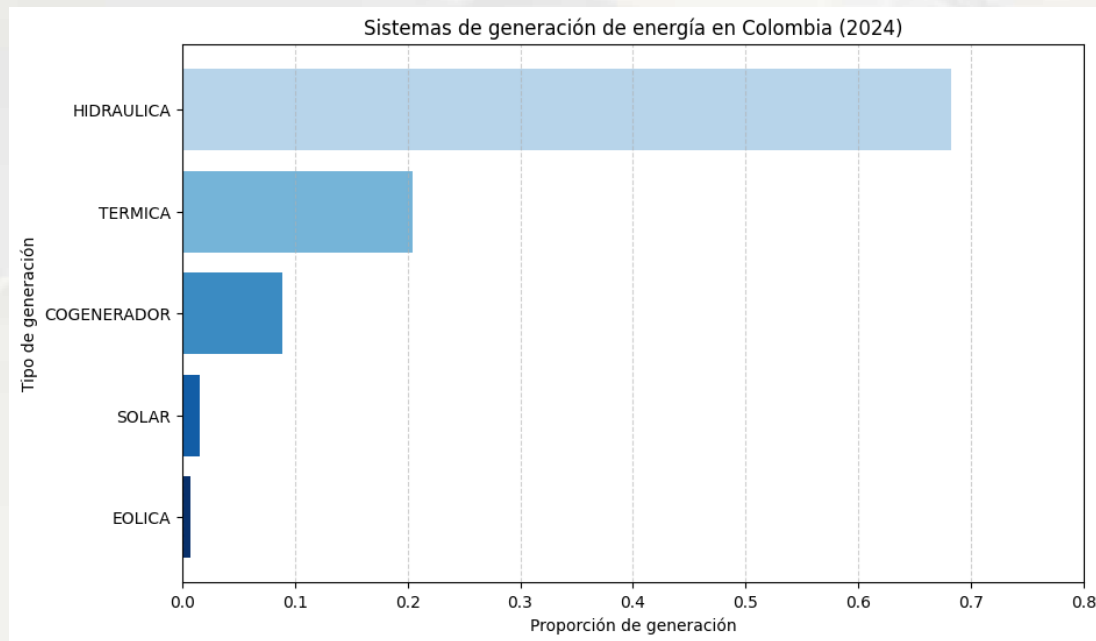


Diseño de una metodología basada en la simulación de Monte Carlo para la evaluación financiera de la generación fotovoltaica en hogares residenciales de ciudades colombianas.

Nicolas Alvarez Ortiz
Tesis de Pregrado – Ingeniería Industrial
202020565

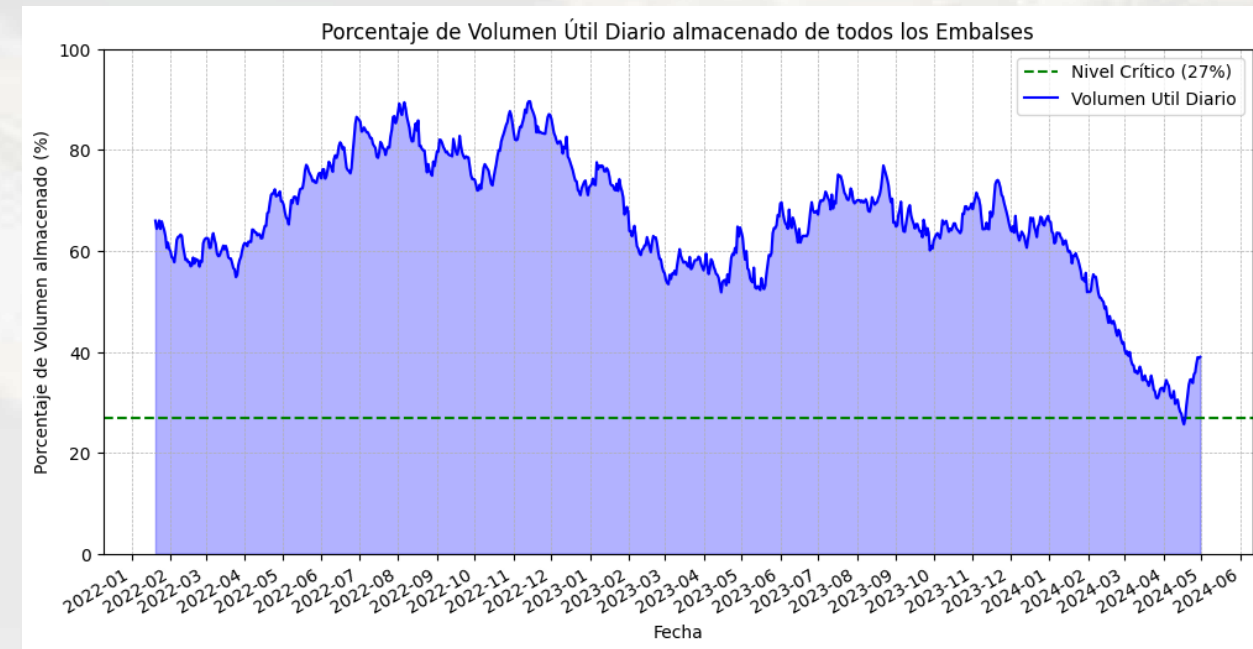
¿Cómo se ve la matriz energética de Colombia?

≈ 70% De la generación es hidroeléctrica



¿Qué pasó en el primer semestre del año?

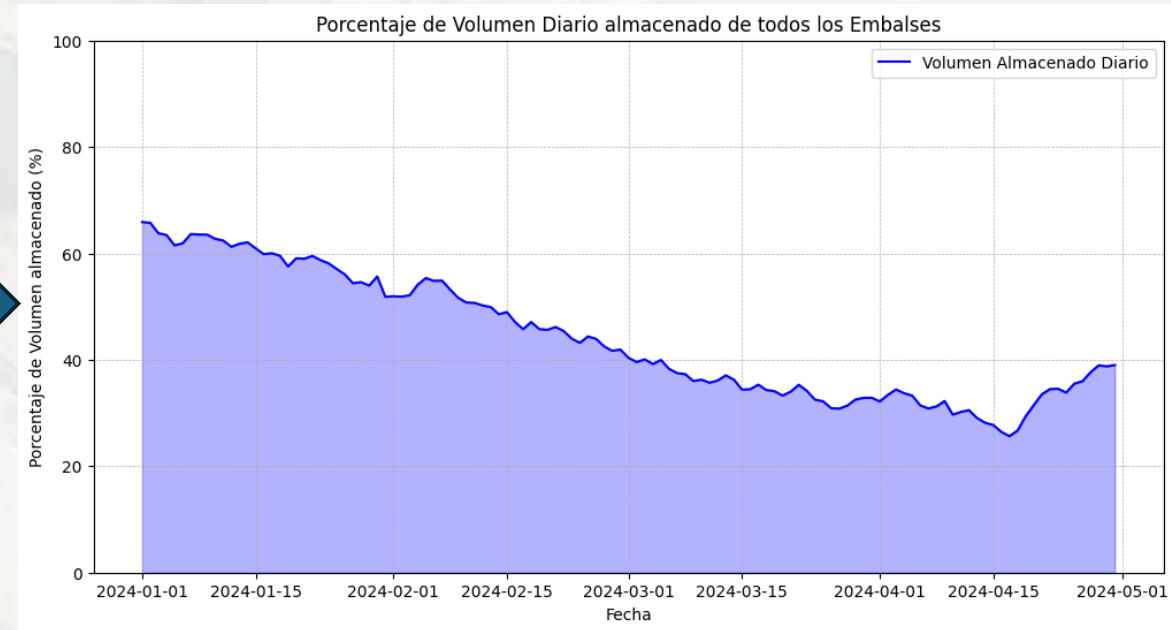
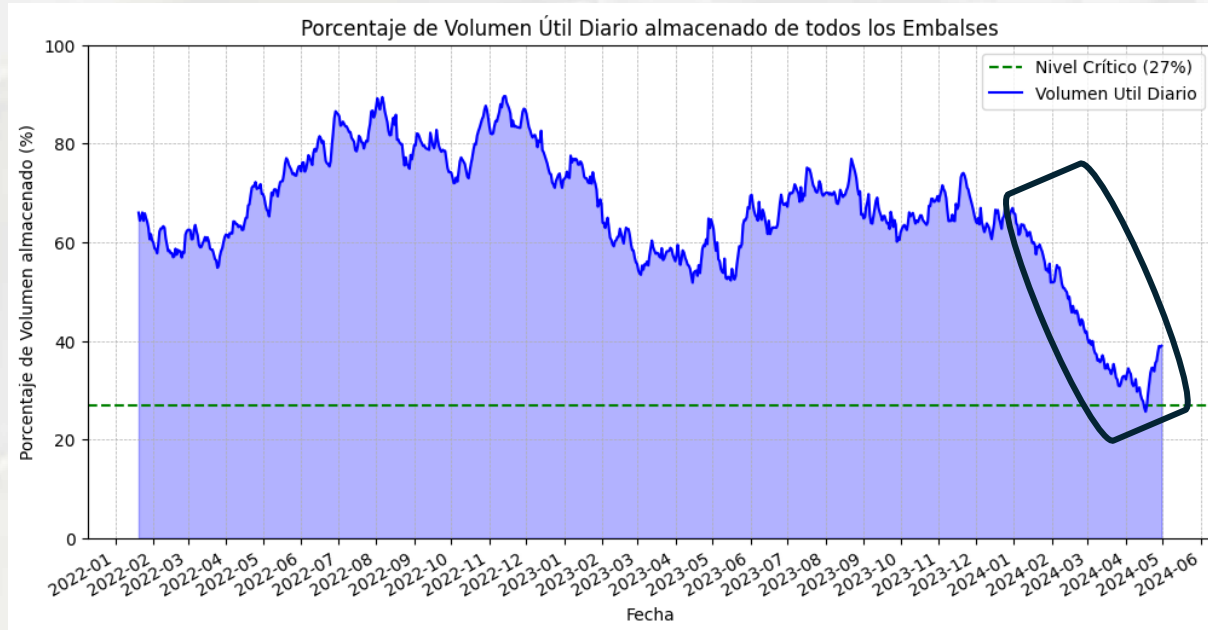
- Fenómeno de El Niño
- Reducción en el nivel almacenado de los embalses que alimentan las hidroeléctricas



Fuente: XM (operador del Sistema Interconectado y el administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia)

Gráficas: Elaboración propia.

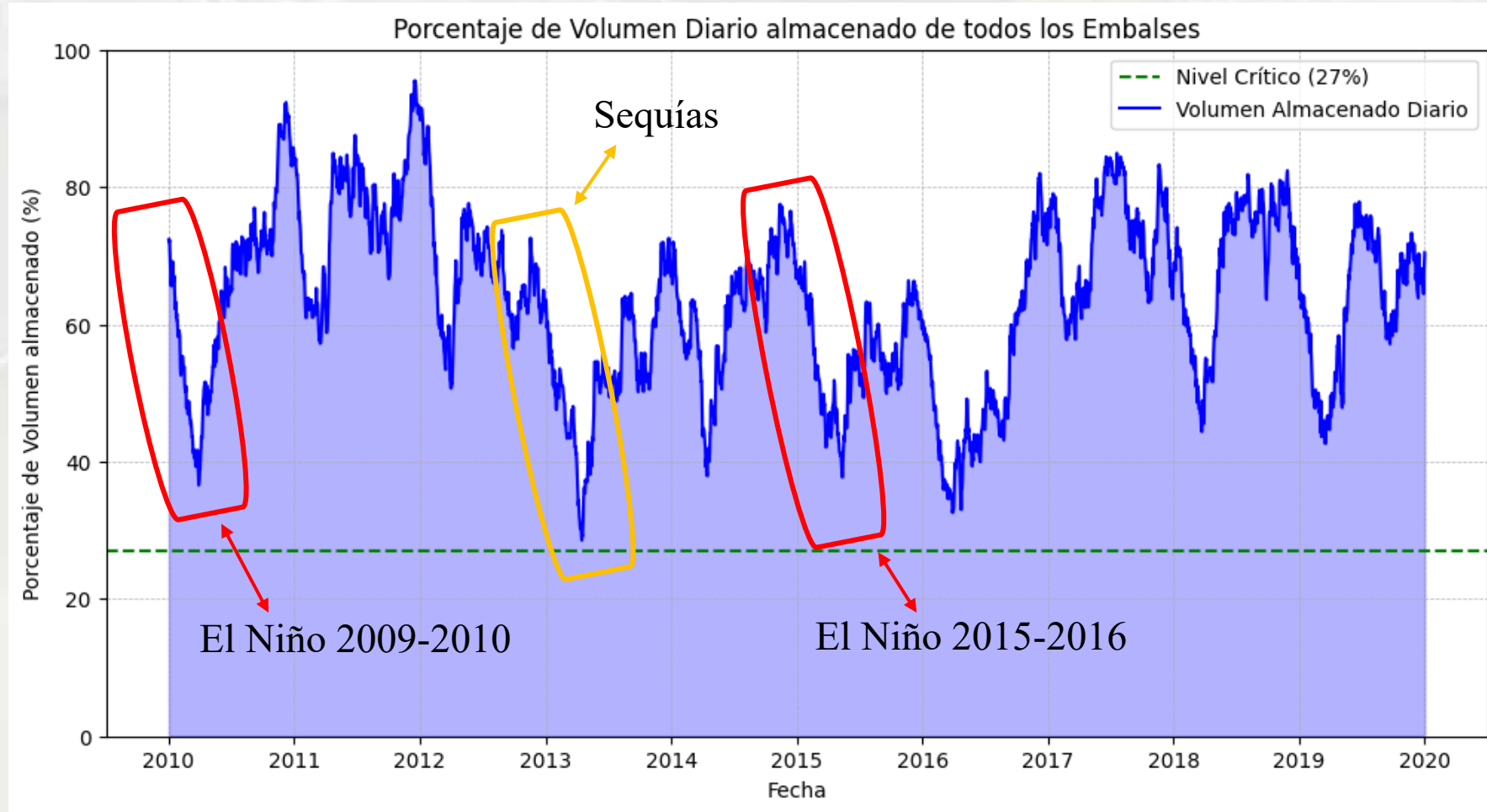
- En septiembre de 2023 y marzo de 2024 se presentaron **los menores aportes de los últimos 40 años.**
- Se alcanzó el **nivel** de embalse agregado **más bajo** en los últimos 20 años.



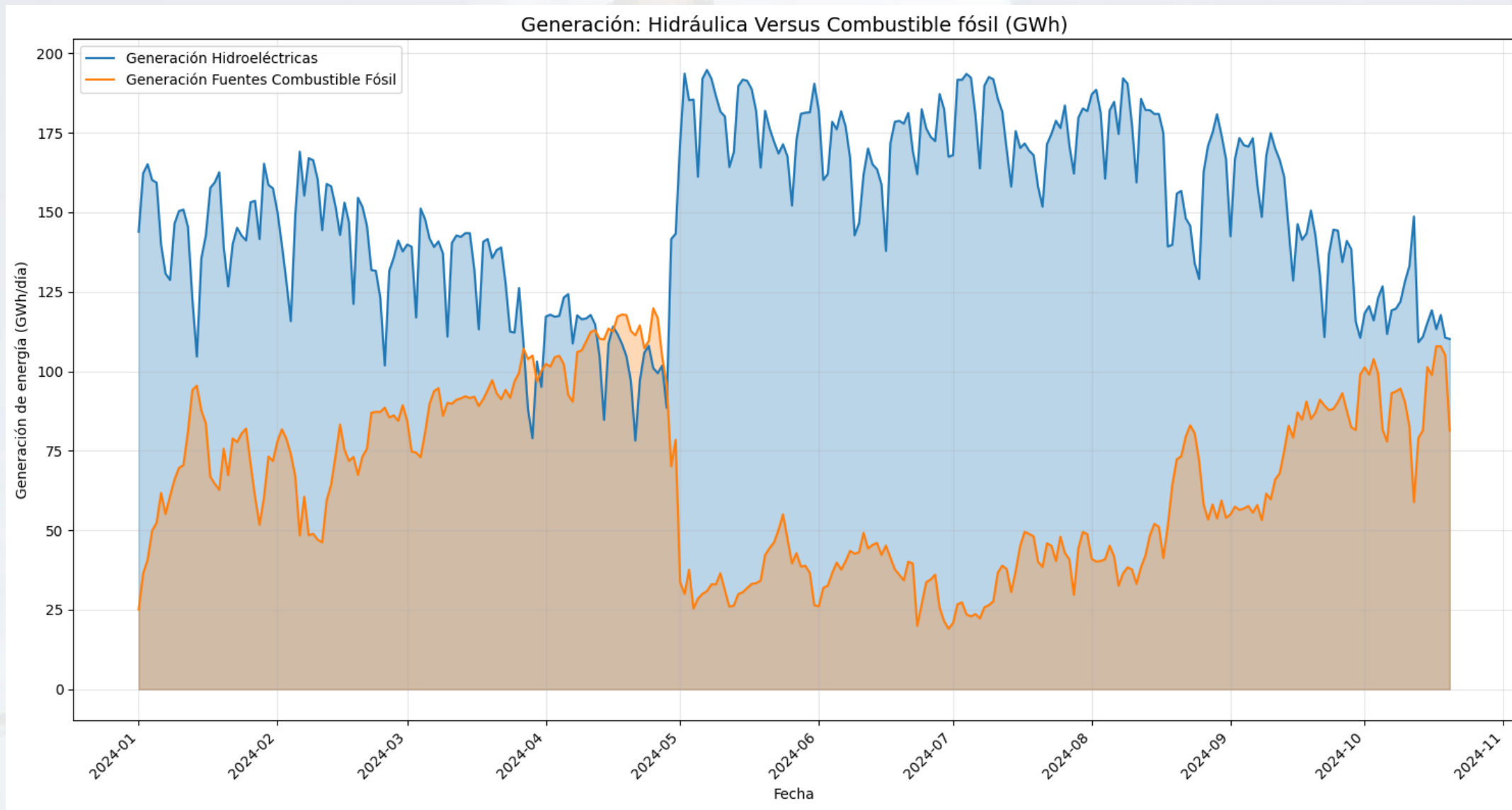
Fuente: XM (operador del Sistema Interconectado y el administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia)

Gráficas: Elaboración propia.

Fenómenos de El Niño: 2009-2010, 2015-2016



Fuente: XM (operador del Sistema Interconectado y el administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia)
Gráficas: Elaboración propia.

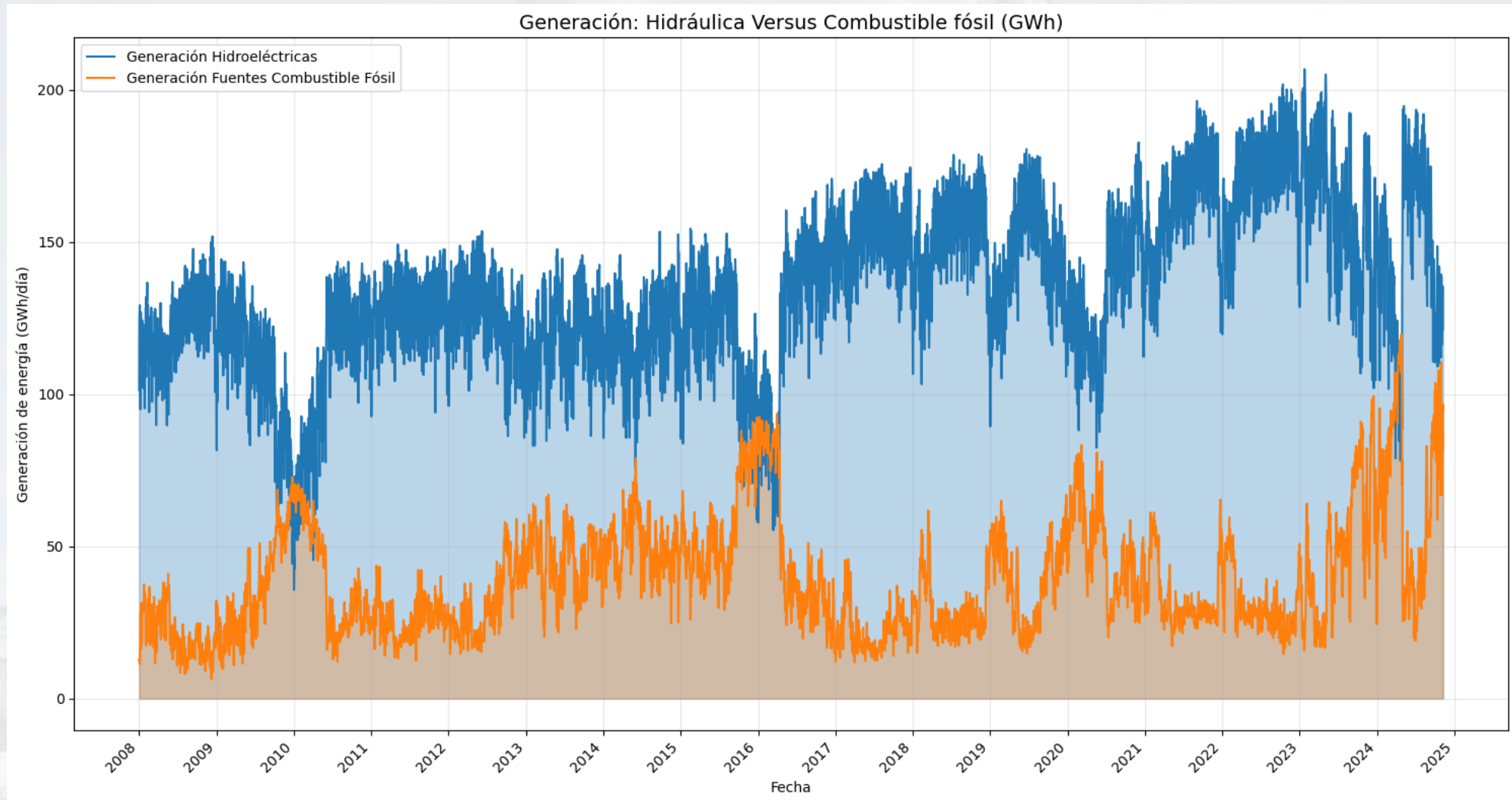




Esto ya lo hemos visto antes ...

Esto ya lo hemos visto antes ...

Durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño **2023-2024** la generación de electricidad a partir de fuentes fósiles, como carbón, gas, diésel y combustóleo, superó a la del parque hidráulico.



Situación de energía eléctrica y gas natural es crítica y las soluciones no dan espera

Bogotá D.C., martes 8 de octubre de 2024. Desde hace más de un año, los gremios del sector energético colombiano que conforman el comité intergremial, ANDESCO, ACOGEN, ANDEG, ASOCODIS, NATURGAS y SER COLOMBIA, han alertado la posibilidad de una crisis sistémica que puede afectar el suministro de energía eléctrica y de gas natural. Hoy aún se evidencian diversas situaciones que amenazan la prestación de estos servicios.

Por ello, el sector hace un llamado urgente al Gobierno Nacional para que se adopten conjuntamente soluciones inmediatas que eviten la interrupción de estos servicios públicos y/o mitiguen incrementos de tarifas en algunos mercados.

De igual manera invitamos al Gobierno Nacional a reducir la incertidumbre en la emisión de señales para el sector y evitar la estigmatización de las empresas de los servicios de energía eléctrica y gas natural; y en su lugar trabajar de manera articulada y colaborativa sobre las soluciones aquí planteadas que se traduzcan en acciones concretas, efectivas y oportunas.

1. Urgen pagos de subsidios y opción tarifaria a empresas comercializadoras de energía cuyos niveles de liquidez pueden afectar la prestación del servicio

A 30 de septiembre el Gobierno adeuda a las empresas de energía eléctrica y gas natural cerca de \$2,5 billones de pesos por concepto de subsidios que mes a mes, hasta ahora, han sido otorgados a los usuarios de estratos 1, 2 y 3. Esto se suma a los saldos de la Opción Tarifaria (cerca de \$4 billones de pesos) y a las deudas de usuarios oficiales. Es decir, el monto total adeudado es cercano a \$7 billones de pesos, que podría incrementarse.

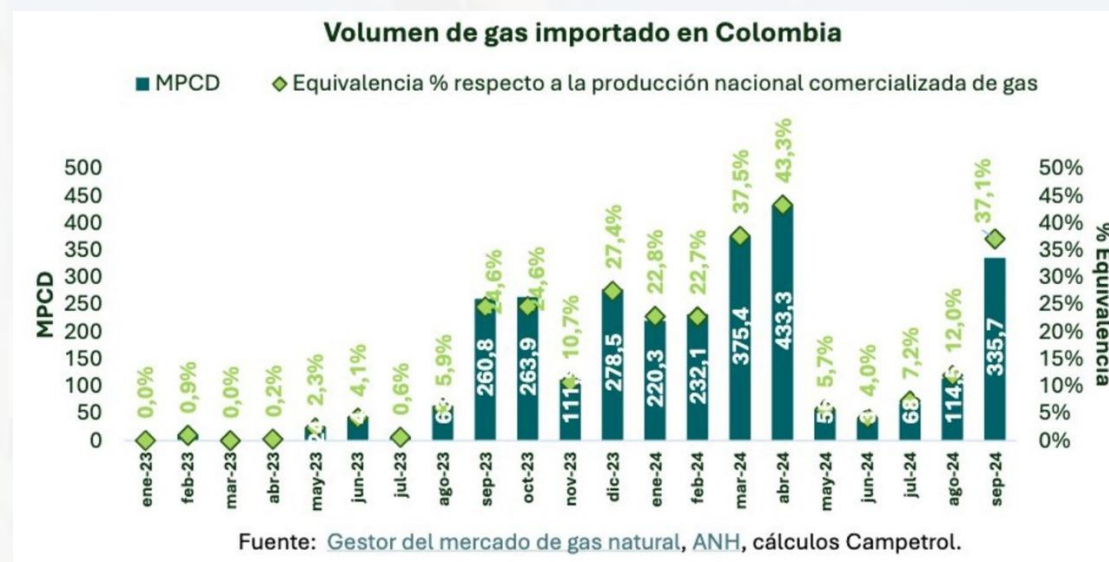
Además, hay déficit en la apropiación de recursos para subsidios correspondientes a 2025 cercano a \$3 billones.

Como los comercializadores deben pagar a los otros agentes que conforman la cadena de prestación, lo anterior afecta estos pagos y, por tanto, representa un riesgo sistémico que podría manifestarse no solo en un apagón financiero sino también físico. Además, el no pago de los subsidios podría por ejemplo representar incrementos del 150% en las facturas de los usuarios del estrato 1.

2. Mitigación de efectos de la intervención de Air-e y adopción de medidas que eviten un riesgo sistémico en el sector eléctrico

La toma de posesión de Air-e generó el congelamiento de deudas previas y el atraso en el pago de las obligaciones corrientes, que superan \$500 mil millones de pesos. Además, se han anunciado y tomado medidas que ponen en riesgo la prestación del servicio de energía,

En octubre Andesco, Acolgen, ANDEG, ASOCODIS, NATURGAS y SERCOLOMBIA emitieron un comunicado sobre la crisis que enfrenta la prestación de los servicios de energía eléctrica y gas natural.

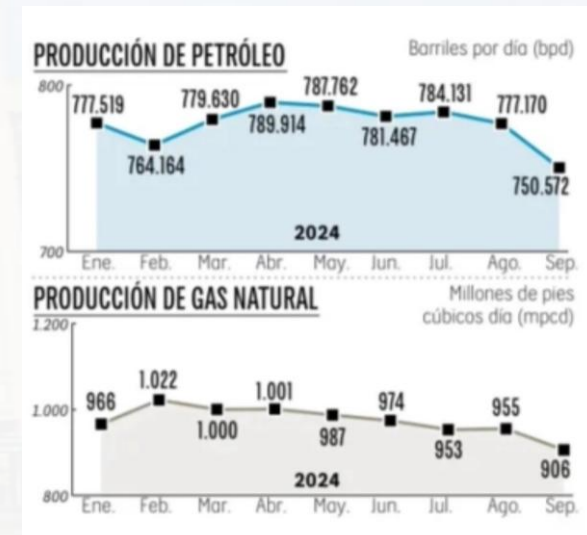
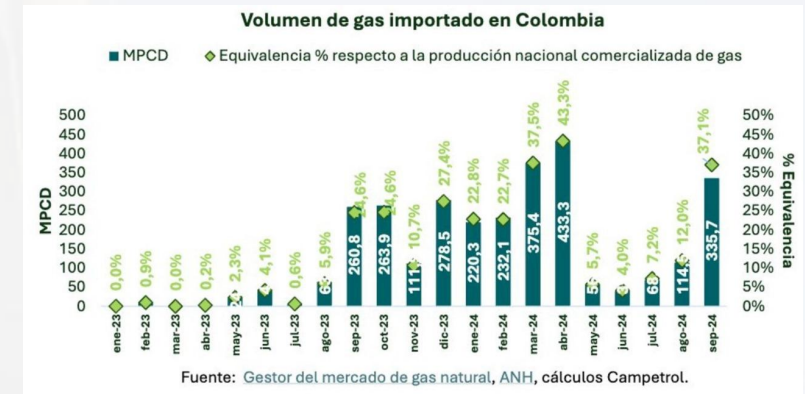


Primera vez en 45 años:
Gas natural **importado** para demanda no térmica:
Hogares, vehículos, comercios e industrias.

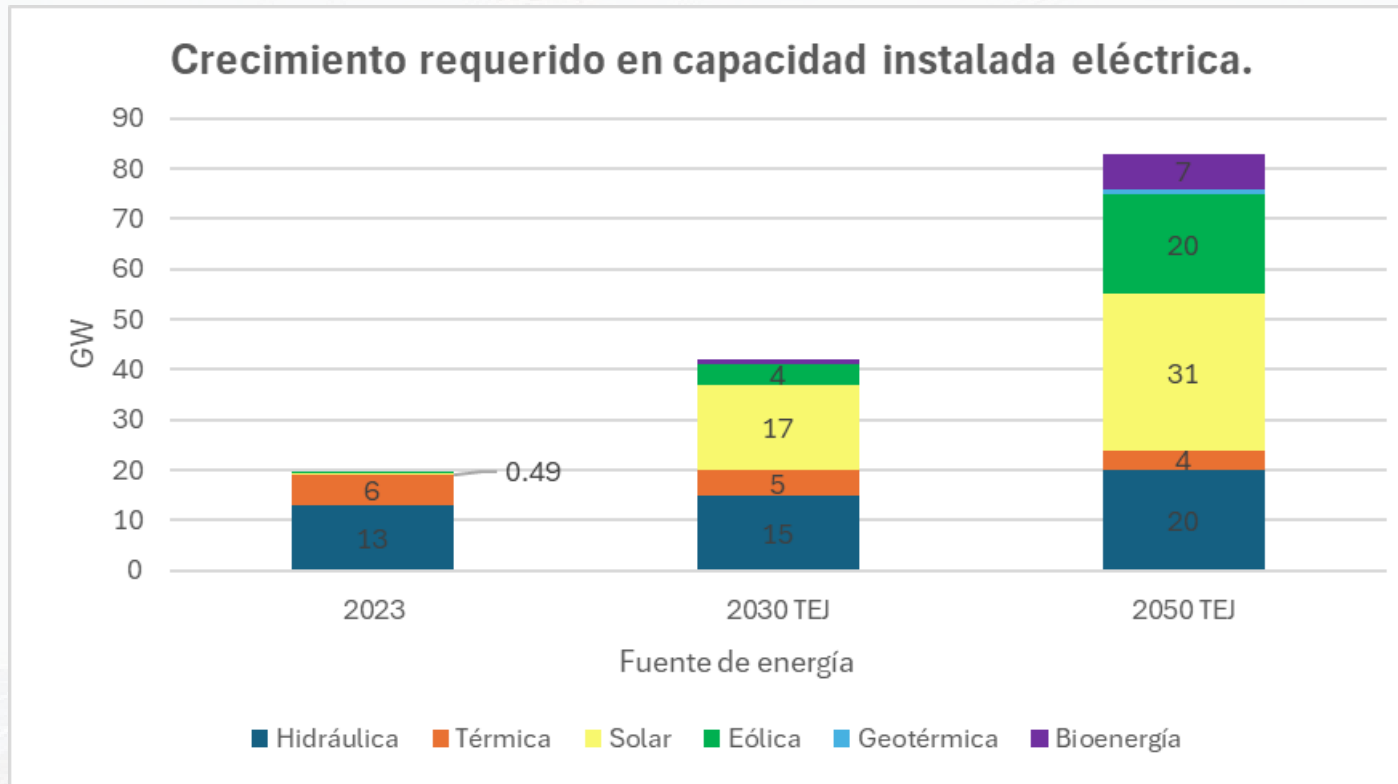
¿Qué implicaciones tiene esto en el contexto energético Colombiano?

La matriz energética no se ve afectada solamente por sequías, sino también por la falta de crecimiento en:

- ❑ La capacidad instalada
- ❑ La exploración de gas y petróleo (Que debilita la capacidad de las térmicas de poder salir al rescate de las hidroeléctricas en situaciones de desabastecimiento)



La capacidad eléctrica instalada **no** es suficiente para enfrentar la creciente demanda ...

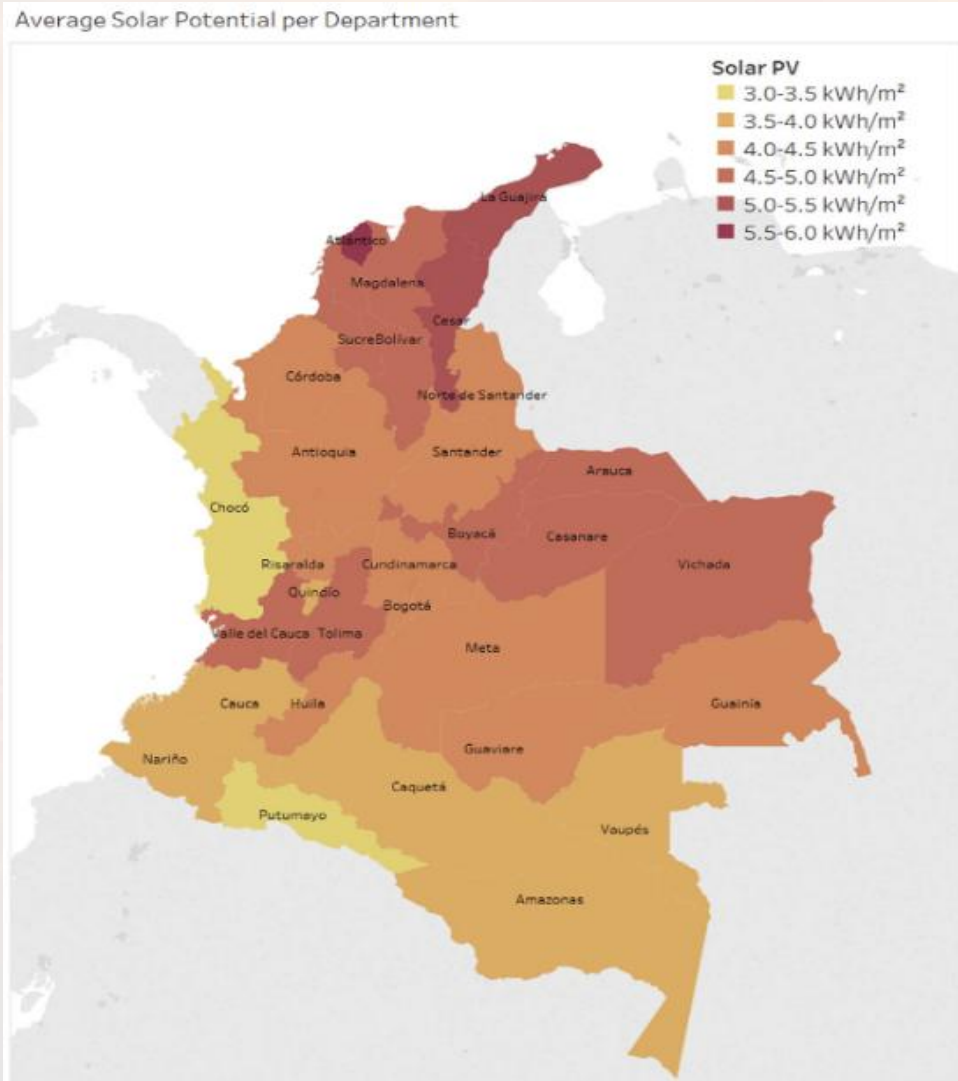


- Crecimiento anual del **11%** para alcanzar la meta al **2030**
- Crecimiento anual del **3%** desde el 2030 para alcanzar la meta al **2050**

¿Por qué el proyecto considera **especialmente** la **energía** renovable **solar** como solución?

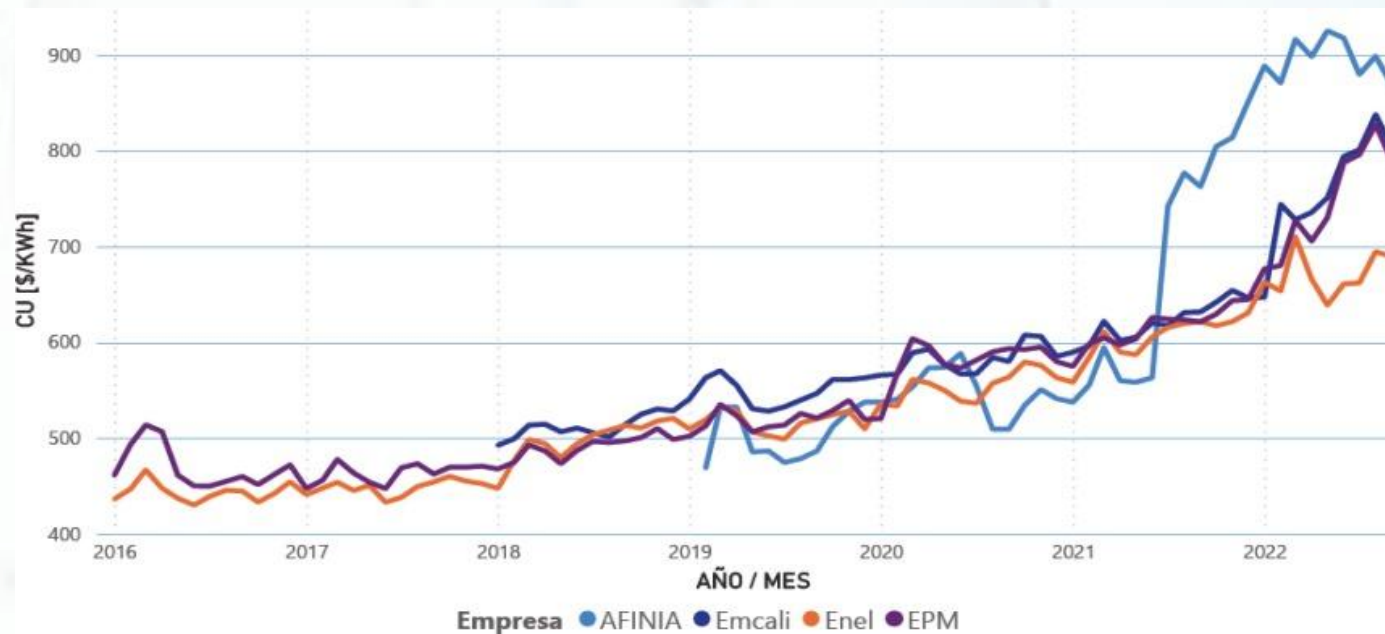
1

Potencial de la energía solar en Colombia



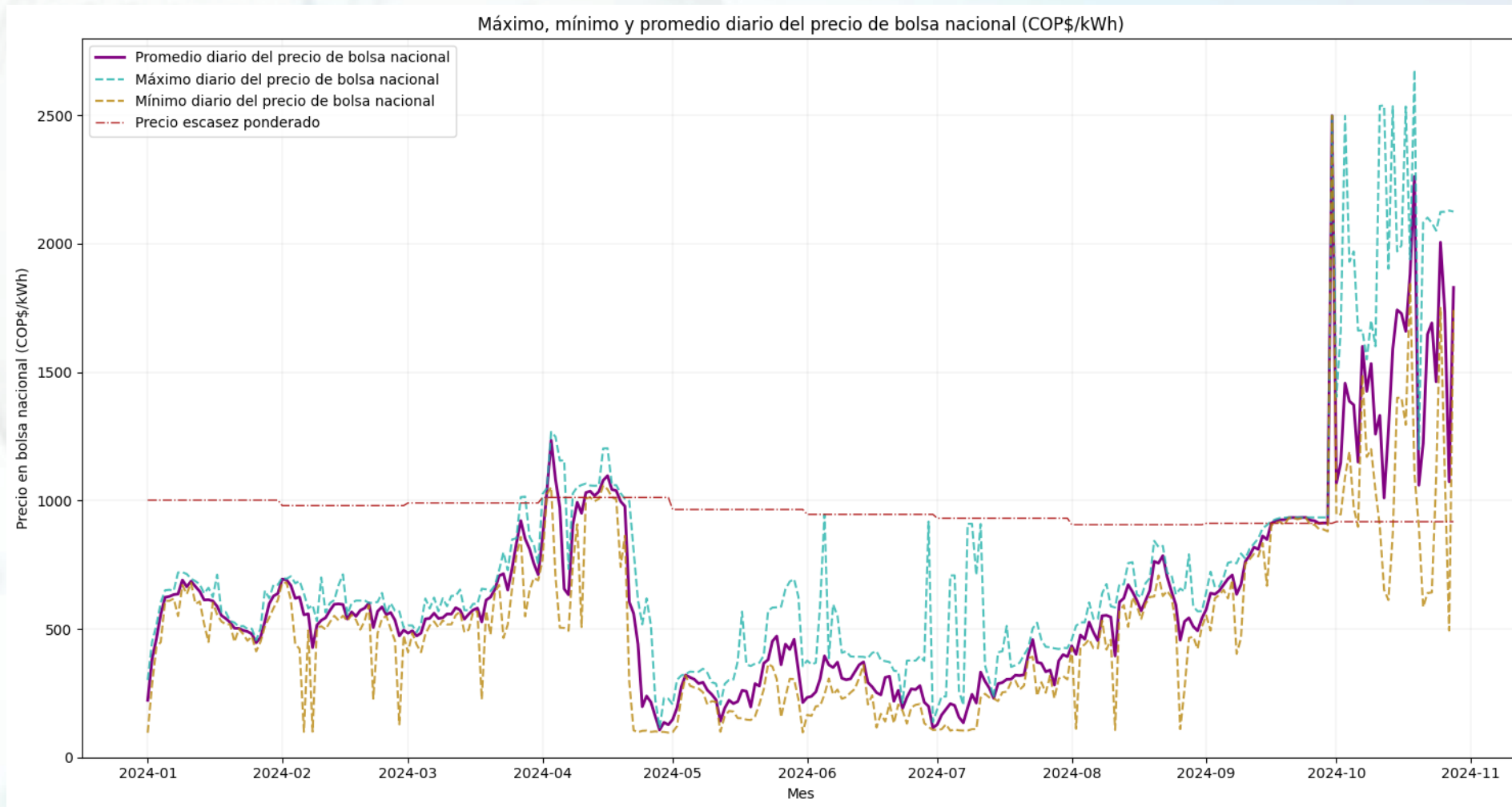
- La radiación solar promedio en Colombia es de: **4,5 kWh/m²/d**
 - Por encima de la media mundial de **3,9 kWh/m²/d**.
- Capacidad instalada operativa del país de energía solar en 2022: **290 MW**
- Se estima que el potencial de energía solar del país es de **32 GW**

Evolución del precio del kWh (\$/kWh)



- Se observa un incremento significativo en el precio histórico del kWh

Evolución del precio del kWh (\$/kWh)



Fuente: XM (Elaboración propia)

¿Por qué el proyecto considera **especialmente** la **energía** renovable **solar** como solución?

2

Reducción en el costo de energías renovables

	Total installed costs			Capacity factor			Levelised cost of electricity		
	(2021 USD/kW)			(%)			(2021 USD/kWh)		
	2010	2021	Percent change	2010	2021	Percent change	2010	2021	Percent change
Bioenergy	2 904	2 162	-26%	72	72	1%	0.082	0.061	-25%
Geothermal	2 904	3 478	20%	87	85	-2%	0.053	0.056	6%
Hydropower	1 407	2 881	105%	44	46	4%	0.042	0.061	47%
Solar PV	5 124	876	-83%	14	17	23%	0.445	0.049	-89%
CSP	10 082	4 274	-58%	30	36	19%	0.38	0.118	-69%
Onshore wind	2 179	1 274	-42%	27	37	35%	0.107	0.033	-69%
Offshore wind	5 217	3 461	-34%	38	42	10%	0.197	0.081	-59%

¿Cómo modelar la generación fotovoltaica?

$$\eta = \eta_r \left[1 - 0.9\beta \frac{Irradiance}{Irradiance_{NOCT}} (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) - \beta(T_a - T_r) \right]$$

La **eficiencia** se modela en función de:

- La **irradiación**.
- La **temperatura** de la célula.
- **Características** de la tecnología del panel.

$$Q_e = N_{panels} * \eta * A [m^2] * Irradiance \left[\frac{W}{m^2} \right] * \Delta t$$

$$Q_e = N_{panels} * [(\eta - (1 - \eta_{inversor})) * A [m^2] * Irradiance \left[\frac{W}{m^2} \right] * \Delta t$$

Obtención de datos de temperatura e irradiación



- IDEAM: Datos de irradiación obtenidos de piranómetros en las áreas de estudio.
- POWER LARC NASA: Obtención de datos de la NASA por medio de reanálisis.

Caso de estudio

Llanogrande, Rionegro, Antioquia

- 
- **Expansión urbana**
 - **Boom de viviendas**
 - **Medición**

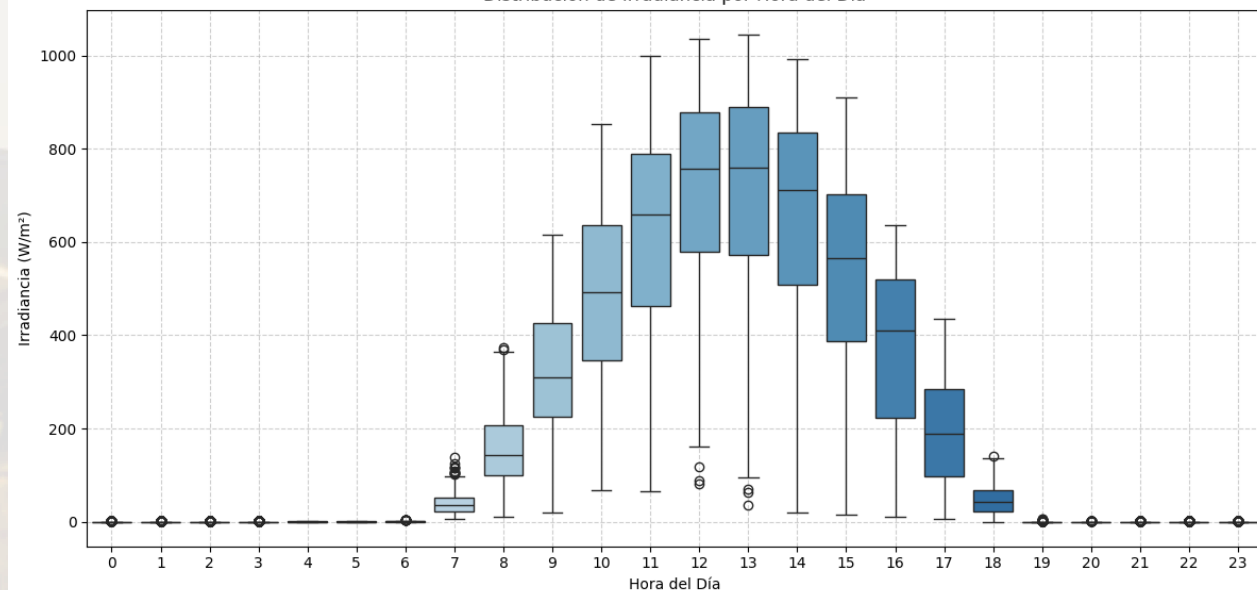


Datos de irradiación y temperatura

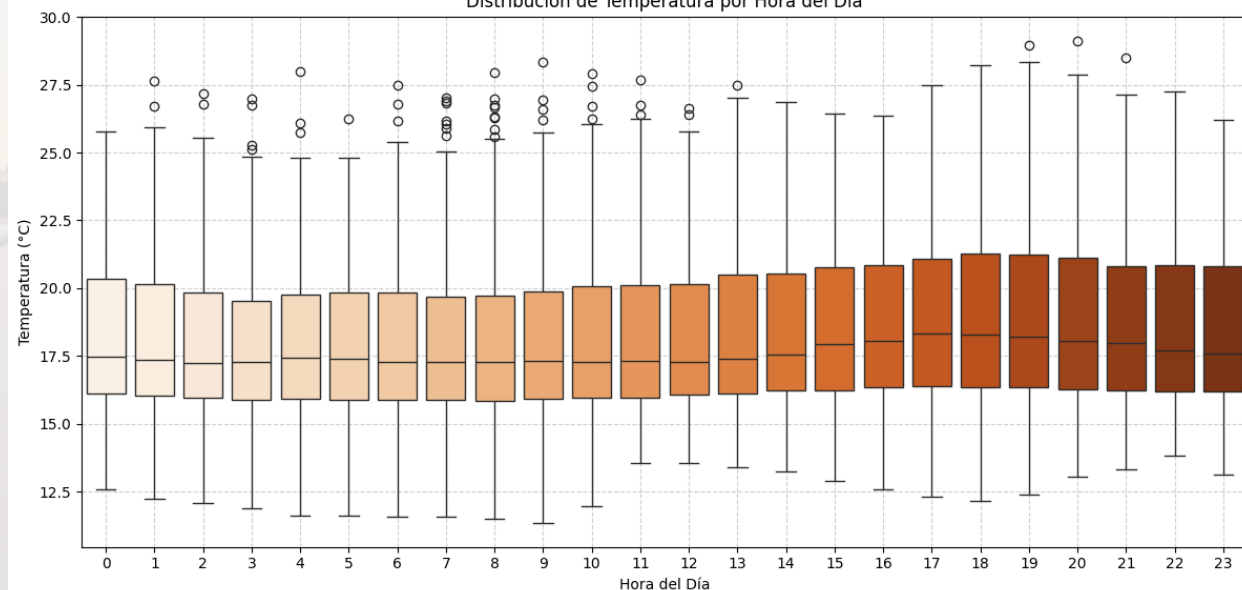
En Llanogrande



Distribución de Irradiancia por Hora del Día



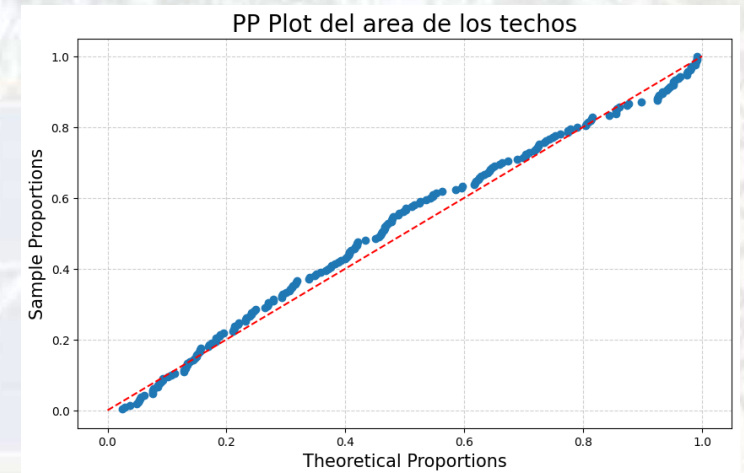
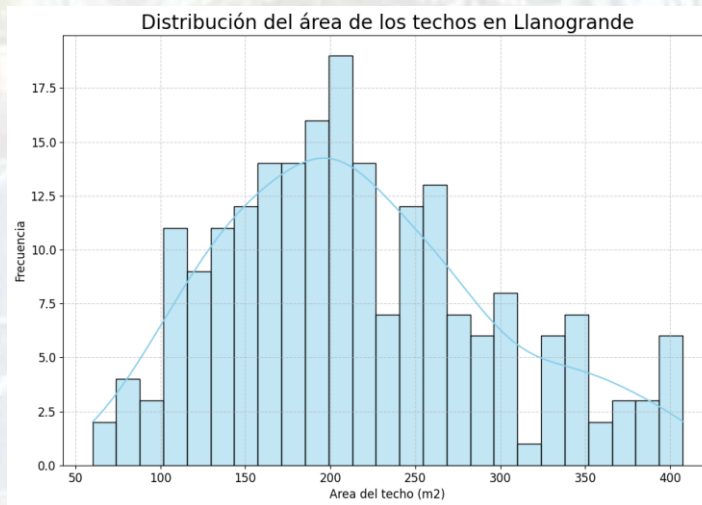
Distribución de Temperatura por Hora del Día



Techos de casas en áreas residenciales en Llanogrande



Techos de casas en áreas residenciales en Llanogrande



```
> ajuste$estimate
      mean      sd
215.98405  79.62959
> plot(ajuste)
> ## P-Value de la prueba de Chi-Cuadrado
> resultados$chisqpvalue
[1] 0.3445786
> cat("P-Value de la prueba de Chi-Cuadrado:", resultados$chisqpvalue)
P-Value de la prueba de Chi-Cuadrado: 0.3445786
```

De área a número de paneles

Dimensiones (mm)		Dimensiones (m)	
2278	1134	2.278	1.134
2120	1052	2.12	1.052
2279	1134	2.279	1.134
1689	996	1.689	0.996

Promedio	2.0915	1.079
Area requerida	13.1309785	

$\text{Área por panel} = (\text{Espacio horizontal} + \text{Ancho del panel}) * (\text{Espacio Vertical} + \text{Alto del panel}) = 13.13 \text{ m}^2$

$$\text{Número de paneles} = \frac{\text{Área util del techo}}{13.13 \text{ m}^2}$$

Normativas de las jurisdicciones estadounidenses:

Soporte horizontal: 1.5m- 3m

Soporte vertical: 0.9m – 1.5m

Aspectos importantes a considerar:

Sombras (Al ser el caso de estudio en un Valle y al haber observado bien la zona)

Perfil de demanda de un hogar Colombiano

Tecnologías de comunicación e información

Televisión, 3 teléfonos, 3 computadores

Iluminación

10 bombillas activas

Electrodomésticos del hogar

Lavadora, estufa, horno, microondas, licuadora, plancha, secador de pelo y sistema de sonido

Elemento del hogar	Rango de uso (horario)	Semana/ Fin de Semana	Demanda [W/día]	Probabilidad de uso (por día)	Actividad en rango de tiempo
Nevera	24h	Ambos	1440	1	Constante
Tecnologías de comunicación e información	12:00 - 24:00	Ambos	1485	0.8	Constante
Iluminación	06:00-8:00 ; 18:00 - 24:00	Semana	240	1	Constante
Iluminación	18:00 - 24:00	Fin de Semana	240	1	Constante
Iluminación	18:00 - 24:00	Ambos	240	0.5	1h
Estufa	18:00 - 20:00	Semana	3000	1	1h
Estufa	12:00 - 14:00	Fin de Semana	3000	1	1h
Lavadora de ropa	08:00 - 10:00	Ambos	1200	0.5	1h
Horno	12:00 - 14:00	Ambos	1200	0.25	1h
Microondas	18:00 - 20:00	Ambos	400	0.28	1h
Licuadora	12:00 - 14:00	Ambos	1200	0.14	1h
Plancha	14:00 - 17:00	Fin de Semana	1200	0.5	1h
Secador de pelo	06:00 - 07:00	Ambos	1780	0.07	1h
Sistema de sonido	18:00 - 20:00	Ambos	80	0.42	1h

Fuente: Adaptado con datos de la Ref. [Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market] y modificado con el Simulador Codensa

Perfil de demanda de un hogar Colombiano

Tecnologías de comunicación e información

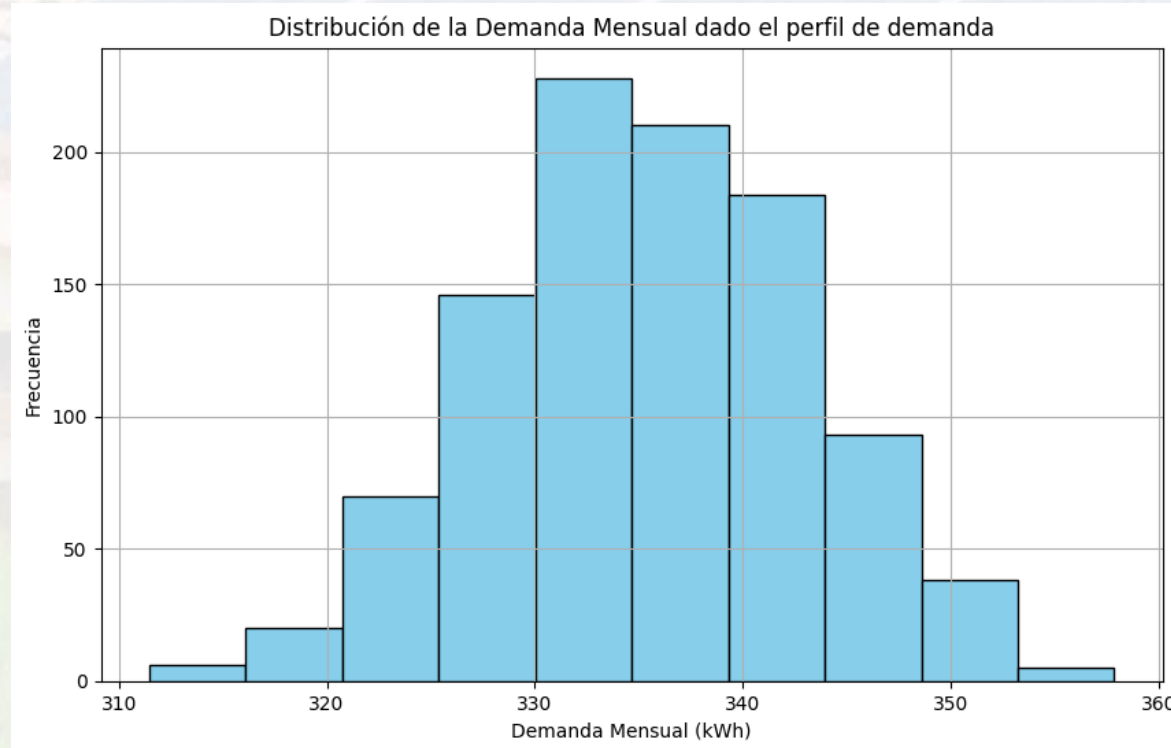
Televisión, 3 teléfonos, 3 computadores

Iluminación

10 bombillas activas

Electrodomésticos del hogar

Lavadora, estufa, horno, microondas, licuadora, plancha, secador de pelo y sistema de sonido



Fuente: Adaptado con datos de la Ref. [Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market] y modificado con el Simulador Codensa

Marco legal: Normatividad y aspectos legales

- **Artículo 11 de la Ley 143 de 1994:** Autogenerador → aquel generador que produce energía eléctrica para atender sus necesidades.
- **Ley 1715 de 2014** promueve el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía.
 - Confirió a la CREG la facultad de definir las normas para la remuneración de los excedentes.
- **Medidor bidireccional:** Créditos de energía y venta de excedentes de acuerdo con la **CREG** en la **resolución 174 de 2021**. Según los términos del **artículo 26** de la resolución y la **Resolución CREG 135 de 2021** sobre derechos de los usuarios autogeneradores

$$CUv_{n,m} = G_m + T_m + D_{n,m} + Cv_m + PR_{n,m} + R_m \quad \text{Costo unitario de prestación del servicio}$$

valoración del excedente del AGPE u (en \$), en el mes m, que se encuentra en el nivel de tensión n, en el mercado de comercialización j y que es atendido por el comercializador i. Es ingreso para el usuario cuando esta variable sea mayor a cero de la siguiente manera:

$$VE_{i,j,n,m,u} = (EXC_{i,j,m,u} - Imp_{i,j,m,u}) * CU_{v_{n,m,i,j}} - [EXC1_{i,j,m,u} * C_{v_{m,i,j}}] - [EXC1_{i,j,m,u} * (T_m + D_{n,m} + PR_{n,m,i,j} + R_{m,i})] + \sum_{h=hx, hx+1, \dots, H} Exc2_{i,j,m,h,u} * Pbolsa_{h,m}$$

Marco legal: Normatividad y beneficios fiscales

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética

A aquella persona que invierta en proyectos de FNCE se le otorgará:

- ✓ Una **deducción de renta del 50% de la inversión** realizada en el proyecto hasta por 15 años.
- ✓ **Se le excluirá de IVA** en la compra de equipos, elementos, maquinaria o la adquisición de servicios necesarios para el proyecto.
- ✓ Se obtiene el **beneficio de exención arancelaria en la importación de maquinaria** y otros insumos necesarios para el proyecto y se permitirá la depreciación acelerada de activos, aplicable a equipos, maquinaria y obras civiles para el proyecto.

<i>Costo Certificado de la UPME:</i>	$0 \text{ UTV} < \text{Valor inversión en UTV} < 275 \text{ UTV}$:	1.2 UTV
	$275 \text{ UTV} \leq \text{Valor inversión en UTV} < 826 \text{ UTV}$:	3.4 UTV
	$826 \text{ UTV} \leq \text{Valor inversión en UTV} < 1652 \text{ UTV}$:	6.7 UTV

Construcción del modelo financiero

Generación_i [kWh]: Valor de generación a partir de los datos hidrometeorológicos en cada ciudad para cada periodo i

Consumo_i [kWh] : Valor de consumo para cada periodo i

$$Excedentes_i = \Delta_i = G_i - C_i$$

*Ahorro [COP]_i: SI(Excedentes > 0; Consumo * Precio kWh; Generación * Precio kWh) $\forall i \in \text{Periodos}$*

*Ingresos por excedentes_i [COP]: SI(Excedentes > 0; Excedentes * (Precio kwh - C_{v_m}); 0) $\forall i \in \text{Periodos}$*

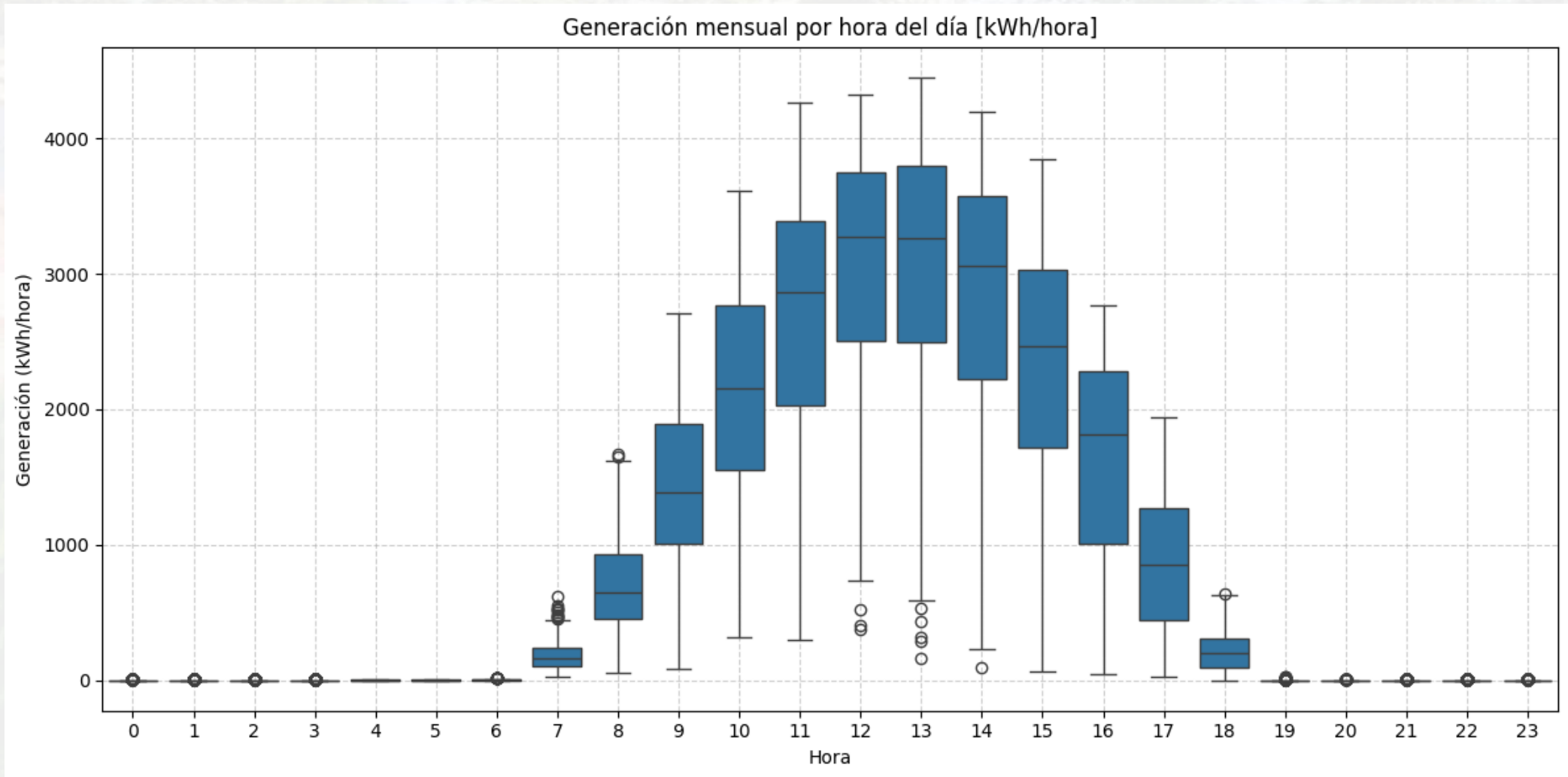
OPEX_i: Mantenimiento anual del sistema $\forall i \in \text{Periodos}$

CAPEX: Valor de la instalación del proyecto

Flujo de caja antes de impuestos_i: Ahorro_i + Ingresos_i - OPEX_i - CAPEX (periodo inicial)

Flujo de caja después de beneficios tributarios = F.C. antes de impuestos + Beneficios tributarios

Implementación: Generación



Fuente: Elaboración propia. Datos Generación según el caso de estudio

Modelo Determinístico: Implementación: FC, VPN, TIR & Capacity Factor

$$VPN = I_0 + \sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1+i)^t} = COP \ 26,770,916.64$$

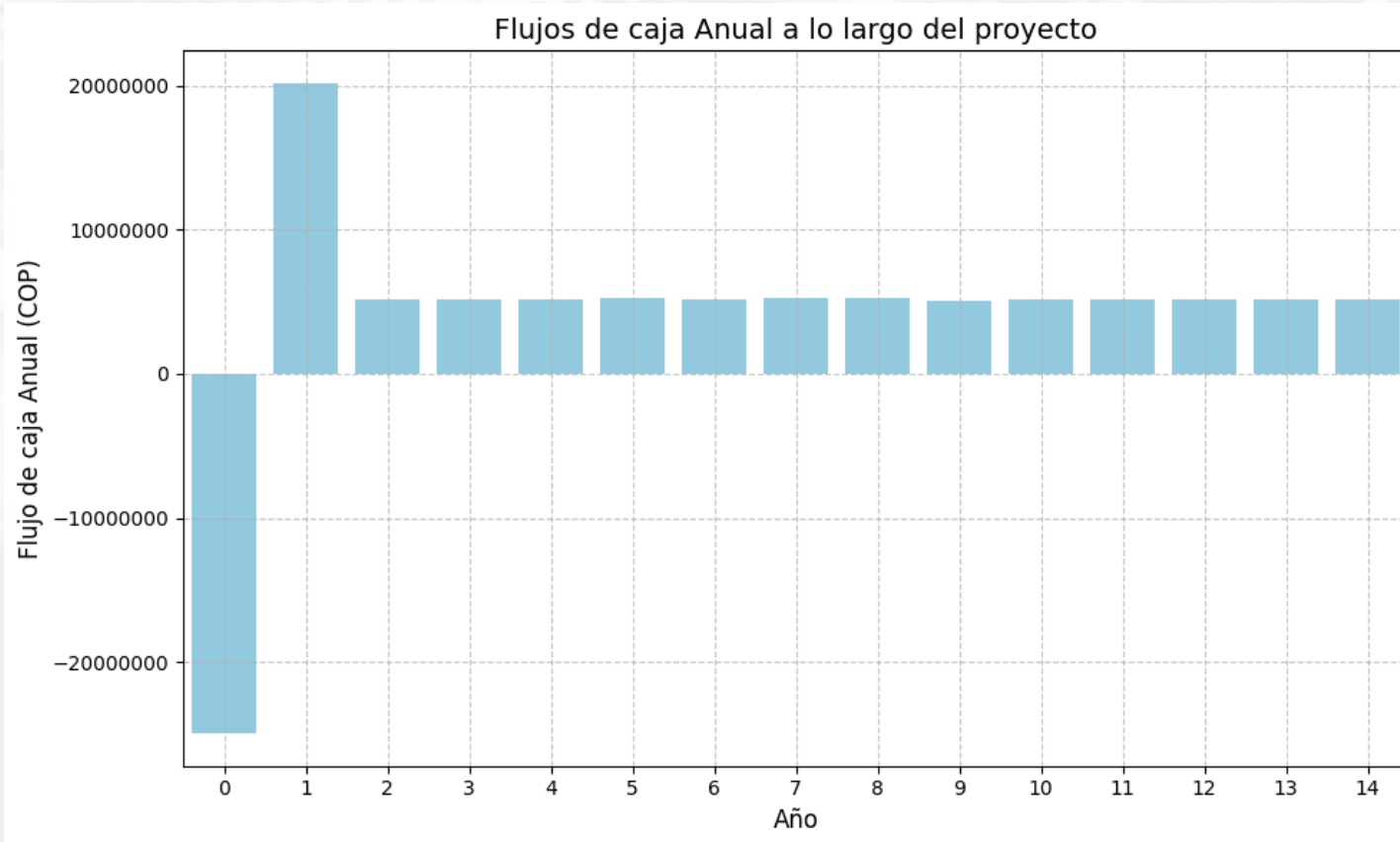
$$TIR = I_0 + \sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1+i)^t} = 0 \rightarrow TIR = 9.25\%$$

$$Capacity\ Factor = \frac{Energía\ generada}{Potencia\ Nominal * T}$$

$$Capacity\ Factor = 22.19\%$$

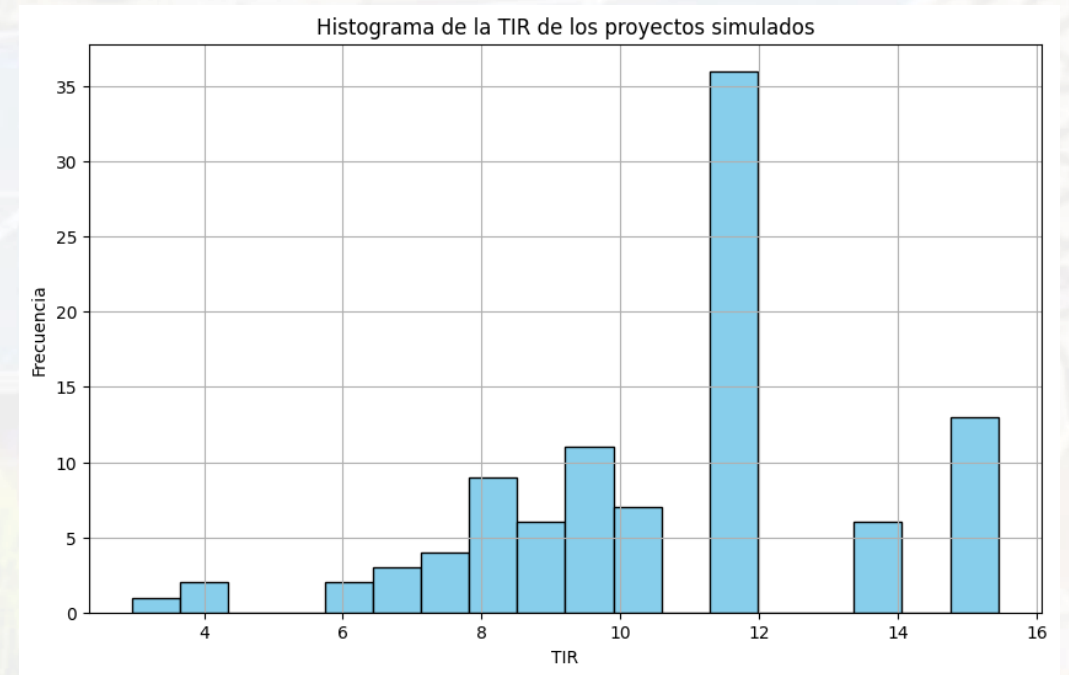
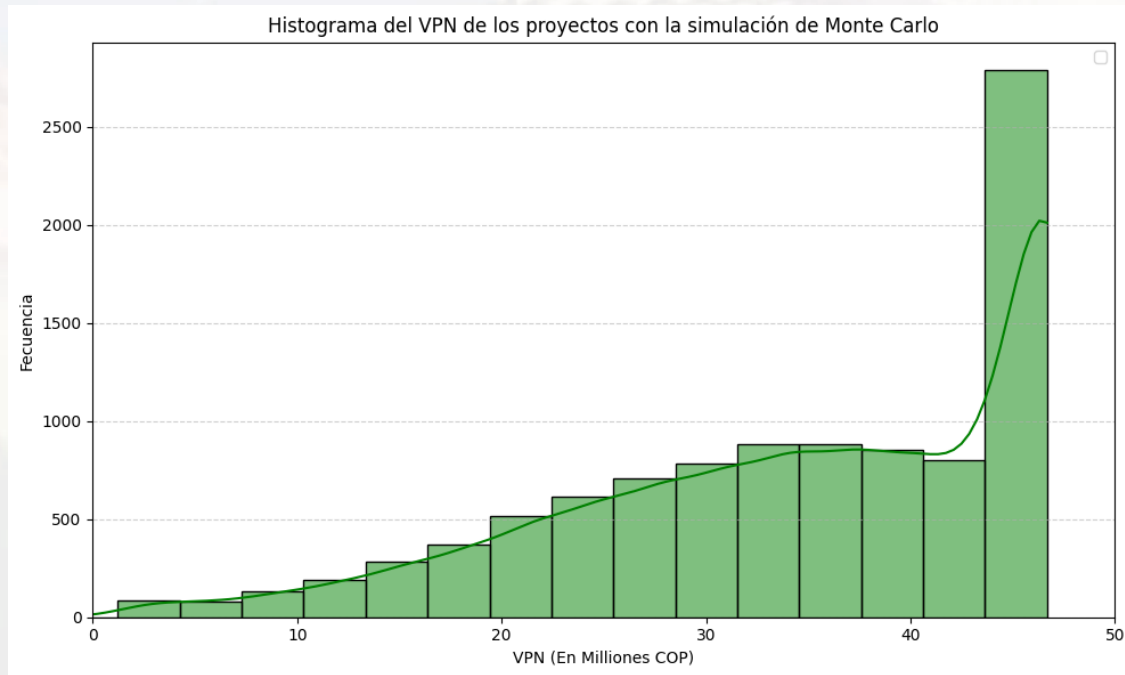
$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_t}{(1+WACC)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{EnergíaGenerada_t}{(1+WACC)^t}}$$

$$LCOE = COP \ 353.956$$



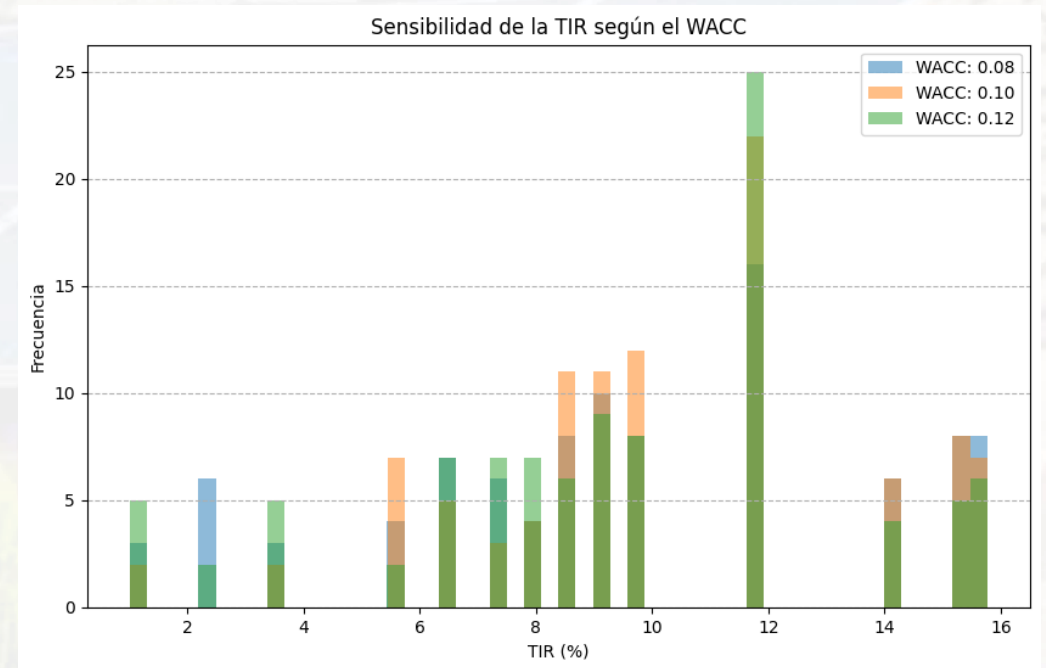
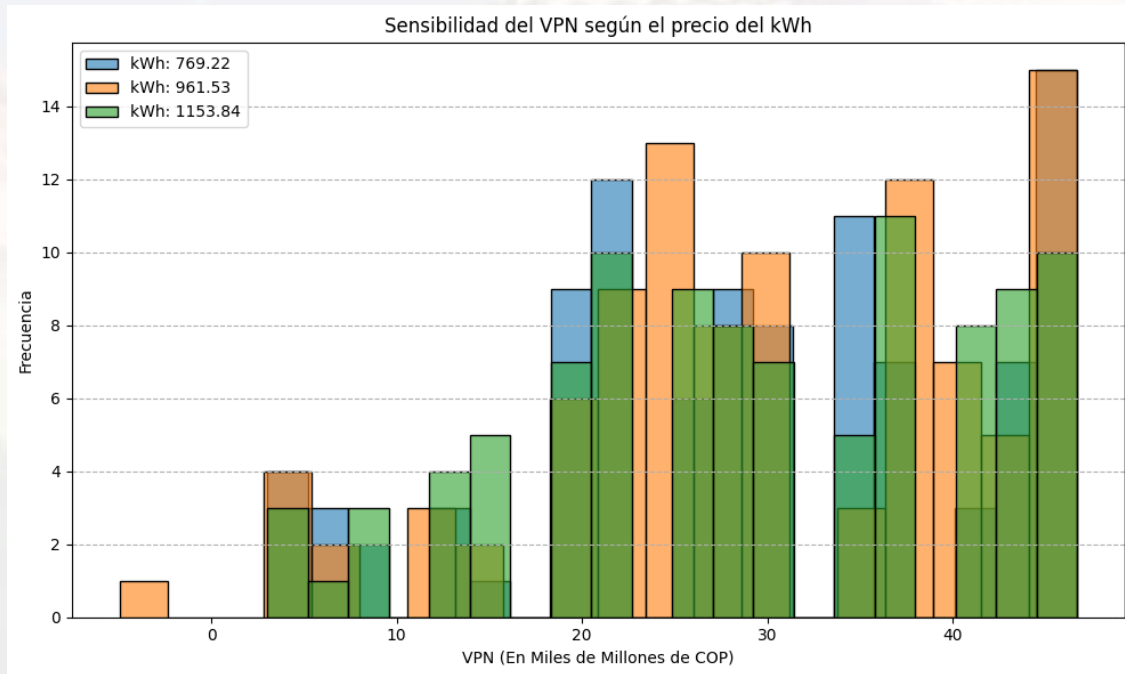
Fuente: Elaboración propia.

Implementación: Simulación de Monte Carlo



Implementación: Simulación de Monte Carlo

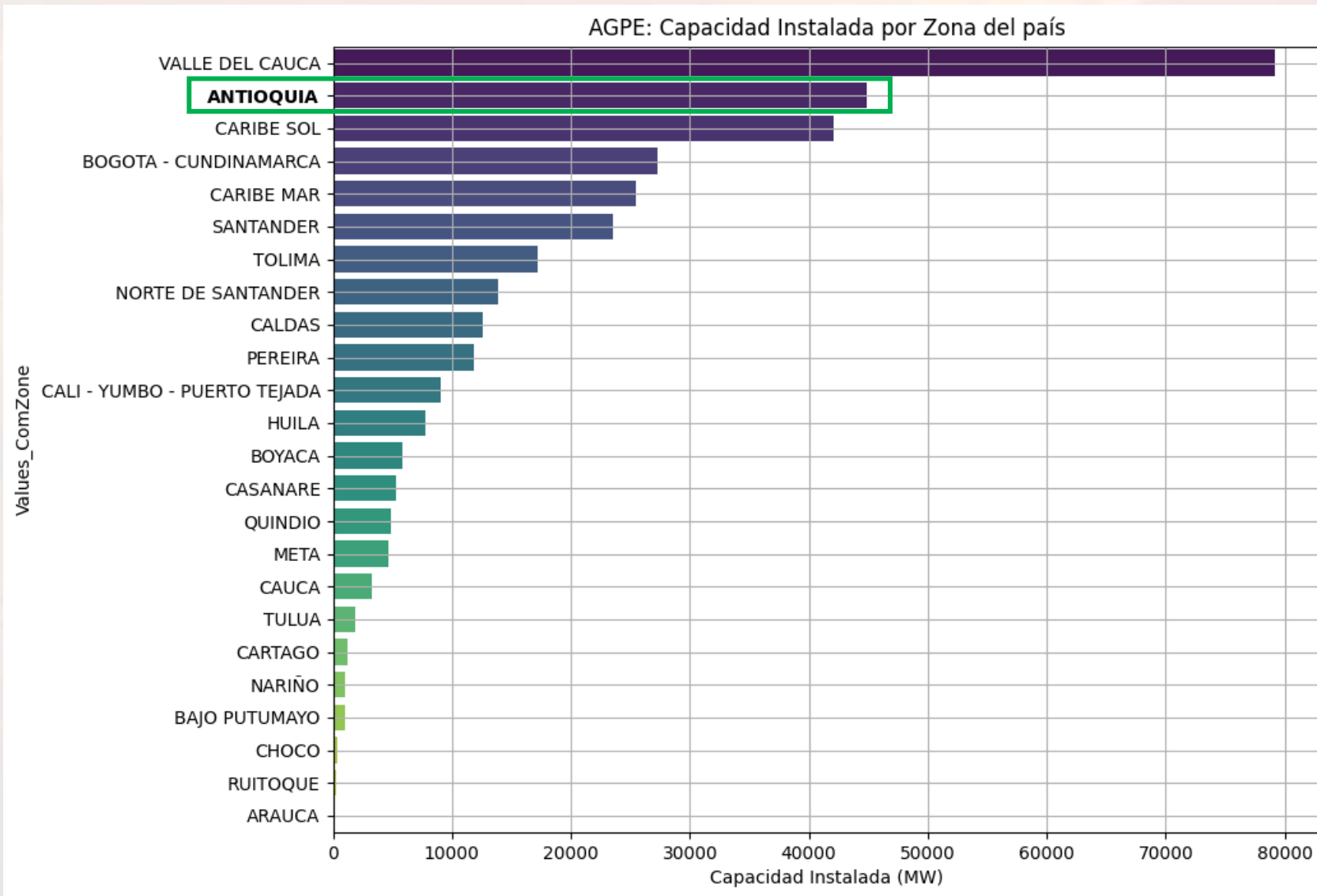
Análisis de Sensibilidad



Distribuciones ligeramente diferentes a la rentabilidad proyectada → **Robustez**

Fuente: Elaboración propia.

AGPEs en Colombia



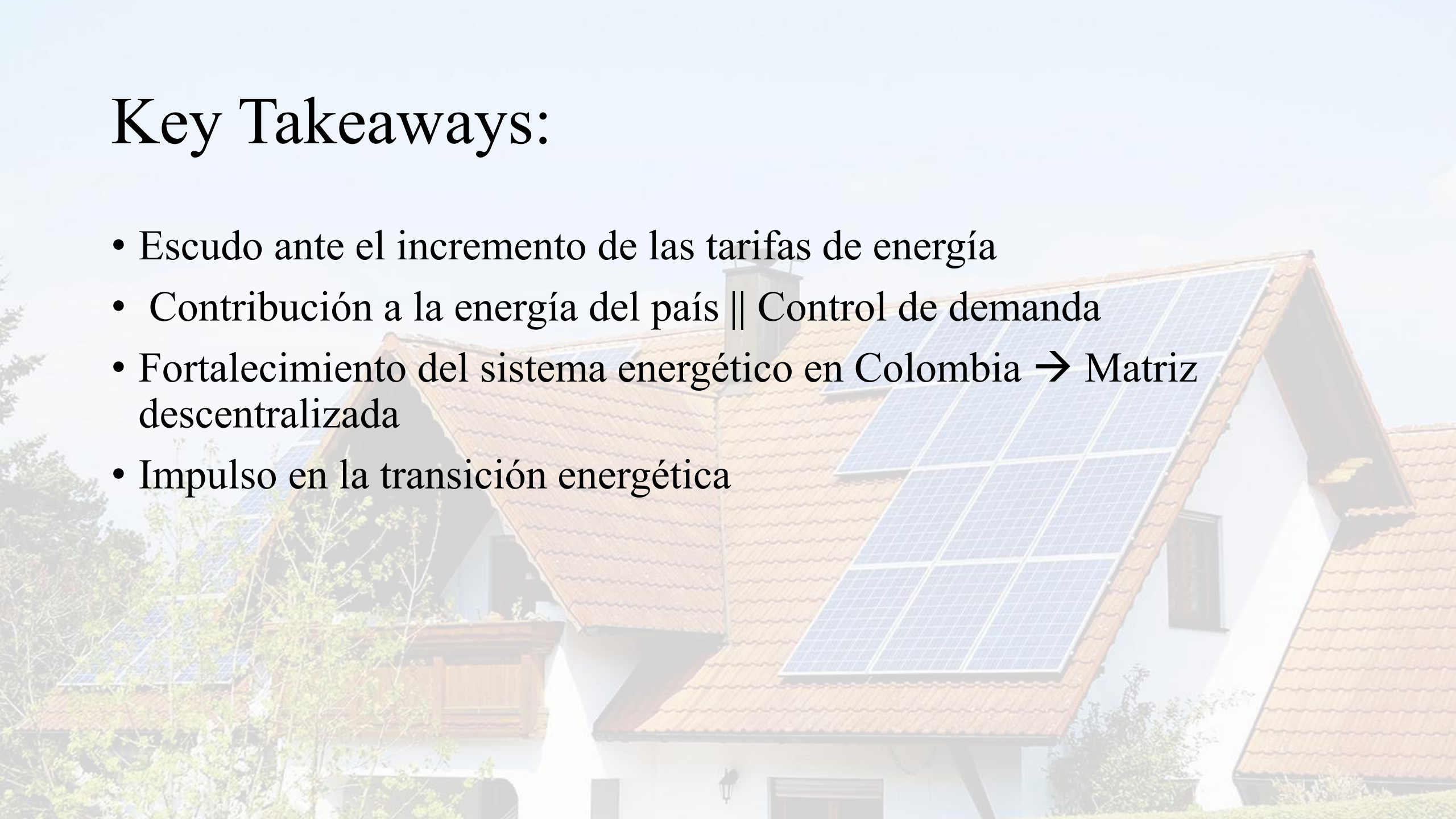
La región Antioqueña cuenta con
3,515 AGPE

Confiabilidad del Sistema en Colombia



Key Takeaways:

- Escudo ante el incremento de las tarifas de energía
- Contribución a la energía del país || Control de demanda
- Fortalecimiento del sistema energético en Colombia → Matriz descentralizada
- Impulso en la transición energética



A photograph of a two-story house with a red-tiled roof. A large array of blue solar panels is installed on the right side of the roof. A chimney is visible on the roofline. The house has white walls and a wooden balcony on the left. The image is slightly faded, and the text '¡Muchas gracias!' is overlaid in the center.

¡Muchas gracias!

A photograph of a house with a red-tiled roof and solar panels. The house is white with a balcony. The background is a clear blue sky with some clouds. The text is overlaid on the image.

Y gracias por ser parte de la recta final de mi
sueño de ser Ingeniero Uniandino