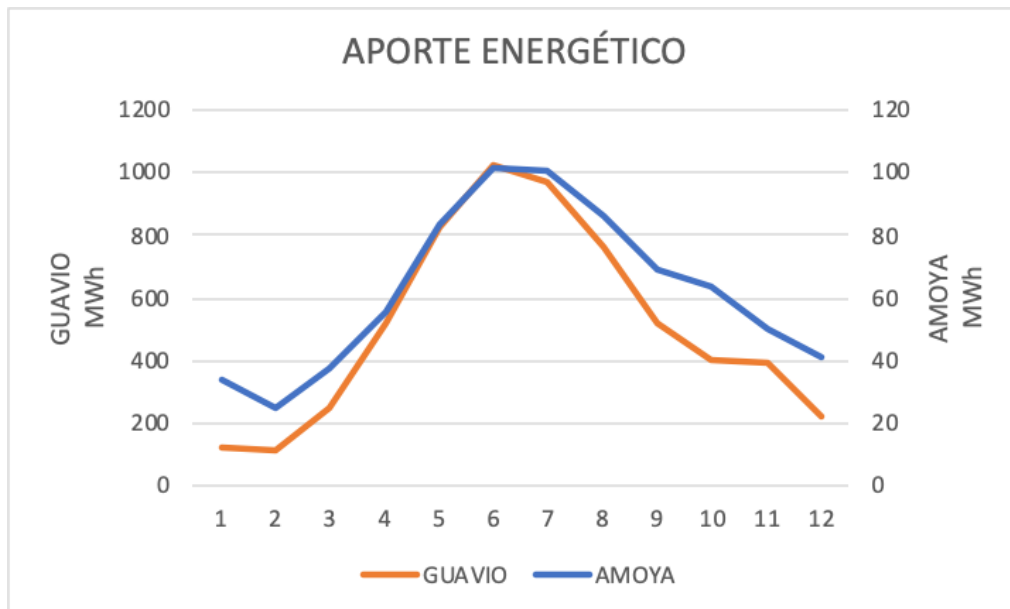


Fig. 5: Comparación entre Guavio vs Amoyá

(Fuente: Elaboración propia)

Caso 2: Alta complementariedad con Pearson y baja con K_{final}

La figura 6 muestra los valores promedios mensuales de la central Bata y Desv. Manso. A simple vista parecen ser complementarias, particularmente de mayo a octubre.

Para estas dos centrales, el coeficiente de correlación de Pearson dio un valor de -0.74 sugiriendo una alta complementariedad entre ambas. En cuanto al índice de Beluco et al., (2019), se encontró que K_a es de 0.9694, indicando que ambos recursos varían con la misma amplitud o intensidad. K_e tiene un valor de 0.02448, indicando una complementariedad baja entre ambas centrales en cuanto a sus aportes energéticos promedios. Y K_t fue de 0.83, sugiriendo una alta complementariedad temporal, lo que coincide con el coeficiente de Pearson. Por último, el K_{final} fue de 0.019, indicando una baja complementariedad entre las centrales.

Lo anterior, muestra que ambas metodologías presentan resultados diferentes en cuanto al análisis de complementariedad energética.

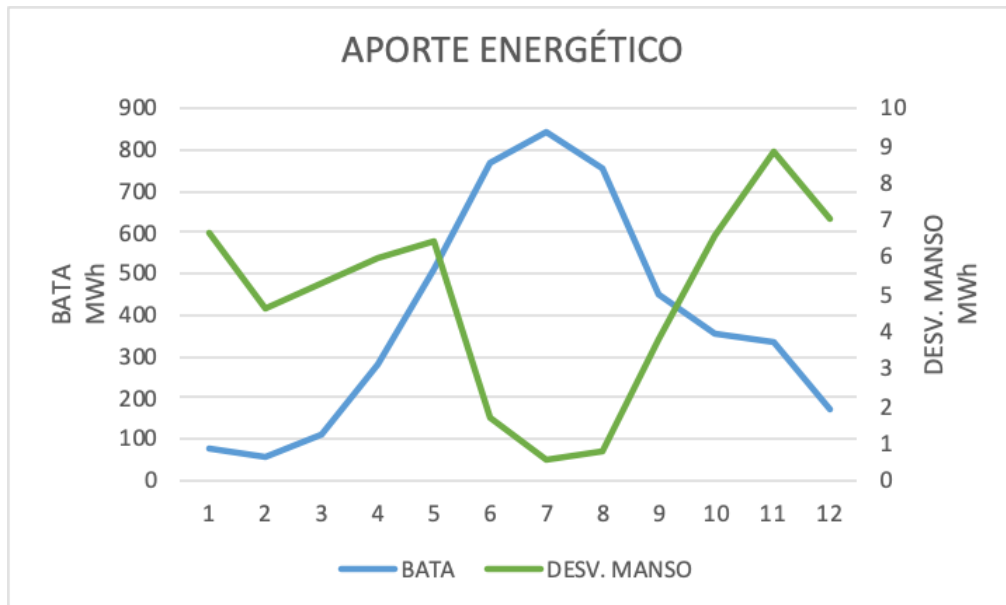


Fig. 6: Comparación Bata vs Desv. Manso

(Fuente: Elaboración propia)

Caso 3: Alta complementariedad con Pearson y K_{final}

La figura 7 muestra los valores promedios mensuales de las centrales Sinú Urra y Miel I. Como se puede observar, ambas centrales tienen un comportamiento complementario, en particular de mayo a octubre.

El coeficiente de correlación de Pearson sugiere complementariedad entre ambas centrales, con un valor de -0.4267 . Ahora bien, el índice de Beluco et al., (2019) muestra que el valor del coeficiente K_a es de 0.955 , implicando la misma variación o amplitud en los aportes energéticos. K_e tiene un valor de 0.995 lo que indica que los aportes promedios son del mismo orden de magnitud; y K_t es igual a 1 , lo que indica que hay complementariedad temporal debido a que los meses donde se encuentran los mínimos tienen una brecha de 6 meses entre ellos. Por último, el K_{final} es de 0.9510 , lo que muestra en definitiva que existe una alta complementariedad en ambas centrales, coincidiendo con el resultado de Pearson.

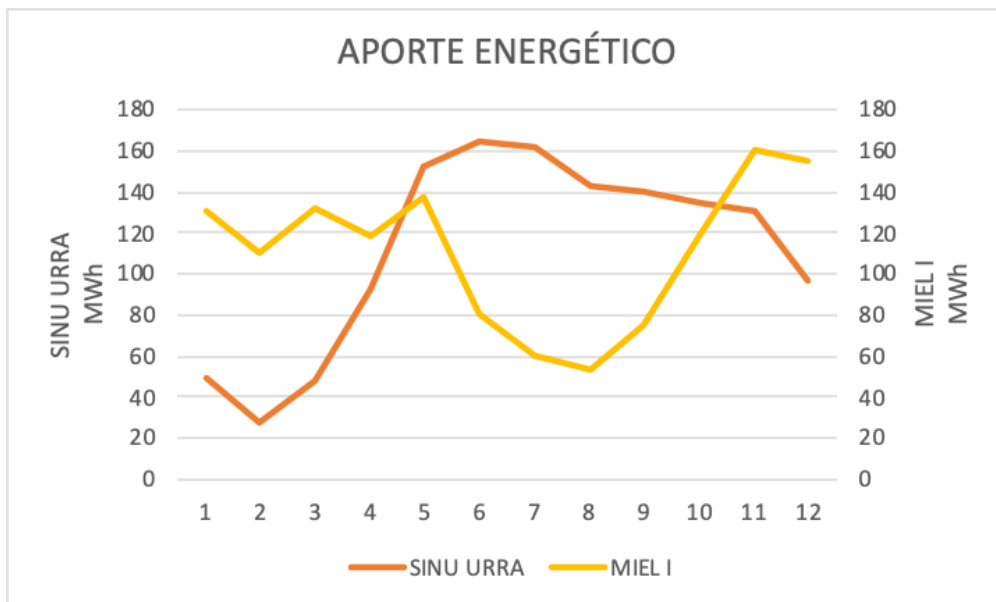


Fig. 7: Comparación Sinú Urrea vs Miel I.

(Fuente: Elaboración propia)

Caso 4: Baja complementariedad con Pearson y alta con K_{final}

La figura 8 muestra los valores promedios mensuales de aportes de las centrales Alto Anchicaya y Guadalupe. El comportamiento aparente de las dos centrales es complementario, principalmente en los meses de mayo a noviembre.

El coeficiente de correlación de Pearson indica que ambas centrales tienen una complementariedad baja, con un valor de 0.0887. Por otro lado, gracias al índice de Beluco et al., (2019) se logró identificar que el valor del coeficiente K_a es de 0.992, lo que significa que ambas centrales presentan la misma amplitud, generando fluctuaciones similares en su forma e intensidad. En cuanto a K_e , se encuentra un valor de 0.9178, lo que indica que sus aportes energéticos promedio son similares. El valor para K_t es de 1, sugiriendo que los aportes mínimos de ambas centrales ocurren con un espaciado temporal de 6 meses entre ellos, estableciendo una complementariedad completa. Finalmente, K_{final} es de 0.9112, lo que indica que existe una complementariedad alta entre las centrales. Este resultado difiere del análisis arrojado por el coeficiente de Pearson.

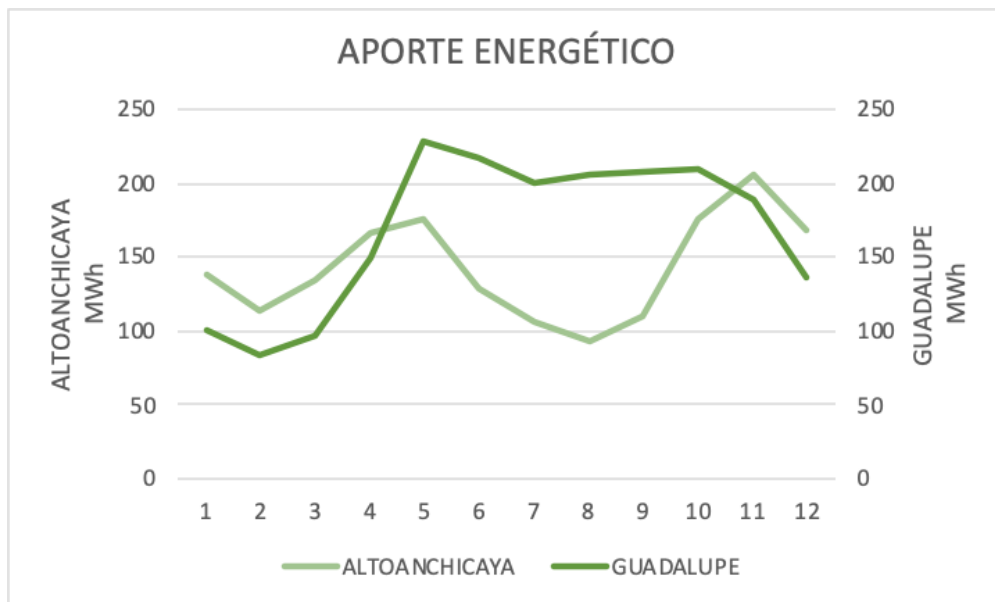


Fig. 8: Comparación Alto Anchicaya vs Guadalupe

(Fuente: Elaboración propia)

5. DISCUSIÓN

Después analizar los resultados anteriores con ambas metodologías, se pudo observar que:

- El análisis de complementariedad por medio del coeficiente de correlación de Pearson y el índice Beluco et al., (2019), muestra que hay ocasiones donde ambas metodologías coinciden y otras donde difieren entre sí. A pesar de esto, se pudo observar que el coeficiente de correlación de Pearson normalmente coincide con K_t (ver patrones de colores de las Fig. 2 y Fig. 3 K_t). Luego, los casos donde el K_{final} difiere de Pearson, se deben en su mayoría a las demás perspectivas capturadas a través de K_a y K_e .
- El coeficiente K_{final} tiene en cuenta características de los aportes energéticos, más allá de su variabilidad temporal, como son la magnitud promedio de los aportes y su rango de variación. Mientras que el coeficiente Pearson, sólo explica la complementariedad en función del comportamiento de las variables en el tiempo.
- El índice Beluco et al., (2019), además de indicar el grado de complementariedad temporal entre centrales, también resalta los aspectos anteriormente mencionados.

- Las centrales renovables alternativas, eólica Jepirachi y solar Yumbo, presentan complementariedad temporal con la mayoría de las centrales hídricas, excepto con Alto Anchicaya, Calima y Miel I. Esto indica que los mínimos de estas centrales renovables alternativas ocurren en diferentes meses del año a los mínimos de las centrales hídricas. Esto sugiere que las energías renovables alternativas tienen un alto potencial de complementariedad, el cual podría ser explotado para reducir las vulnerabilidades del SIN y el uso de combustibles fósiles.
- El K_{final} de las dos centrales renovables alternativas, eólica Jepirachi y solar Yumbo, fue bajo, debido a las diferencias en tamaño o capacidad instalada, con respecto a las demás centrales eléctricas, K_e .
- Finalmente, el coeficiente K_a muestra que, en casi todos los casos, las centrales eléctricas tienen la misma variabilidad con respecto a su media. Lo indica que, a escala mensual, los recursos hídricos tienen el mismo rango de variación que los recursos solar y eólico.

En conclusión, las fuentes renovables alternativas para la producción de energía, solar y eólica, tienen un gran potencial para complementar el sistema hidroeléctrico de Colombia. Por consiguiente, valdría la pena considerar invertir más capacidad en estas tecnologías para fortalecer el sistema eléctrico del país y complementar el actual sistema hidroeléctrico. Esto permitiría alcanzar mejores valores de K_{final} y, por ende, mayor fortaleza energética.

Los recursos hidro-energéticos varían casi de manera sincrónica, tanto a escala anual como interanual. Esto genera efectos adversos para el sector eléctrico, sobre todo en la fase cálida del fenómeno del Niño. Es por esta razón, que se debe tener recursos alternos a las centrales hídricas para minimizar futuras complicaciones. Una posible estrategia es aumentar la inversión en tecnologías limpias, solar y eólica, generando un mejor manejo de la producción de energía en el país.

Actualmente, Colombia está trabajando para posicionar a La Guajira como la mayor fuente de energía eólica del país. Para esto se está planeando que la primera gran línea de transmisión eléctrica para explotar la energía eólica de la Guajira comience a operar en noviembre de 2022 y transmitir hasta 1360 MW. Esto impulsará el desarrollo de la industria eólica en esta región. La Súper Intendencia de Servicios afirmó que actualmente existen más de 300 proyectos vinculados a energías renovables, y según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), más de la mitad son iniciativas viables (Colprensa, 2018).

Finalmente, en cuanto a la energía solar en Colombia, se espera que para el 2022 se instalen 1.500 MW de capacidad renovable. En 2019, Enel Green Power Colombia (EGPC) inauguró la planta de energía renovable más grande del país, ubicada en el municipio El Paso (Cesar). Esta funciona con 250.000 paneles solares, tiene una capacidad instalada de 86,2 MW y la capacidad de producir 176 GW/año, abasteciendo las necesidades energéticas anuales de aproximadamente 102.000 hogares colombianos (Sánchez, 2019).

Todas estas iniciativas son esperanzadoras. Sin embargo, el país debe ser más ambicioso con sus metas e intentar a un mayor crecimiento de estas dos tecnologías en el corto plazo para fortalecer el SIN.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una evaluación de la complementariedad energética que existe entre las centrales eléctricas renovables de Colombia. Para ello se emplearon y contrastaron el coeficiente de correlación de Pearson y la metodología de Beluco et al., (2019). Los datos empleados para este análisis fueron los aportes energéticos de los caudales de los 35 ríos principales que alimentan el sistema hidroeléctrico del país, más los aportes de las 2 centrales de energías renovables limpias actualmente en operación, que son una solar y una eólica.

Los principales hallazgos del estudio se listan a continuación:

- En términos generales, el sistema eléctrico colombiano no cuenta con un alto componente de complementariedad entre sus centrales eléctricas renovables;
- La mayoría de los afluentes presentan el mismo comportamiento temporal y la misma variabilidad con respecto a su media, lo que origina las debilidades del SIN durante épocas de sequía;
- Las centrales de energía renovable alternativa (eólica y solar) cuentan con muy poca complementariedad debido las bajas capacidades instaladas, pero su dinámica de comportamiento permite pensar que tienen un alto potencial para complementar el sistema hidroeléctrico de Colombia.
- La metodología K de Beluco et al., (2019) permite realizar un análisis más holístico o comprensivo del concepto de complementariedad, que el conocido y ampliamente empleado coeficiente de correlación de Pearson. La metodología de Beluco et al., (2019), usada a escala mensual, obtiene resultados similares a Pearson para la perspectiva temporal, pero ofrece, además, otras perspectivas que podrían contribuir a realizar una mejor planificación a largo plazo del sistema eléctrico del país.

Por lo anterior, desde el punto de vista práctico se recomiendan hacer inversiones más ambiciosas en energías renovables alternativas, solar y eólica, para continuar la expansión en capacidad de generación del sistema eléctrico colombiano. Y, desde el punto de vista metodológico, se recomienda usar la metodología de Beluco et al., (2019) sobre el coeficiente de correlación, en particular si el análisis se hace a nivel mensual, pues ésta ofrece una perspectiva más amplia que la ofrecida por Pearson.

Finalmente, en términos de futura investigación, se sugiere emplear la metodología de Beluco et al., (2019) para identificar un plan óptimo de expansión que no solo tenga en cuenta

aspectos económicos y técnicos, sino también criterios de complementariedad energética entre tecnologías.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Beluco, A., de Souza, P. K., & Krenzinger, A. (2008). A dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies. *Renewable Energy*, 33(10), 2157–2165. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.019>
- [2]. Beluco, A., Risso, A., & Canales, F. A. (2019). Simplified evaluation of energetic complementarity based on monthly average data. *MethodsX*, 6, 1194–1198. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.05.019>
- [3]. Borba, E. M., & Brito, R. M. (2017). An Index Assessing the Energetic Complementarity in Time between More than Two Energy Resources. *Energy and Power Engineering*, 09(09), 505–514. <https://doi.org/10.4236/epe.2017.99035>
- [4]. Canales, F. A., Jurasz, J., Beluco, A., & Kies, A. (2020). Assessing temporal complementarity between three variable energy sources through correlation and compromise programming. *Energy*, 192, 116637. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116637>
- [5]. Cantão, M. P., Bessa, M. R., Bettega, R., Detzel, D. H. M., & Lima, J. M. (2017). Evaluation of hydro-wind complementarity in the Brazilian territory by means of correlation maps. *Renewable Energy*, 101, 1215–1225. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.012>
- [6]. CEPAL. (2013). Agua para el Siglo XXI para América del Sur. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [7]. Chattopadhyay, K., Kies, A., Lorenz, E., von Bremen, L., & Heinemann, D. (2017). The impact of different PV module configurations on storage and additional balancing needs for a fully renewable European power system. *Renewable Energy*, 113, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.069>
- [8]. Colprensa. (2018). Transportar energía eólica, un hecho en 2022. *El Universal*. Retrieved from <https://www.eluniversal.com.co/colombia/transportar-energia-eolica-un-hecho-en-2022-272490-ECEU386992>
- [9]. de Oliveira Costa Souza Rosa, C., Costa, K. A., da Silva Christo, E., & Bertahone, P. B. (2017). Complementarity of hydro, photovoltaic, and wind power in Rio de Janeiro State. *Sustainability (Switzerland)*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/su9071130>
- [10]. Franco, C. J., & Dyrner, I. (2018). *Ocaso de un paradigma: hacia un nuevo modelo eléctrico* (1st ed.). Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=CeguyQEACAAJ>
- [11]. François, B., Hingray, B., Raynaud, D., Borga, M., & Creutin, J. D. (2016). Increasing climate-related-energy penetration by integrating run-of-the river hydropower to wind/solar mix. *Renewable Energy*, 87, 686–696. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.064>
- [12]. Han, S., Zhang, L., Liu, Y., Zhang, H., Yan, J., Li, L., & Lei, X. (2019). Quantitative evaluation method for the complementarity of wind – solar – hydro power and optimization of wind – solar ratio. *Applied Energy*, 236(November 2018), 973–984. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.059>

- [13]. Jurasz, J., Canales, F. A., Kies, A., Guezgouz, M., & Beluco, A. (2020). A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*, 195(December), 703–724. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>
- [14]. Jurasz, Jakub, Beluco, A., & Canales, F. A. (2018). The impact of complementarity on power supply reliability of small scale hybrid energy systems. *Energy*, 161, 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.182>
- [15]. Jurasz, Jakub, & Ciapała, B. (2017). Integrating photovoltaics into energy systems by using a run-off-river power plant with pondage to smooth energy exchange with the power grid. *Applied Energy*, 198, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.042>
- [16]. Jurasz, Jakub, Dąbek, P. B., Kaźmierczak, B., Kies, A., & Wdowikowski, M. (2018). Large scale complementary solar and wind energy sources coupled with pumped-storage hydroelectricity for Lower Silesia (Poland). *Energy*, 161, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.085>
- [17]. Li, H., Liu, P., Guo, S., Ming, B., Cheng, L., & Yang, Z. (2019). Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization. *Applied Energy*, 238(August 2018), 863–875. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.111>
- [18]. Miglietta, M. M., Huld, T., & Monforti-Ferrario, F. (2017). Local Complementarity of Wind and Solar Energy Resources over Europe: An Assessment Study from a Meteorological Perspective. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(1), 217–234. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-16-0031.1>
- [19]. Paredes, J. R., & Ramírez, J. J. (2017). Energías renovables variables y su contribución a la seguridad energética: complementariedad en Colombia. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 62. Retrieved from <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Energías-renovables-variables-y-su-contribución-a-la-seguridad-energética-Complementariedad-en-Colombia.pdf>
- [20]. Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11–12), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- [21]. Prasad, A. A., Taylor, R. A., & Kay, M. (2017). Assessment of solar and wind resource synergy in Australia. *Applied Energy*, 190, 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.135>
- [22]. Ren, G., Wan, J., Liu, J., & Yu, D. (2019). Spatial and temporal assessments of complementarity for renewable energy resources in China. *Energy*, 177, 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.023>
- [23]. Risso, A., Beluco, A., & De Cássia Marques Alves, R. (2018). Complementarity roses evaluating spatial complementarity in time between energy resources. *Energies*, 11(7), 1–14. <https://doi.org/10.3390/en11071918>
- [24]. Rodrigues, A., Mendonça, F., Trevenzoli, A., Helena, M., & Spyrides, C. (2016). Complementarity of Brazil's hydro and offshore wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 413–427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.045>
- [25]. Sánchez, P. (2019, April). Inaugurada la planta fotovoltaica más grande de Colombia, de 86,2 MW. *PV Magazine Latin America*. Retrieved from <https://www.pv-magazine-latam.com/2019/04/08/inaugurada-la-planta-fotovoltaica-mas-grande-de-colombia-de-862-mw/>
- [26]. Santos-Alamillos, F. J., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., Von Bremen, L., & Tovar-Pescador, J. (2015). Combining wind farms with concentrating solar plants to provide

- stable renewable power. *Renewable Energy*, 76(2015), 539–550. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.055>
- [27]. Silva, A. R., Pimenta, F. M., Assireu, A. T., & Spyrides, M. H. C. (2016). Complementarity of Brazils hydro and offshore wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 413–427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.045>
- [28]. Solomon, A. A., Kammen, D. M., & Callaway, D. (2016). Investigating the impact of wind-solar complementarities on energy storage requirement and the corresponding supply reliability criteria. *Applied Energy*, 168, 130–145. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.070>
- [29]. Wang, X., Chang, J., Meng, X., & Wang, Y. (2018). Short-term hydro-thermal-wind-photovoltaic complementary operation of interconnected power systems. *Applied Energy*, 229(August), 945–962. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.034>
- [30]. XM. (2019). Indicadores. Retrieved May 7, 2020, from Portal BI informacion inteligente website: <http://portalbissrs.xm.com.co/Paginas/Home.aspx>
- [31]. Zhang, H., Cao, Y., Zhang, Y., & Terzija, V. (2018). Quantitative synergy assessment of regional wind-solar energy resources based on MERRA reanalysis data. *Applied Energy*, 216(February), 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.094>