

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.

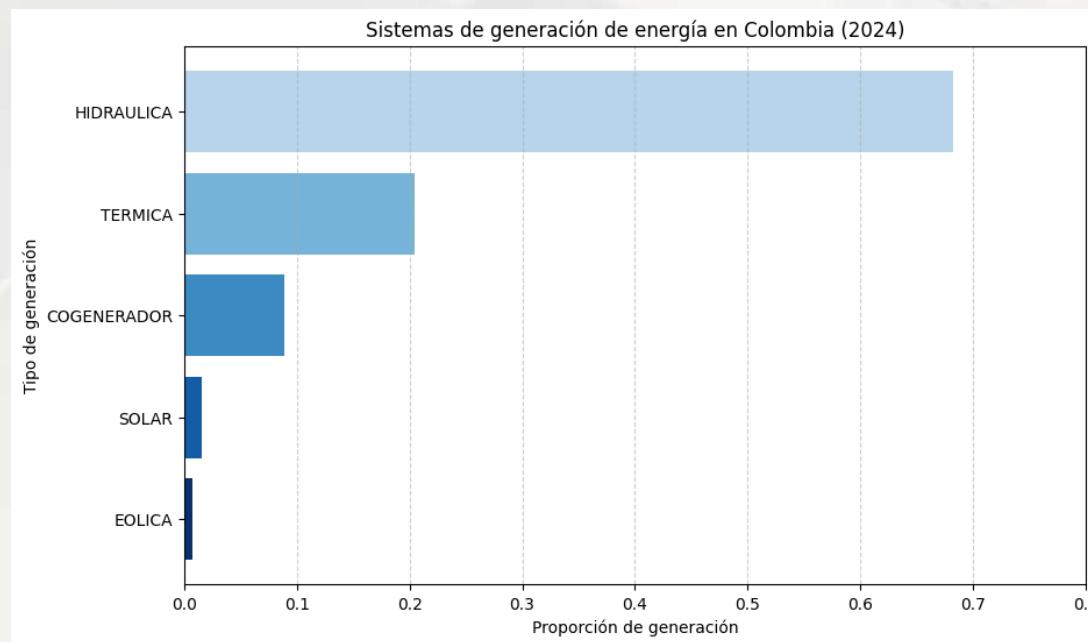
Nicolas Alvarez Ortiz

Tesis de Pregrado – Ingeniería Industrial

202020565

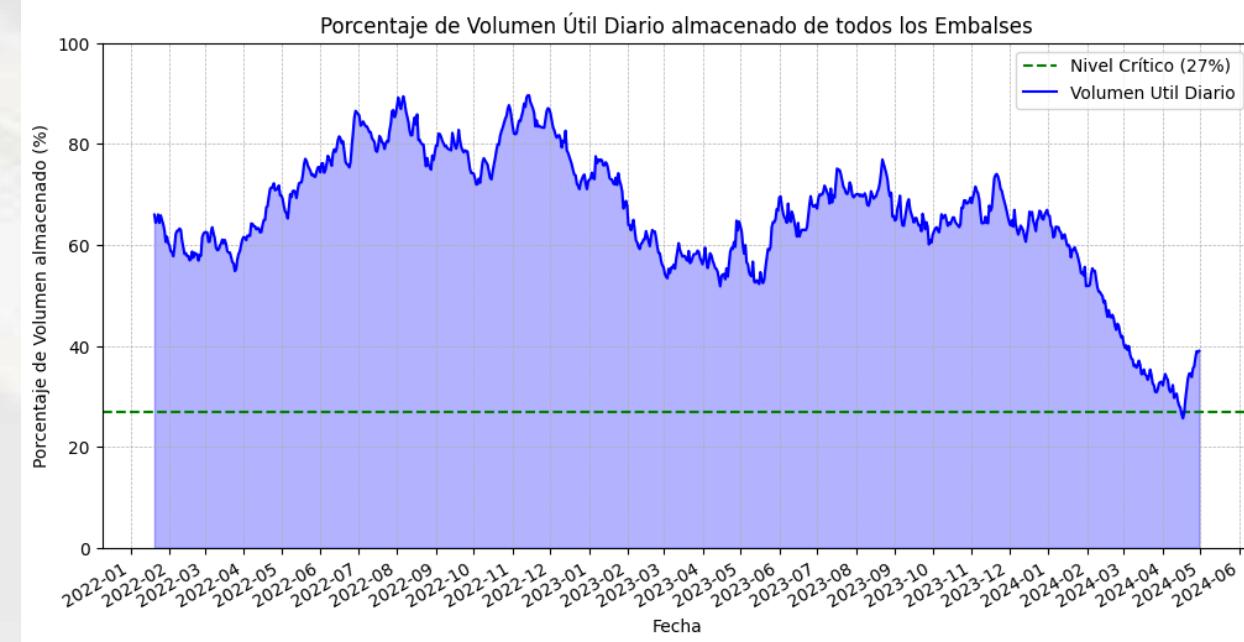
¿Cómo se ve la matriz energética de Colombia?

≈ 70% De la generación es hidroeléctrica



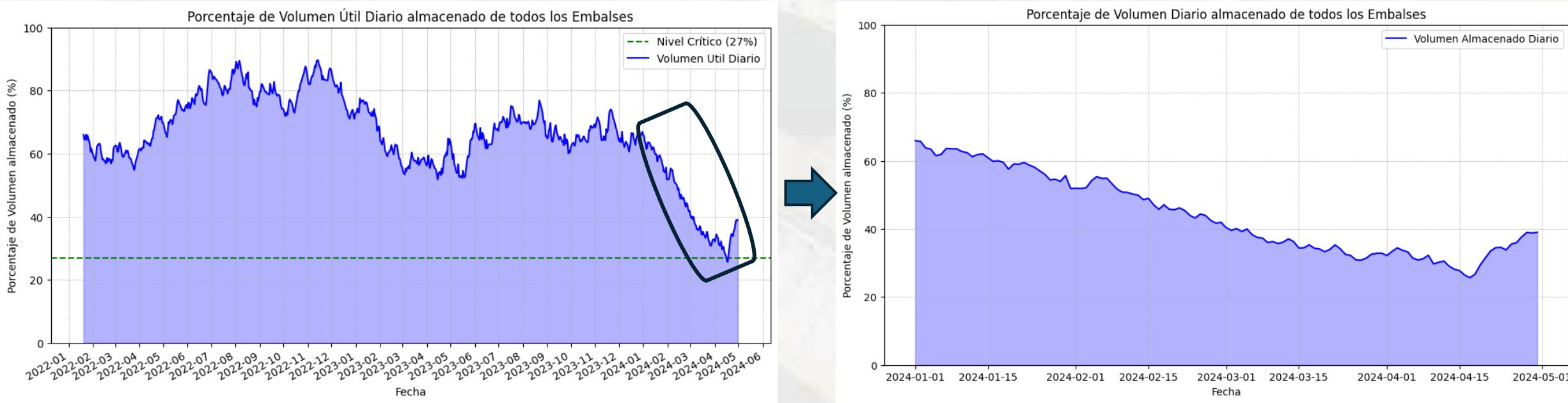
¿Qué pasó en el primer semestre del año?

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



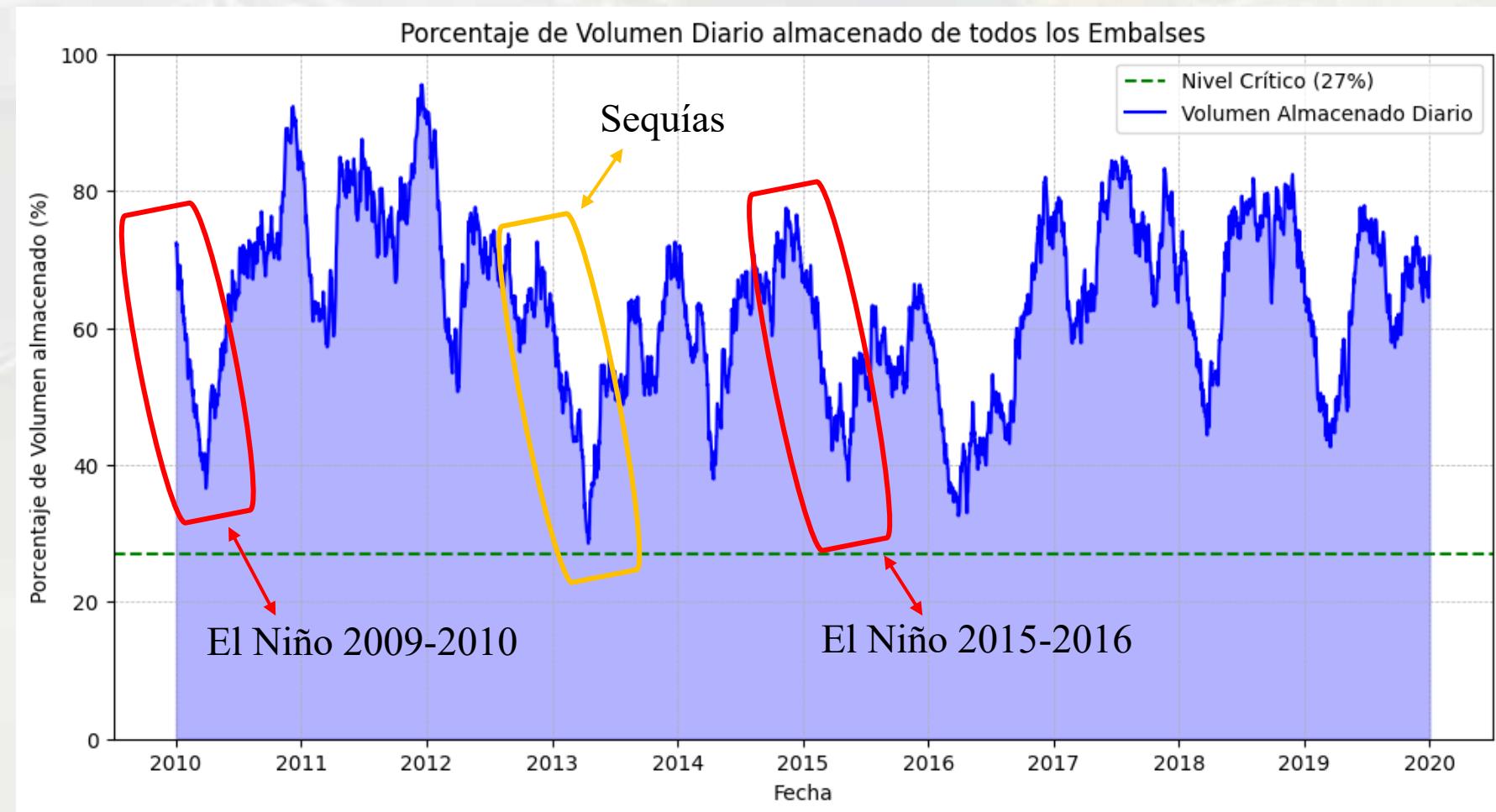
Fuente: XM (operador del Sistema Interconectado y el administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia)
Gráficas: Elaboración propia.

- 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**.

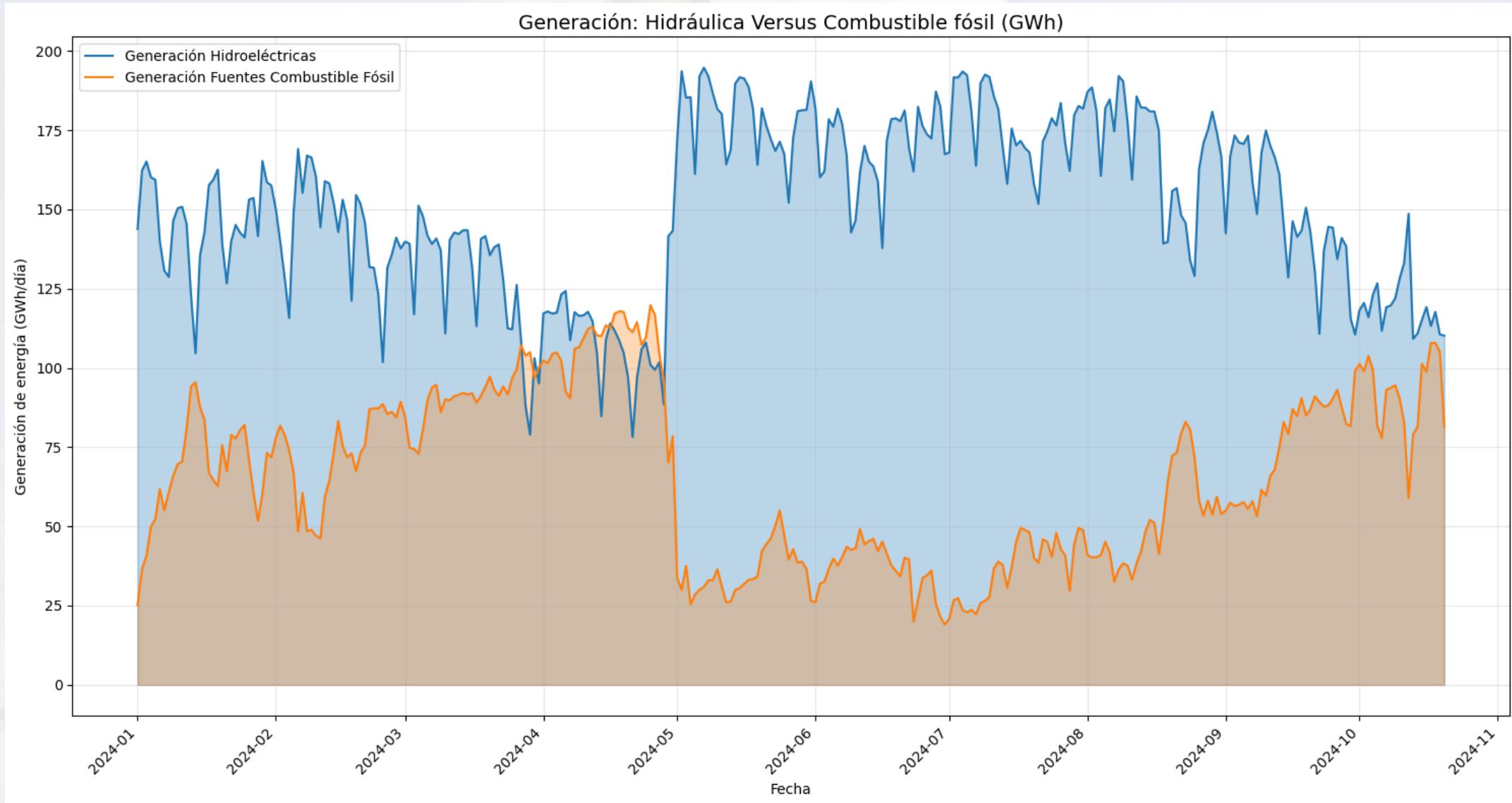


Fuente: XM (operador del Sistema Interconectado y el administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia)
 Gráficas: Elaboración propia.

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.



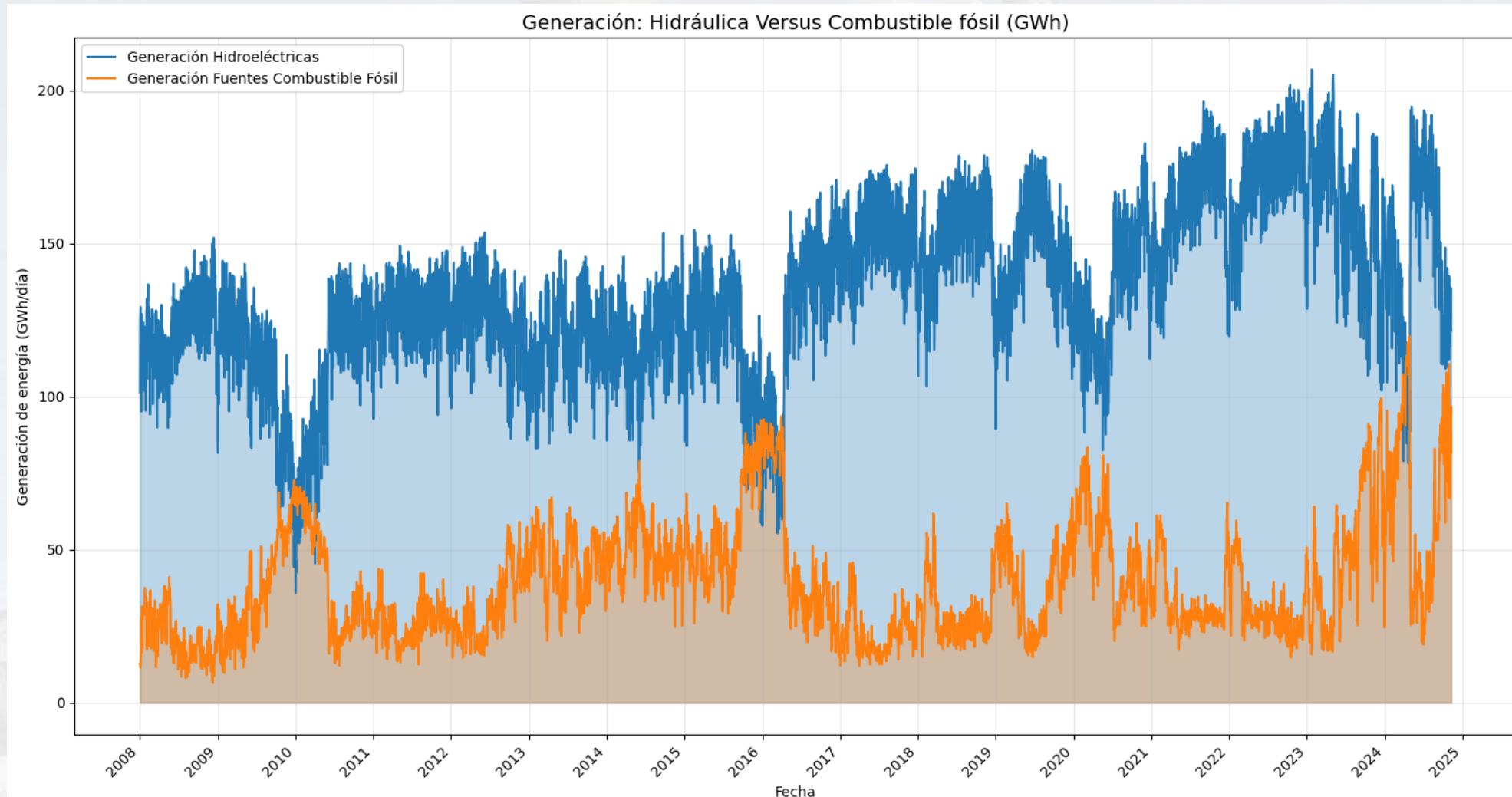
Fuente: XM Gráficas: Elaboración propia.

A faint, grayscale background image of a large industrial complex, likely a coal-fired power plant. It features several tall, dark smokestacks emitting thick plumes of white smoke against a hazy sky. In the foreground, there are various industrial buildings, pipes, and scaffolding.

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, ACOLGEN, 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.

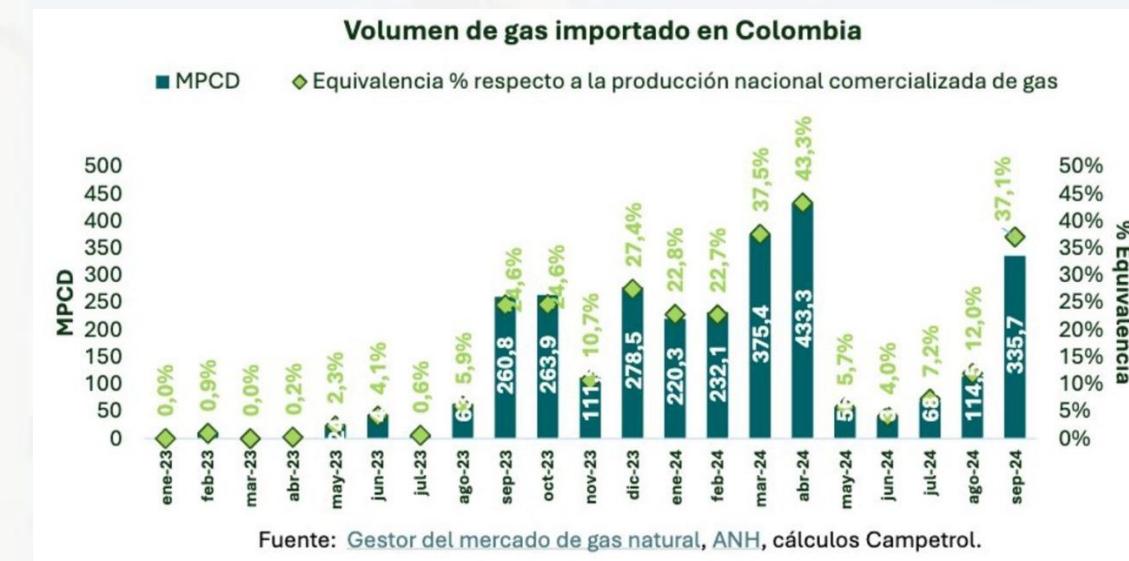
Además, hay déficit en la apropiación de recursos para subsidios correspondientes a 2025 cercano a \$3 billones.

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.

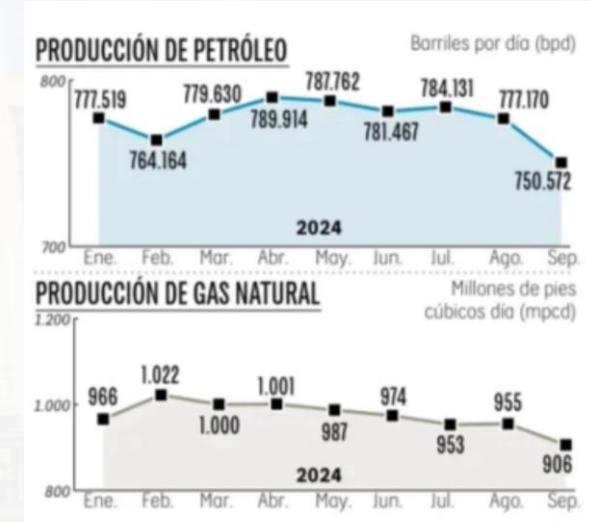
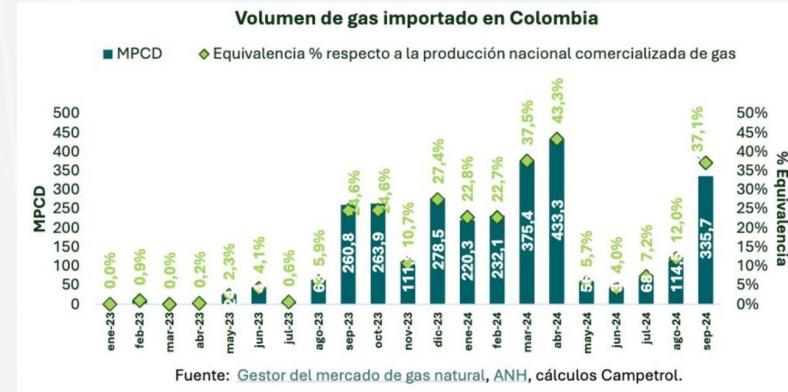


Primera vez en 45 años:
Gas natural importado para demanda no térmica:
Hogares, vehículos, comercios e industrias.

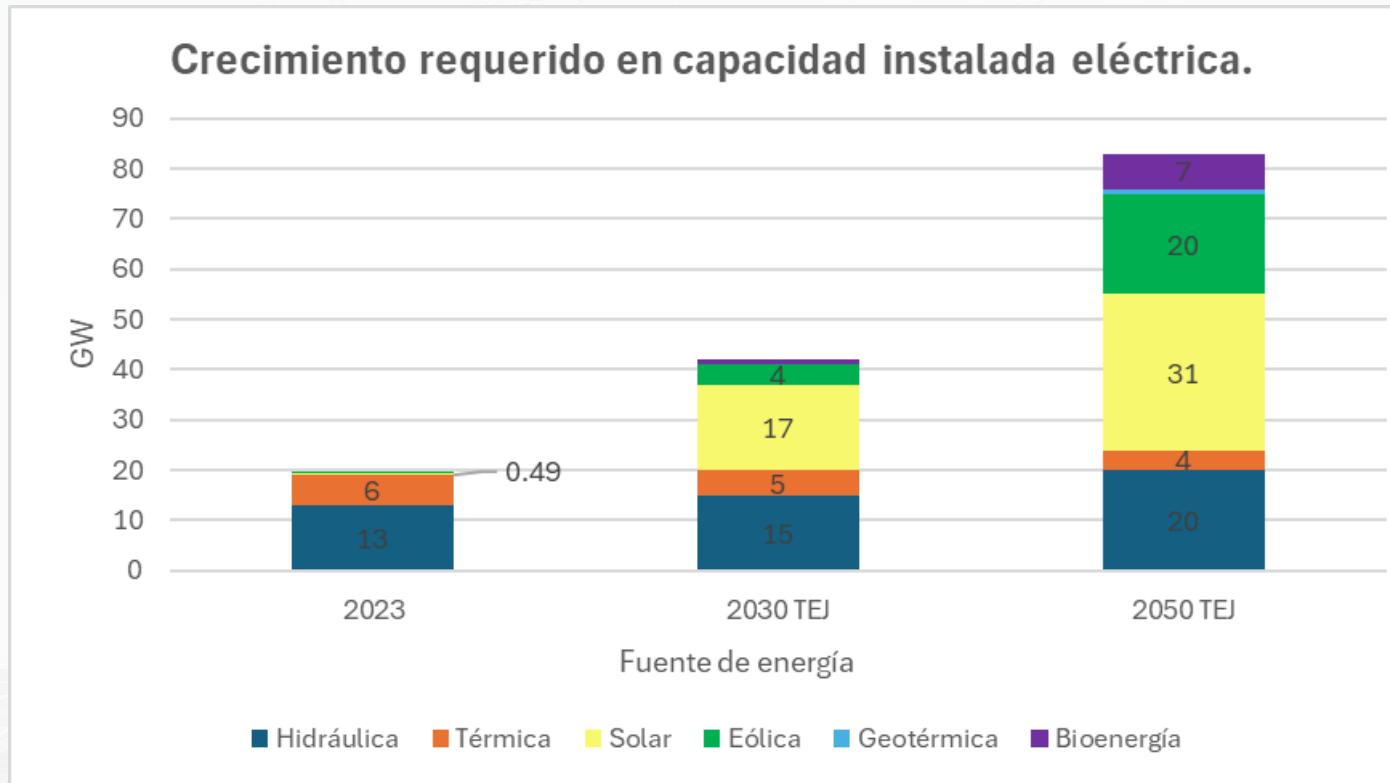
¿Qué implicaciones tiene esto en el contexto energético Colombiano?

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 ...



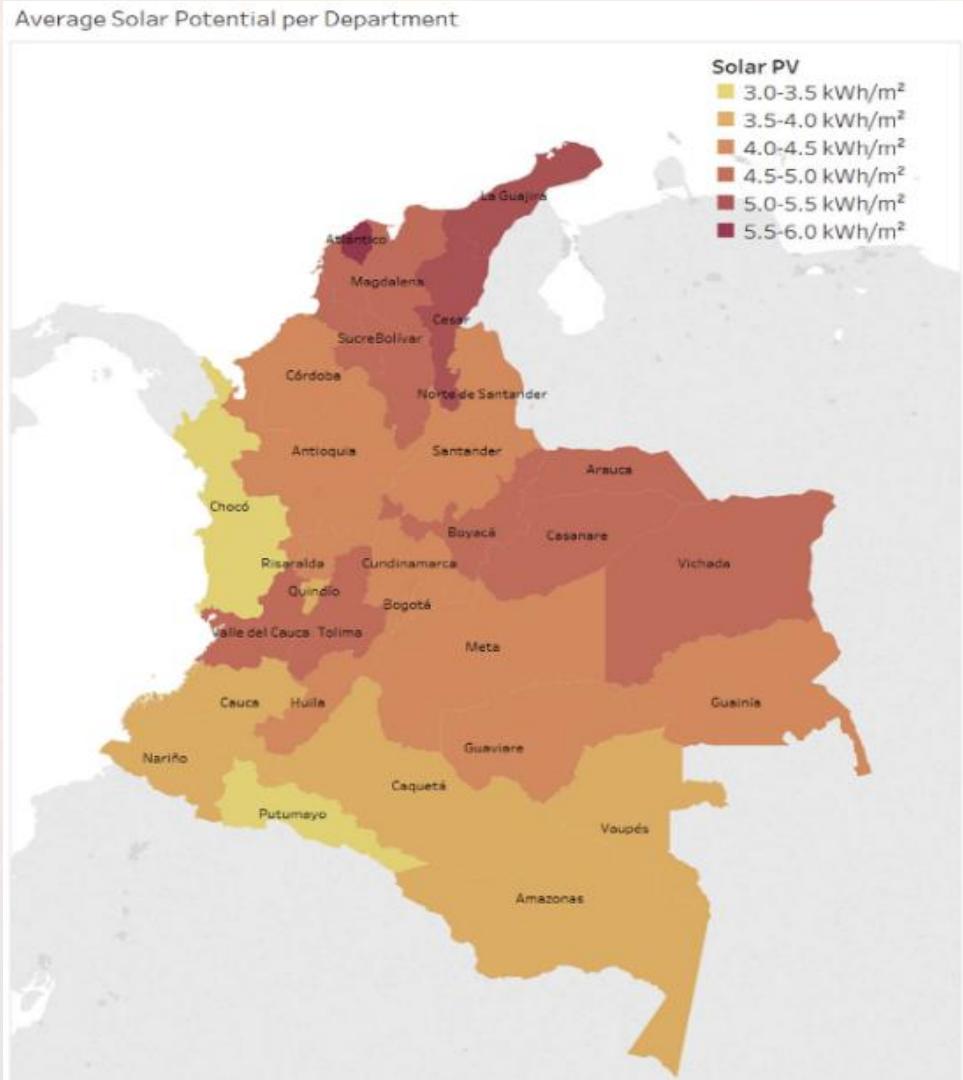
- Crecimiento anual del **11%** para alcanzar la meta al **2030**
- Crecimiento anual del **3%** desde el **2030** para alcanzar la meta al **2050**

Fuente: ANDI. Escenarios Nacionales Transición energética Justa, Ministerio de Minas y Energía. 2023. (Elaboración propia)

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

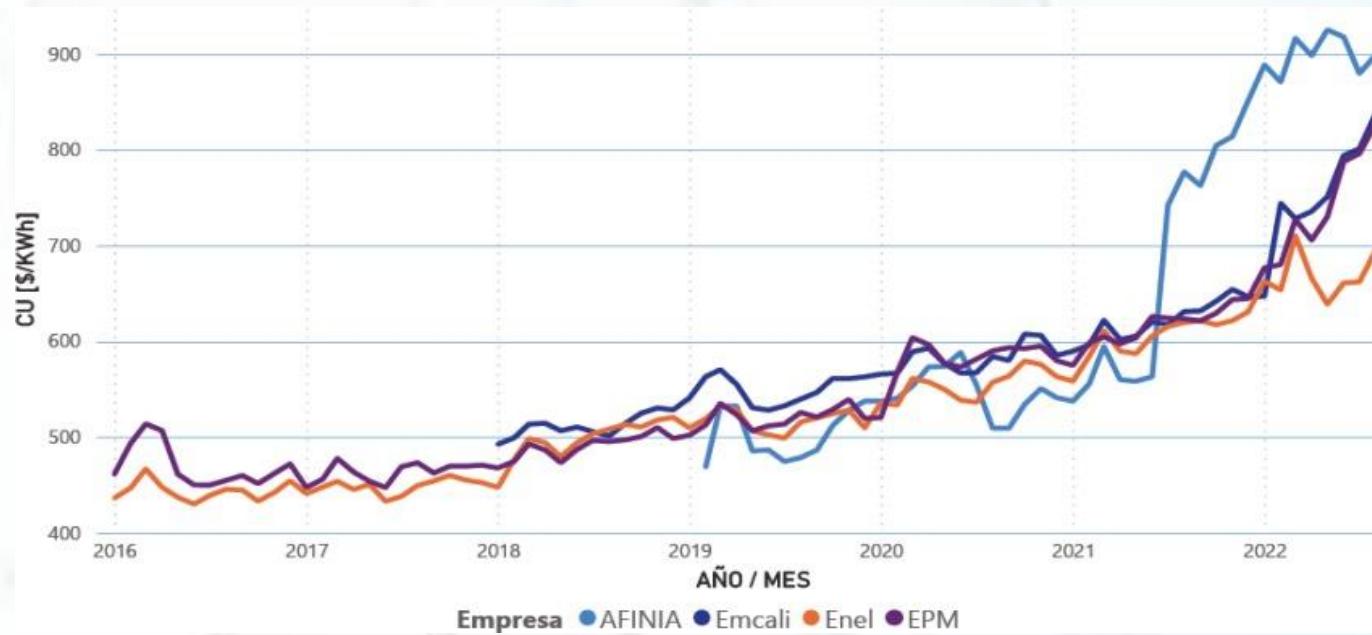
1

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**

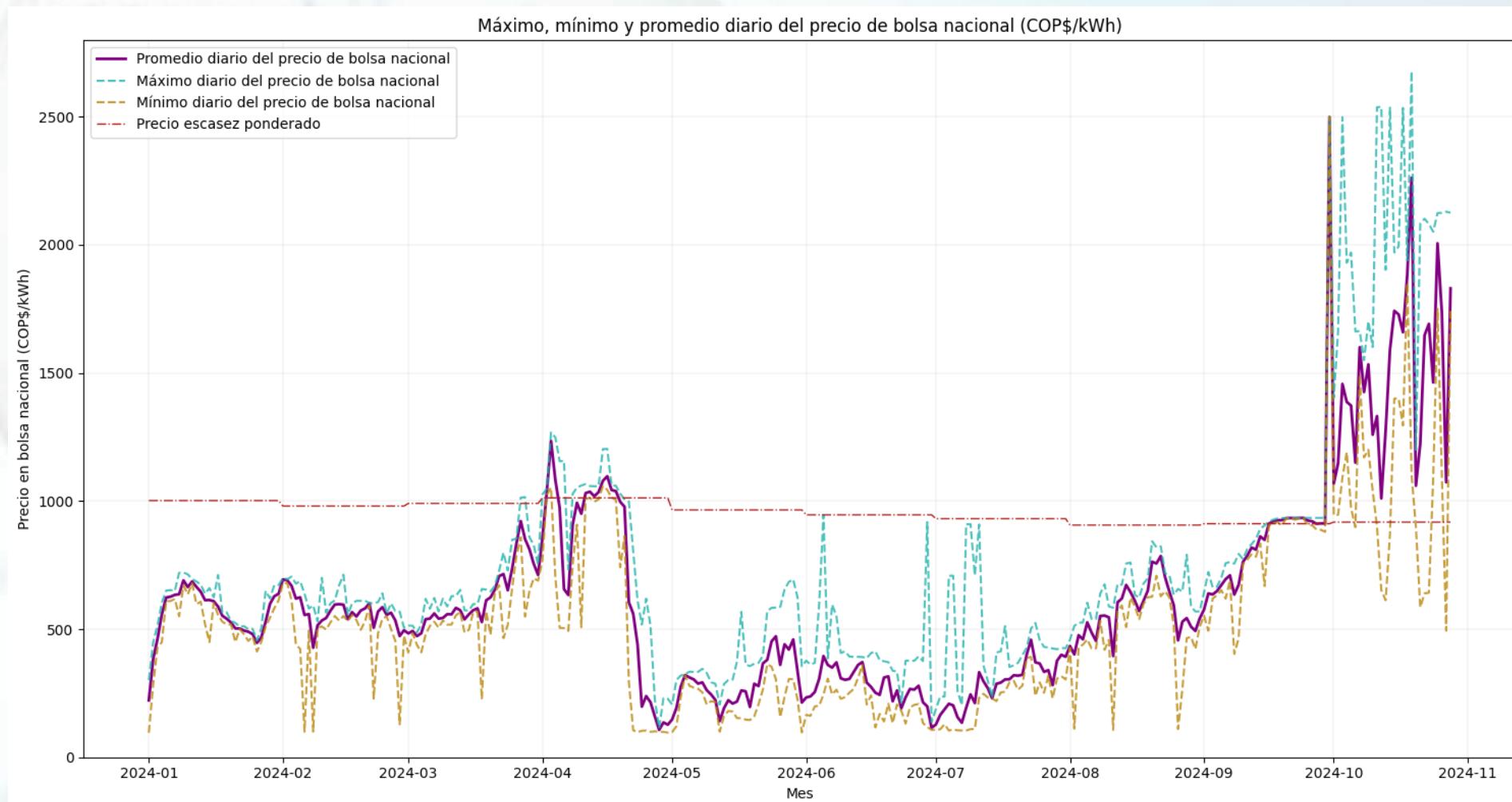
Evolución del precio del kWh (\$/kWh)



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

Fuente: ASIEB

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% |

Fuente: NREL

¿Cómo modelar la generación fotovoltaica?

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

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

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

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

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

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

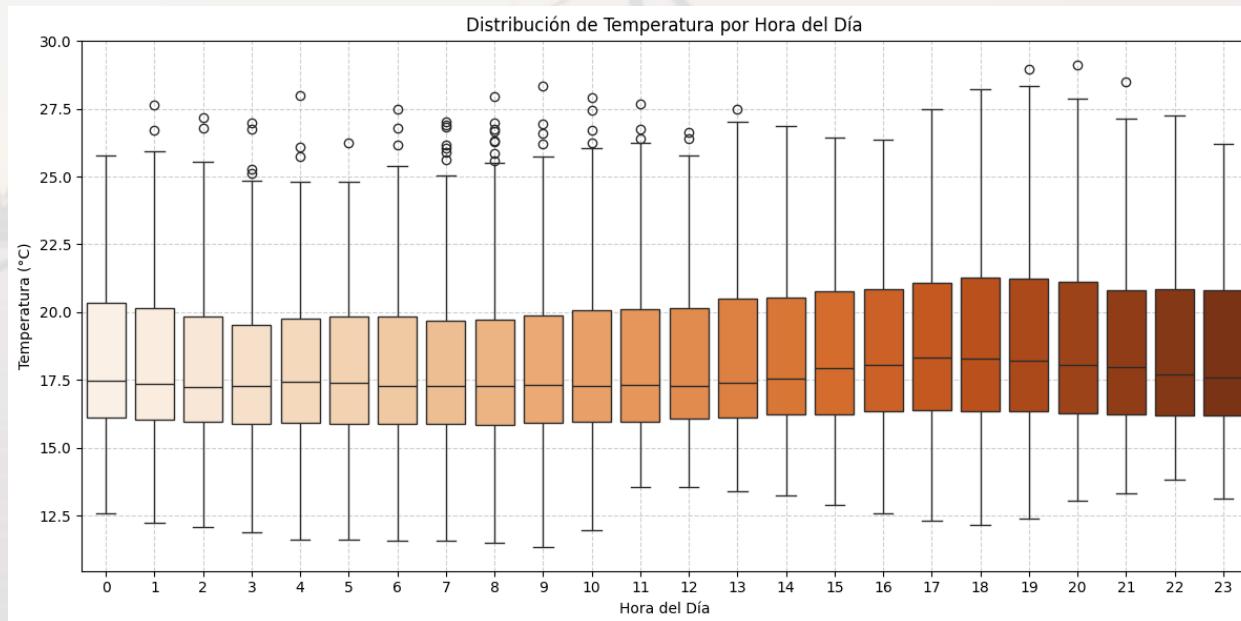
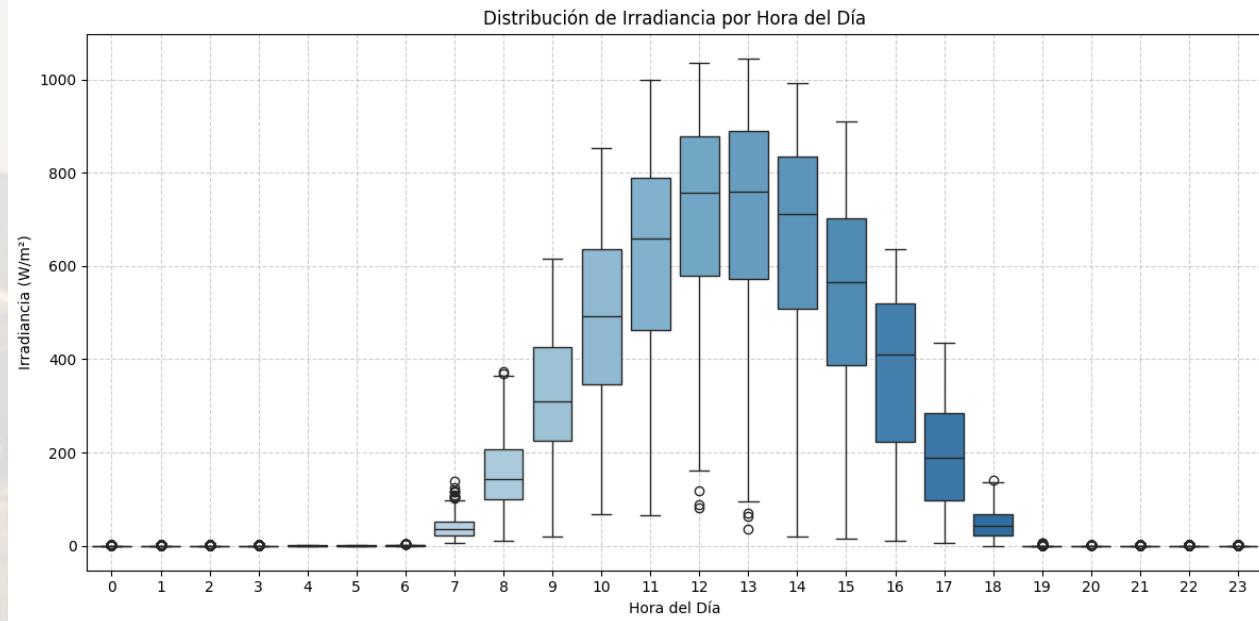
Llanogrande, Rionegro, Antioquia

- Expansión urbana
- Boom de viviendas
- Medición



Datos de irradiación y temperatura

En Llanogrande



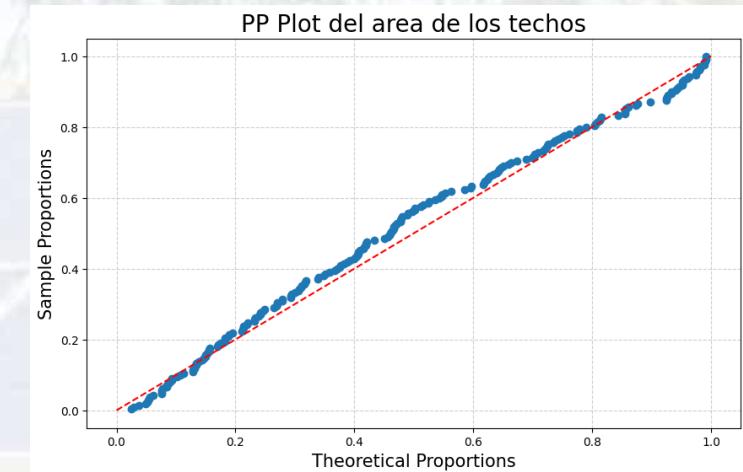
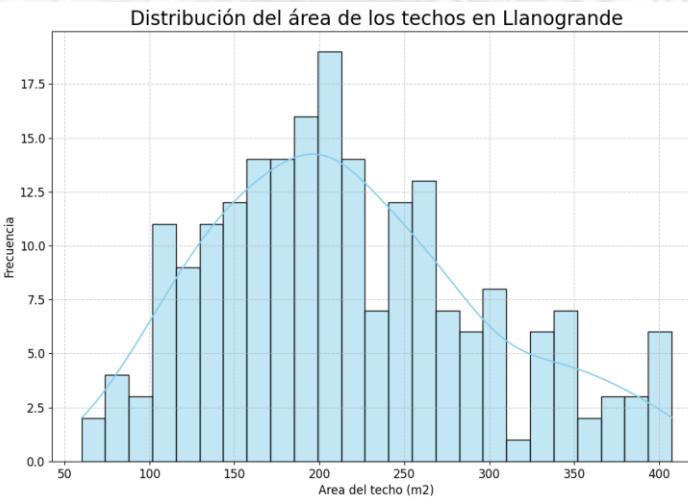
Fuente: IDEAM y NASA

Techos de casas en áreas residenciales en Llanogrande



Fuente: Google Maps

Techos de casas en áreas residenciales en Llanogrande



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

Perfil de demanda de un hogar Colombiano

Tecnologías de comunicación e información

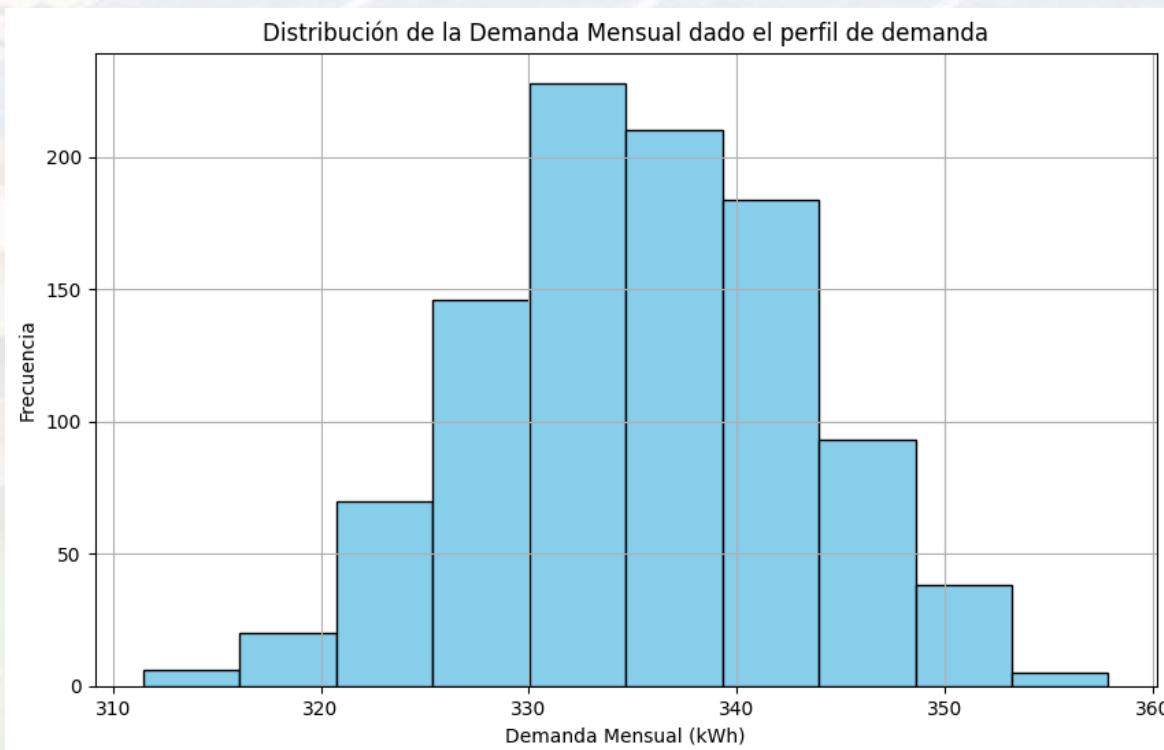
Iluminación

Electrodomésticos del hogar

Televisión, 3 teléfonos, 3 computadores

10 bombillas activas

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:

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

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.

Costo Certificado de la UPME:

$$\begin{cases} 0 \text{ UTV} < \text{Valor inversión en UTV} < 275 \text{ UTV}: & 1.2 \text{ UTV} \\ 275 \text{ UTV} \leq \text{Valor inversión en UTV} < 826 \text{ UTV}: & 3.4 \text{ UTV} \\ 826 \text{ UTV} \leq \text{Valor inversión en UTV} < 1652 \text{ UTV}: & 6.7 \text{ UTV} \end{cases}$$

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 = Δ_i = G_i - C_i

*Ahorro [COP]_i: SI(Excedentes > 0; Consumo * Precio kWh; Generación * Precio kWh) ∀ i ∈ Periodos*

*Ingresos por excedentes_i [COP]: SI(Excedentes > 0; Excedentes * (Precio kwh - C_{v_m}); 0) ∀ i ∈ Periodos*

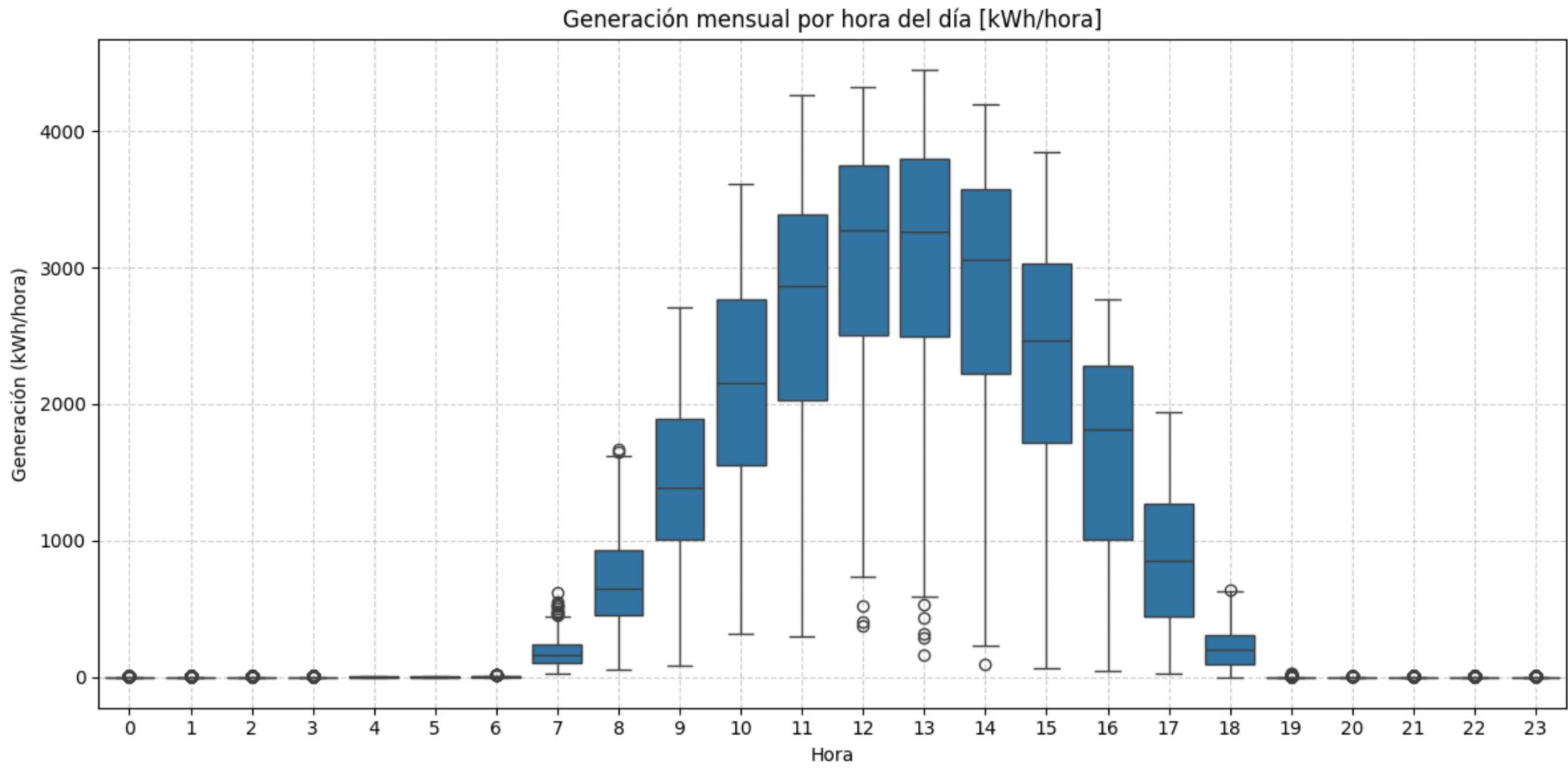
OPEX_i: Mantenimiento anual del sistema ∀ i ∈ Periodos

CAPEX: Valor de la instalación del proyecto

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

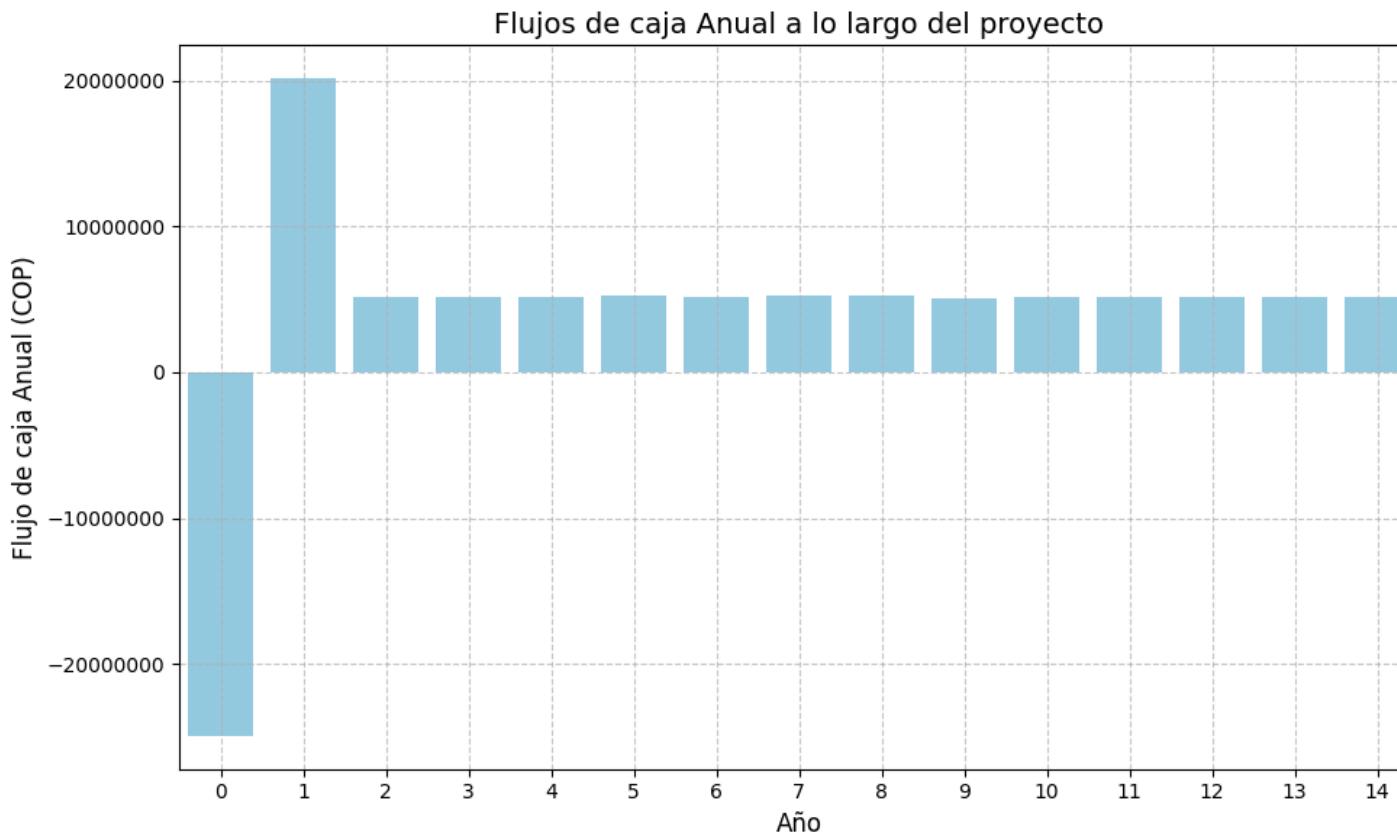
Flujo de caja después de beneficios tributarios = F.C. antes de impuestos + Beneficios tributarios

Implementación: Generación



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

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



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

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

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

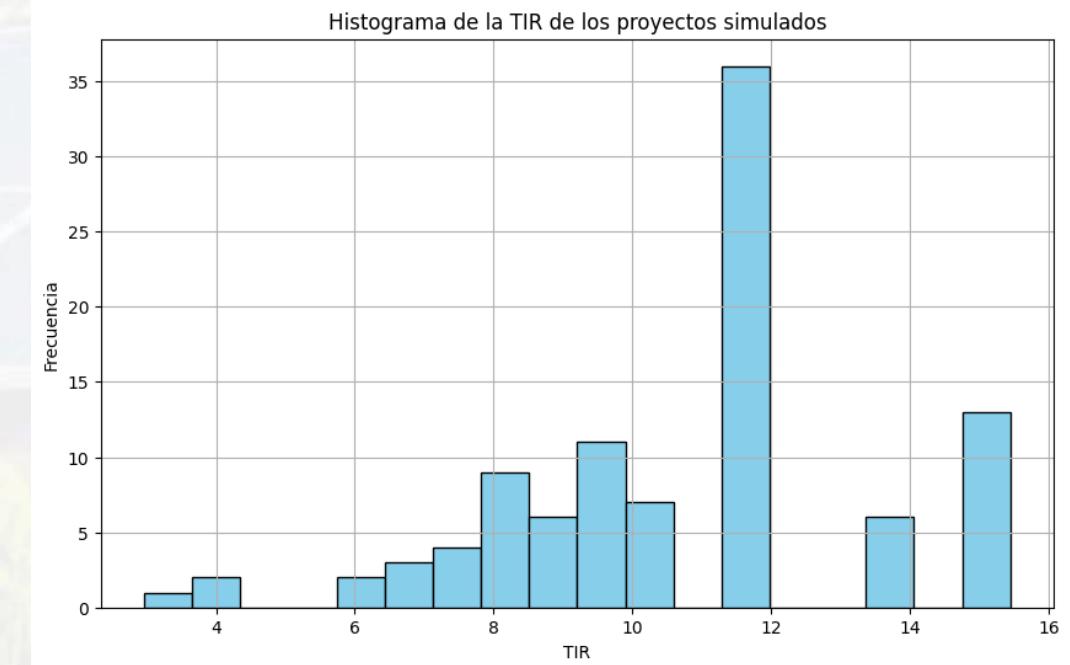
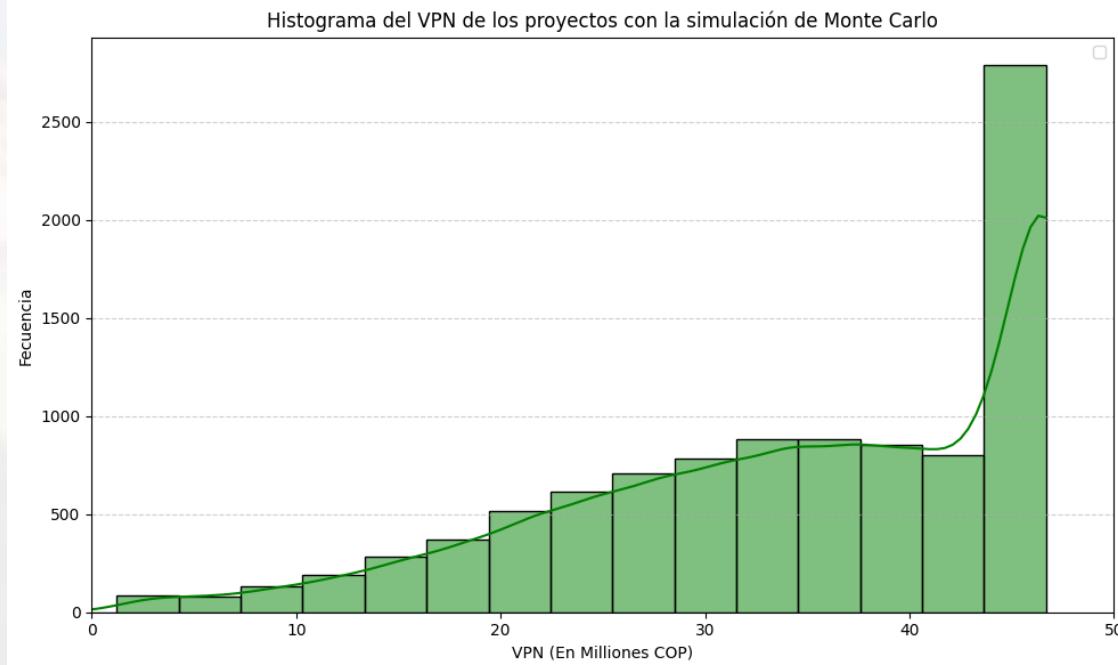
Capacity Factor = 22.19%

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

$$LCOE = COP \ 353.956$$

Fuente: Elaboración propia.

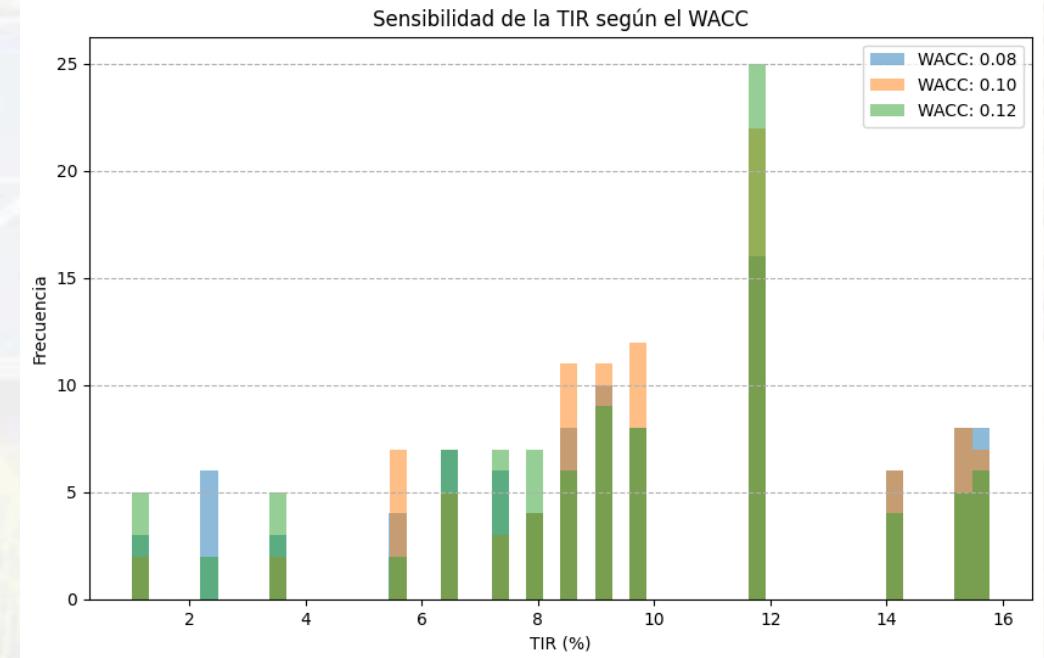
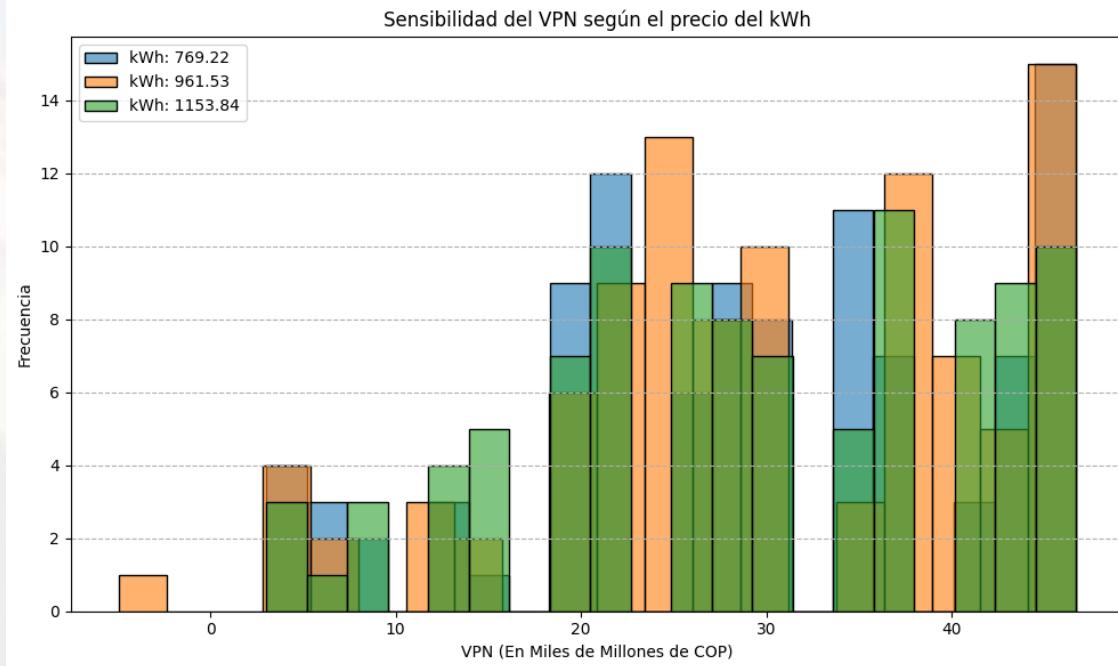
Implementación: Simulación de Monte Carlo



Fuente: Elaboración propia.

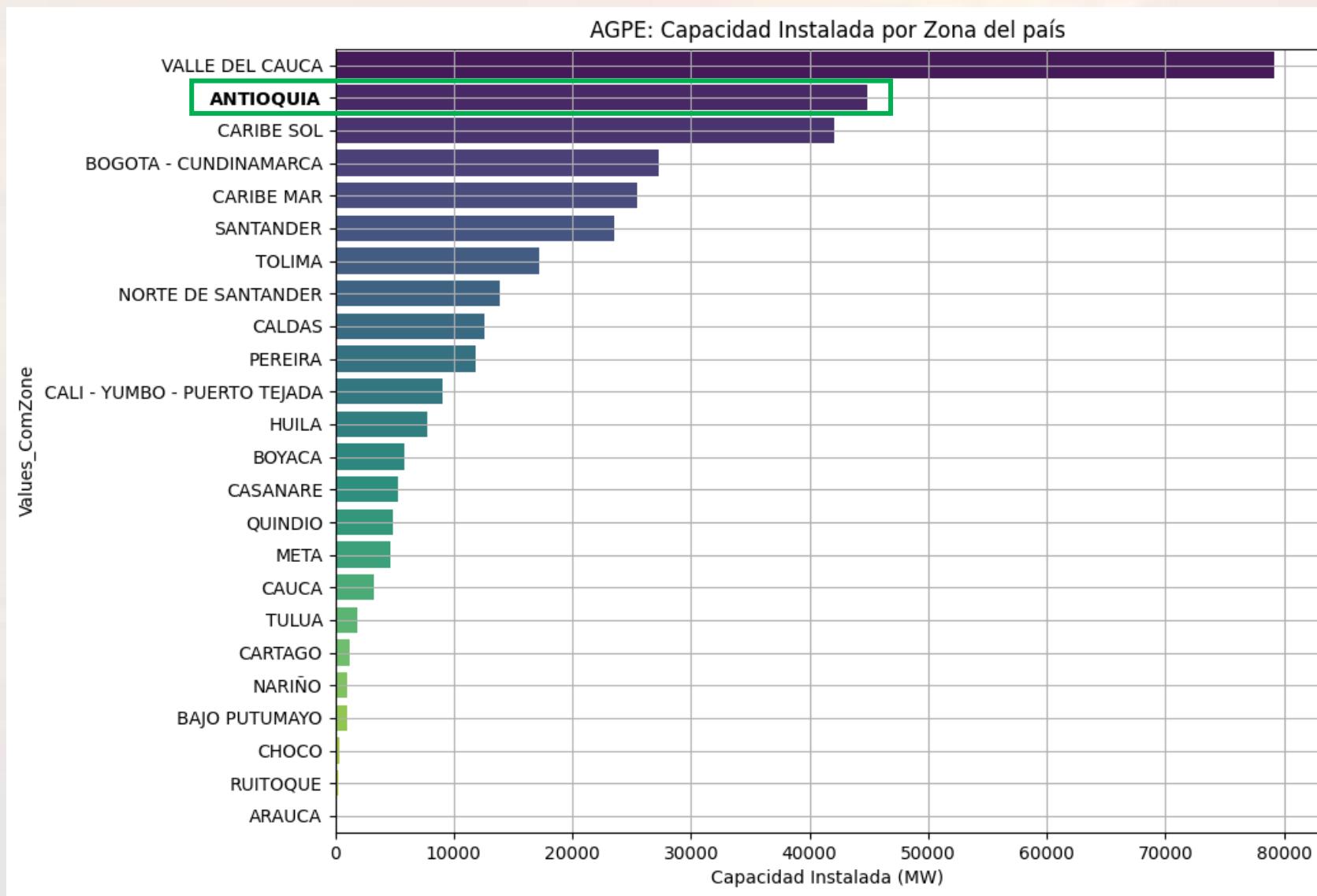
Implementación: Simulación de Monte Carlo

Análisis de Sensibilidad



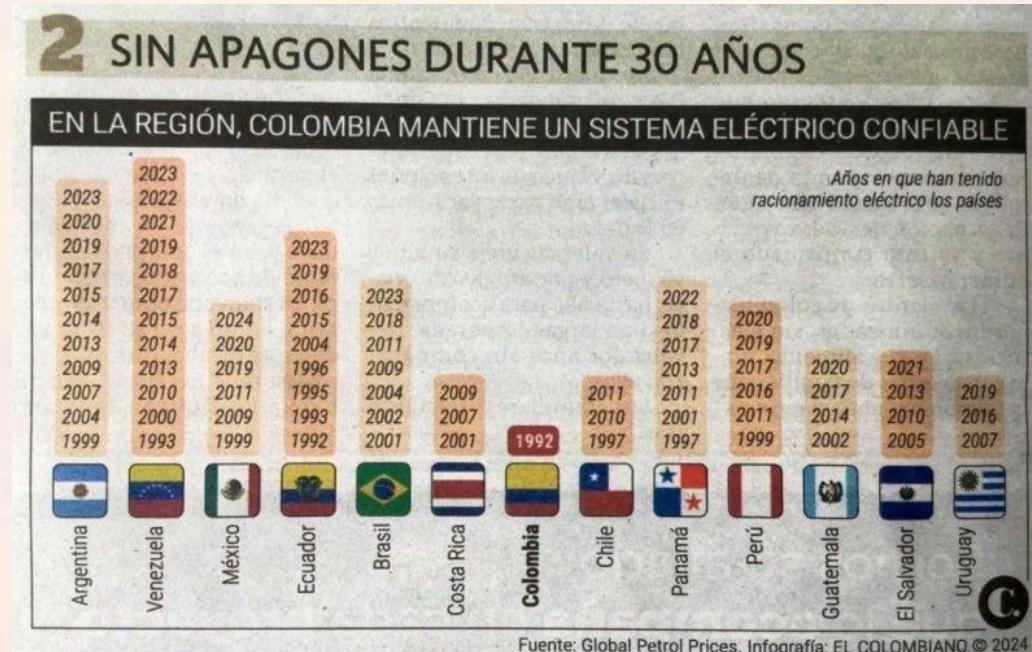
Distribuciones ligeramente diferentes a la rentabilidad proyectada → **Robustez**

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 residential street featuring several houses with red-tiled roofs. Some houses have dark grey or black gables, while others are white. A prominent feature is the installation of numerous blue solar panels on the roofs of the houses. The sky is overcast and grey.

¡Muchas gracias!

A photograph showing a row of houses with red-tiled roofs. Several of the houses have large arrays of blue solar panels installed on the upper slopes of their roofs. The houses are white with dark trim around windows and doors. Some have chimneys and small gables. The background shows more houses and some greenery.

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