

Análisis de Largo Plazo para el Sistema Eléctrico Nacional de Chile considerando Fuentes de Energía Variables e Intermitentes

Módulo 2: Metodología y Supuestos del Análisis

Preparado para:

Generadoras de Chile AG

24 de enero de 2018



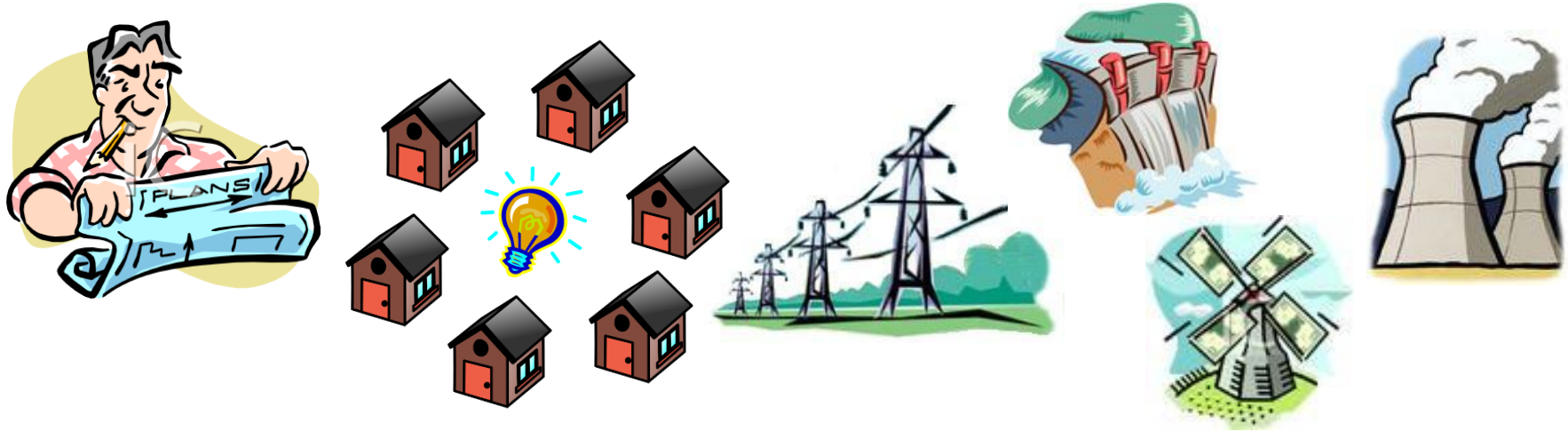
Temario

- ▶ **Conceptos Generales**
- ▶ Herramientas de Modelación
- ▶ Objetivo del Estudio
- ▶ Metodología de Estudio
- ▶ Supuestos del Estudio

Modelación del mercado Chileno

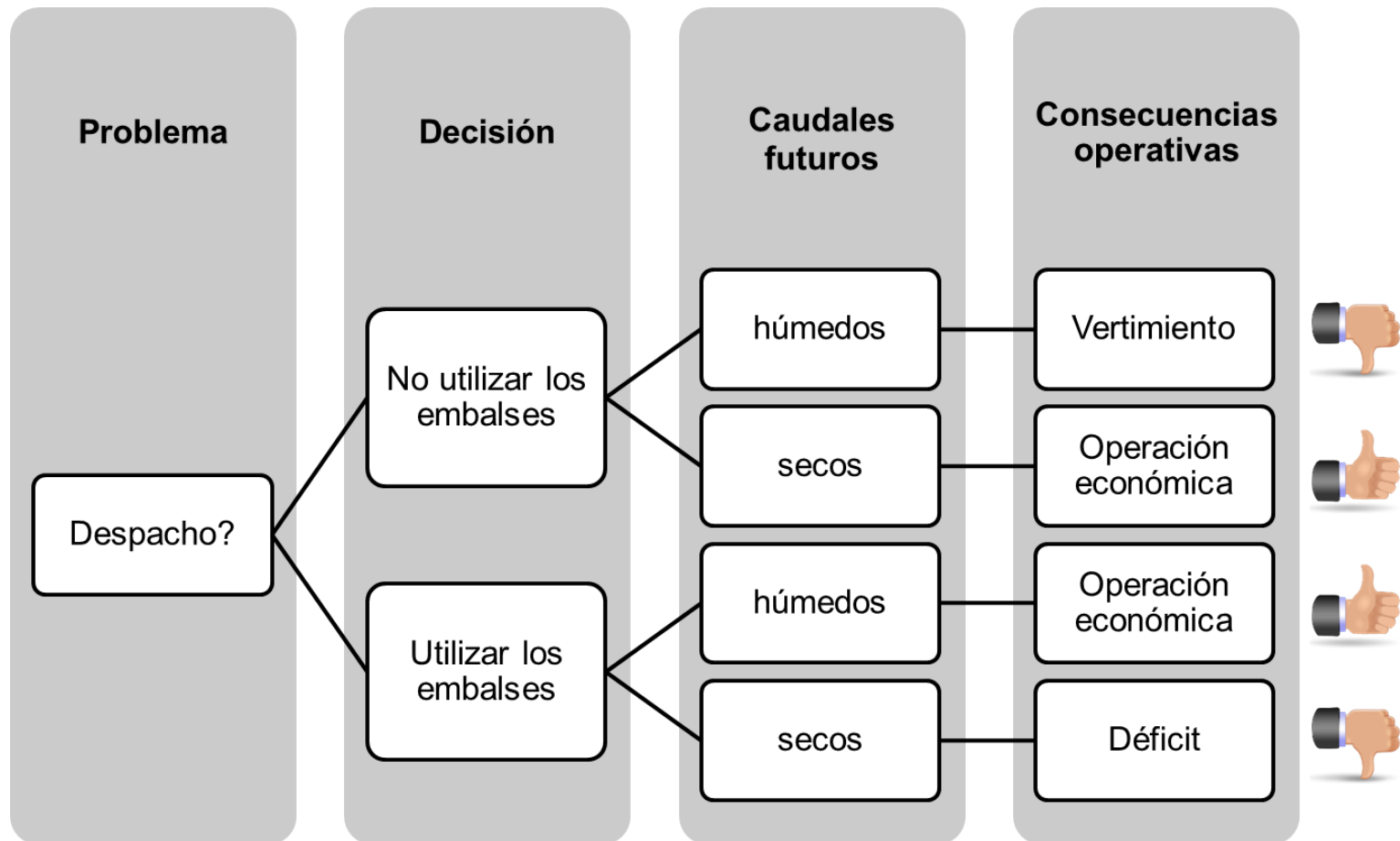
- ▶ Los consultores utilizaron modelos de *optimización y simulación probabilística* para representar la evolución del mercado Chileno bajo diferentes supuestos sobre el crecimiento de la demanda y de los costos de inversión de los equipos (eólica, solar etc.)
- ▶ El supuesto básico es que el mercado es eficiente (competitivo, transparente y sin poder de mercado). En este caso, la “mano invisible” maximiza el “welfare” social
- ▶ Esta maximización del welfare se puede representar a través de modelos de planificación óptima. Además, la operación del sistema chileno se hace a través de modelos de simulación probabilística

Expansión de sistemas eléctricos



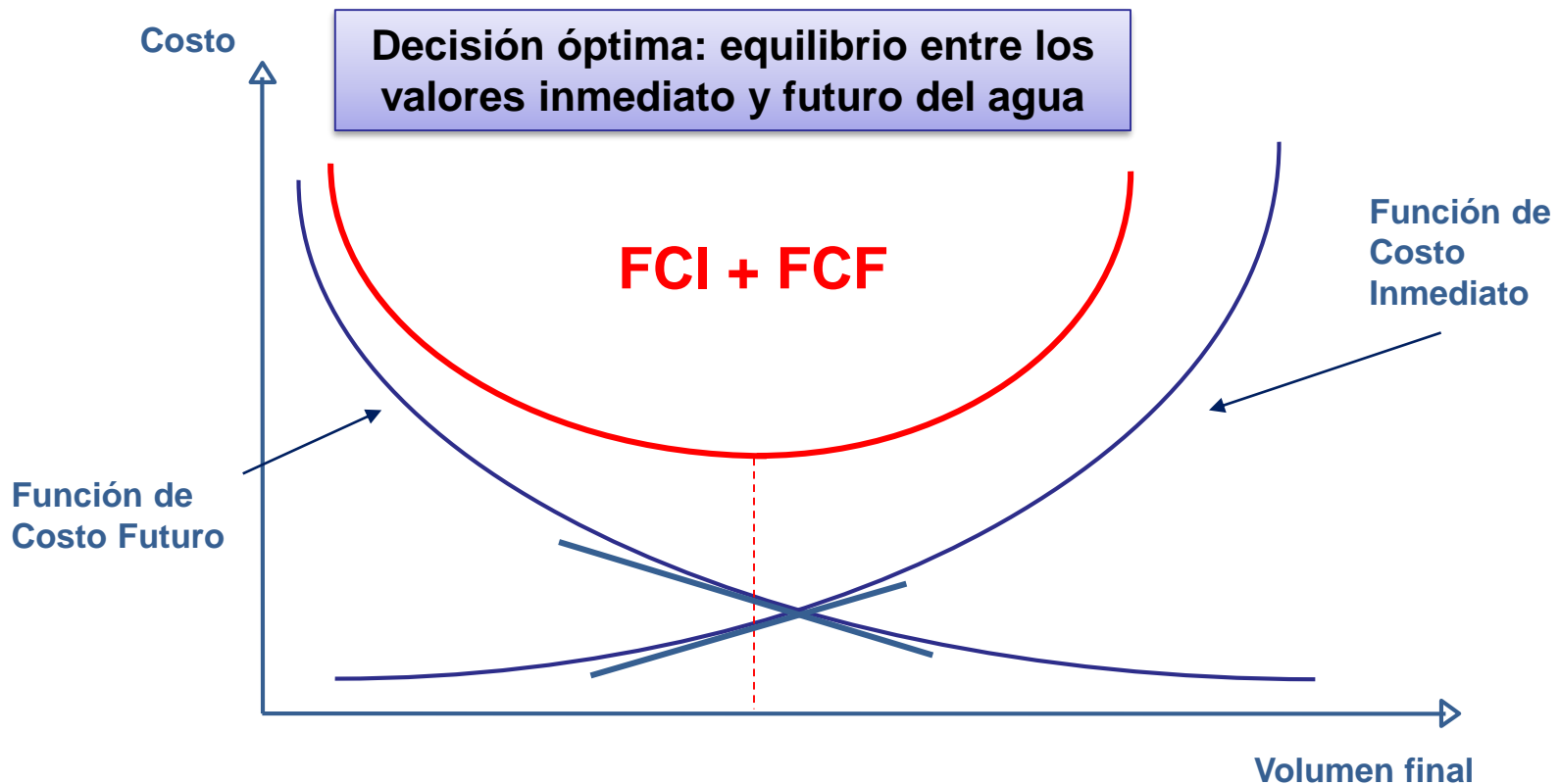
- ▶ El objetivo de la planificación es suministrar la demanda de la manera más económica y confiable
- ▶ Este problema es complejo debido al inmenso número de *combinaciones* de proyectos y fechas de construcción:
 - 20 proyectos candidatos $\Rightarrow 2^{20} \approx 10^6 = 1$ millón de combinaciones
 - 40 proyectos $\Rightarrow 2^{40} \approx 10^{12} = 1$ millón de millones de combinaciones
 - 40 proyectos a lo largo de 10 años $\Rightarrow 10^{40} \approx (10^6)^7 = 1$ millón de millones de millones etc.
- ▶ Los modelos de optimización de la expansión utilizan técnicas de “programación entera mixta” (MIP) para manejar esta complejidad

El problema de operación es *estocástico* debido a la *incertidumbre* con respecto a los valores futuros de la demanda, caudales, producción renovable etc. Esta incertidumbre se representa por un “*árbol de decisiones*”



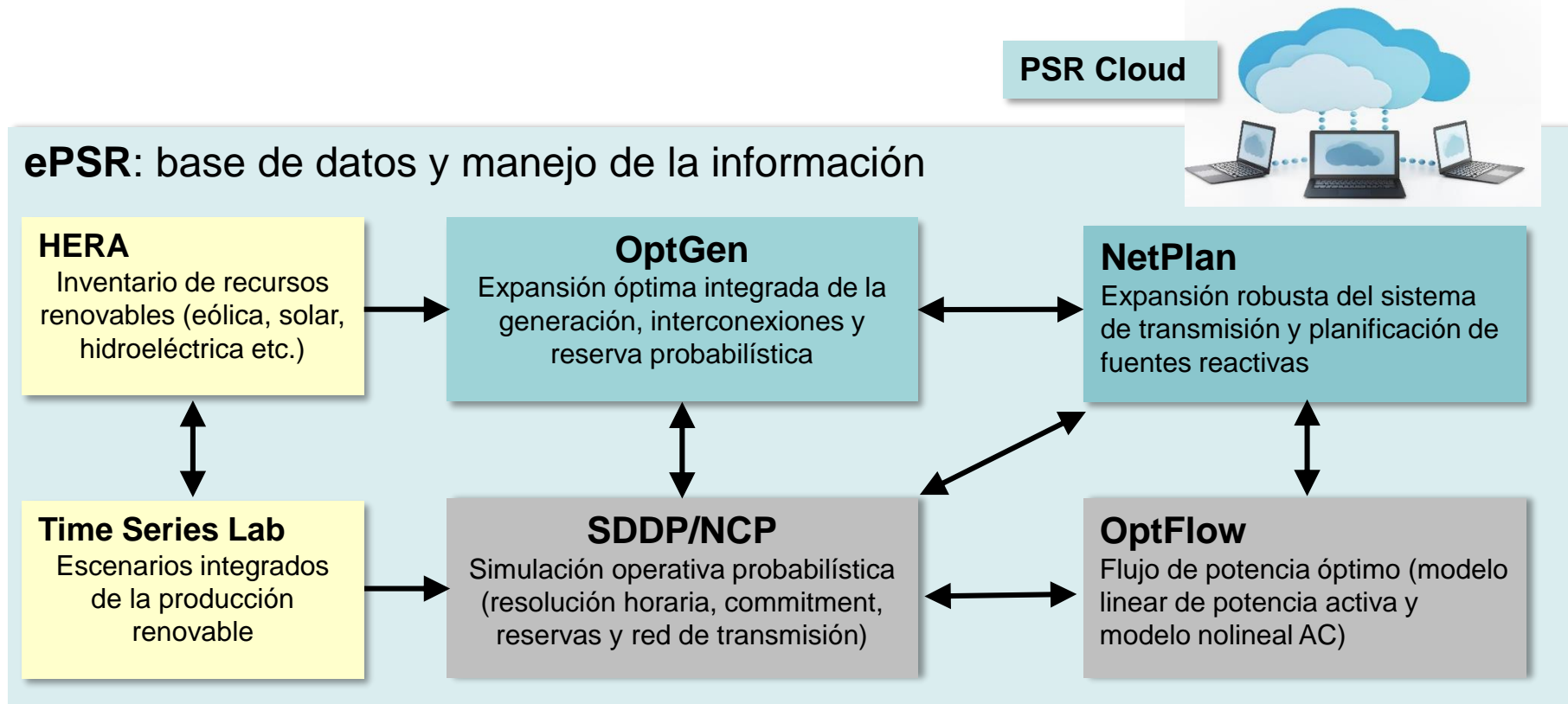
Complejidad del problema operativo

- ▶ El número de tramos del árbol crece exponencialmente con el número de decisiones y etapas. Por ejemplo, 10 decisiones a lo largo de 24 meses (2 años) $\Rightarrow 10^{24} \approx (10^6)^4 = 1 \text{ millón}^4$
- ▶ Los modelos de optimización operativa utilizan técnicas de programación dinámica estocástica para manejar esta complejidad



Temario

- ▶ Conceptos Generales
- ▶ **Herramientas de Modelación**
- ▶ Objetivo del Estudio
- ▶ Metodología de Estudio
- ▶ Supuestos del Estudio

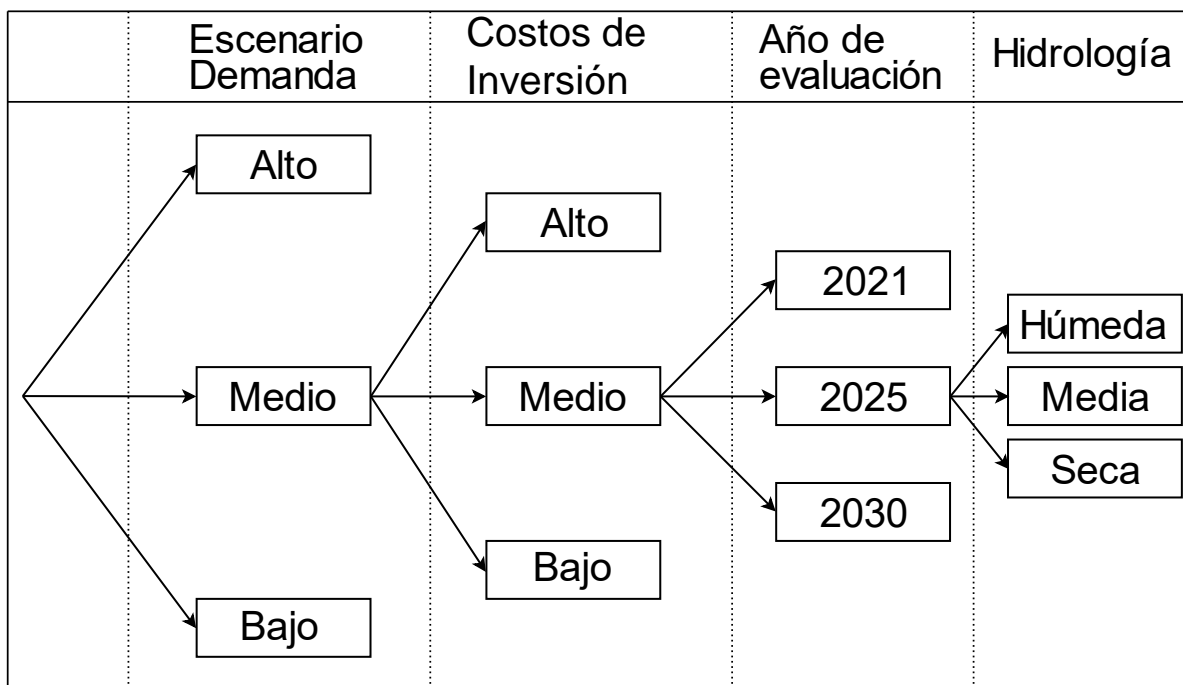


Temario

- ▶ Conceptos Generales
- ▶ Herramientas de Modelación
- ▶ Objetivo del Estudio
- ▶ **Metodología de Estudio**
- ▶ Supuestos del Estudio

Árbol de Escenarios

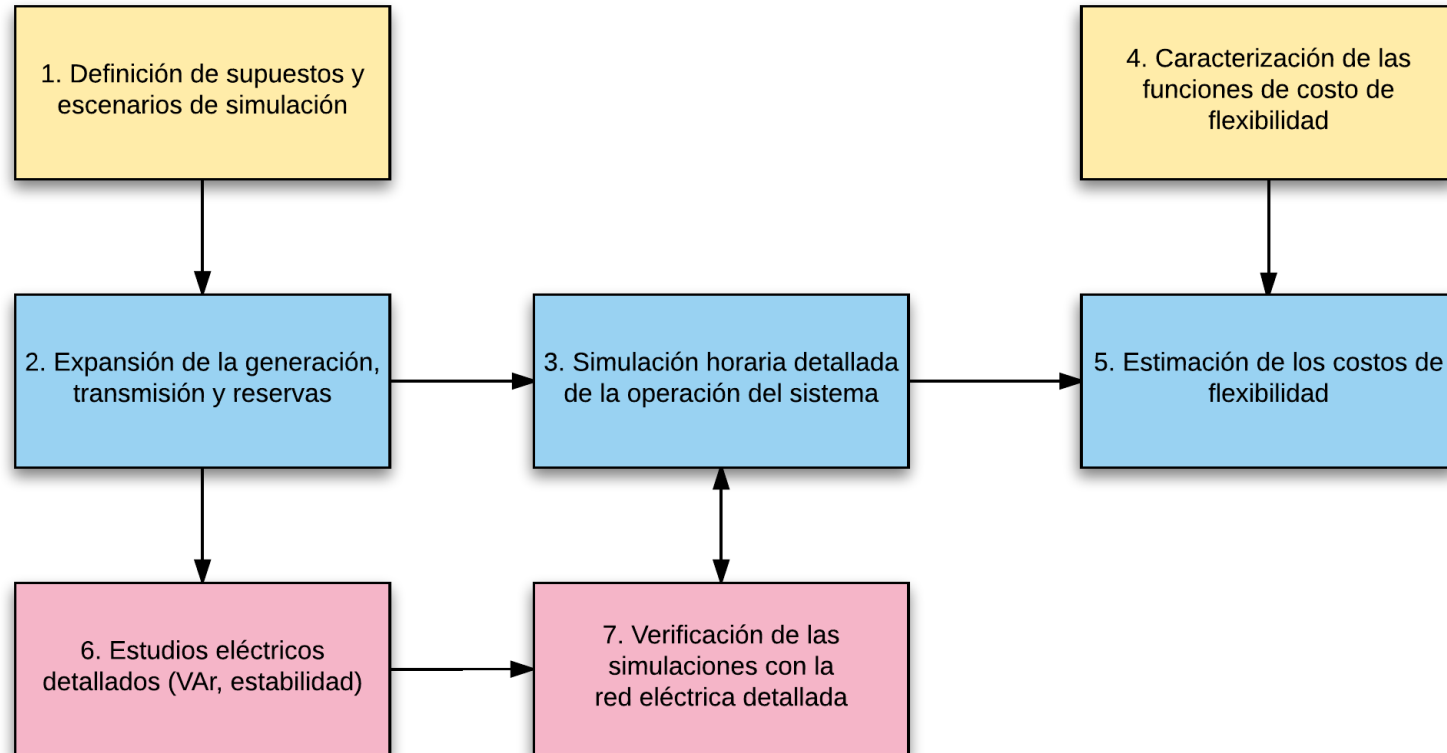
- Total: 81 escenarios de modelación



- La hipótesis es que los escenarios de penetración VRE serán resultado de escenarios de demanda y costos de inversión.

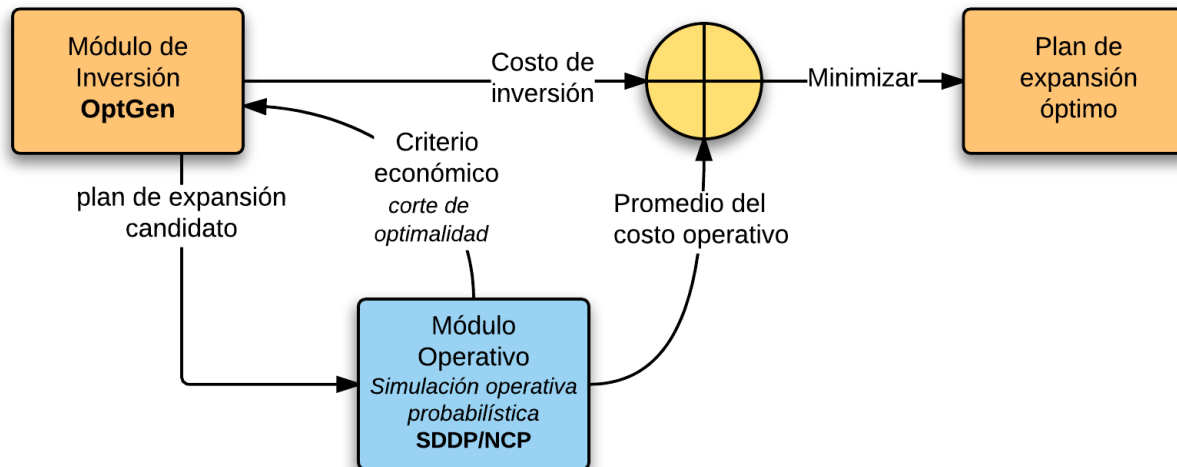
Etapas de Modelación

- El estudio considera las siguientes etapas:



Etapa 2 – Paso 1. Expansión Óptima de Generación

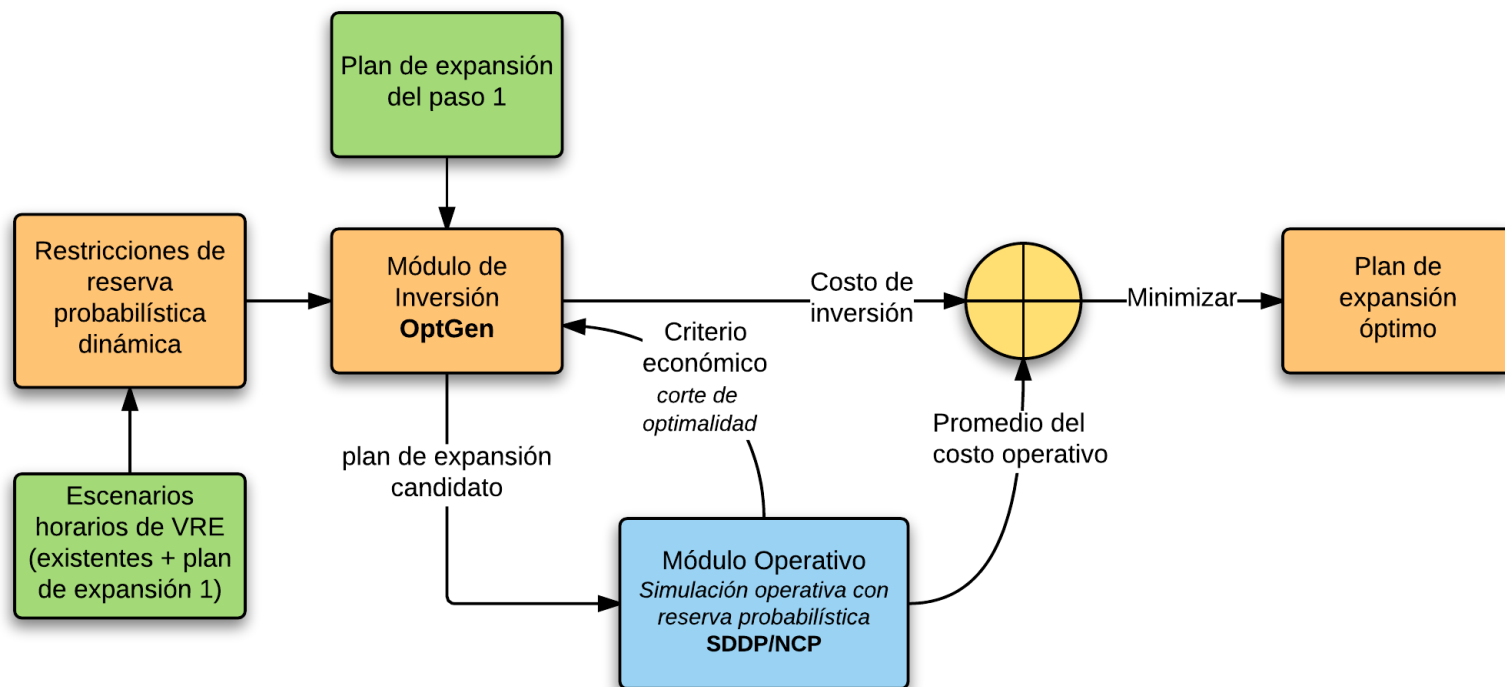
- Expansión óptima de la generación sin tomar en cuenta las reservas probabilísticas dinámicas¹



(1) Se utilizó un procedimiento jerárquico de planificación, pues refleja mejor las condiciones del mercado local.

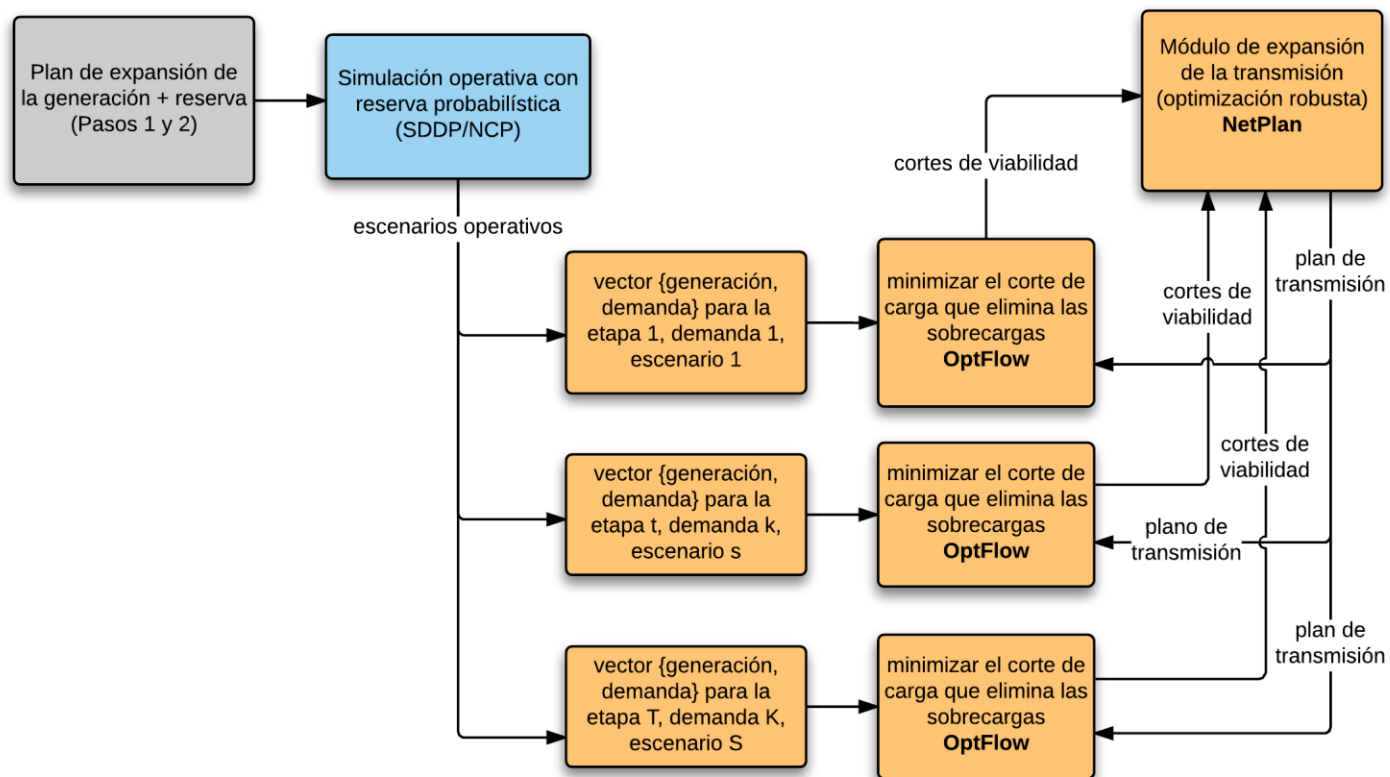
Etapa 2 – Paso 2. Expansión Óptima de las Reservas

- Expansión óptima de las reservas de generación para manejar la variabilidad de las VRE del plan del paso 1

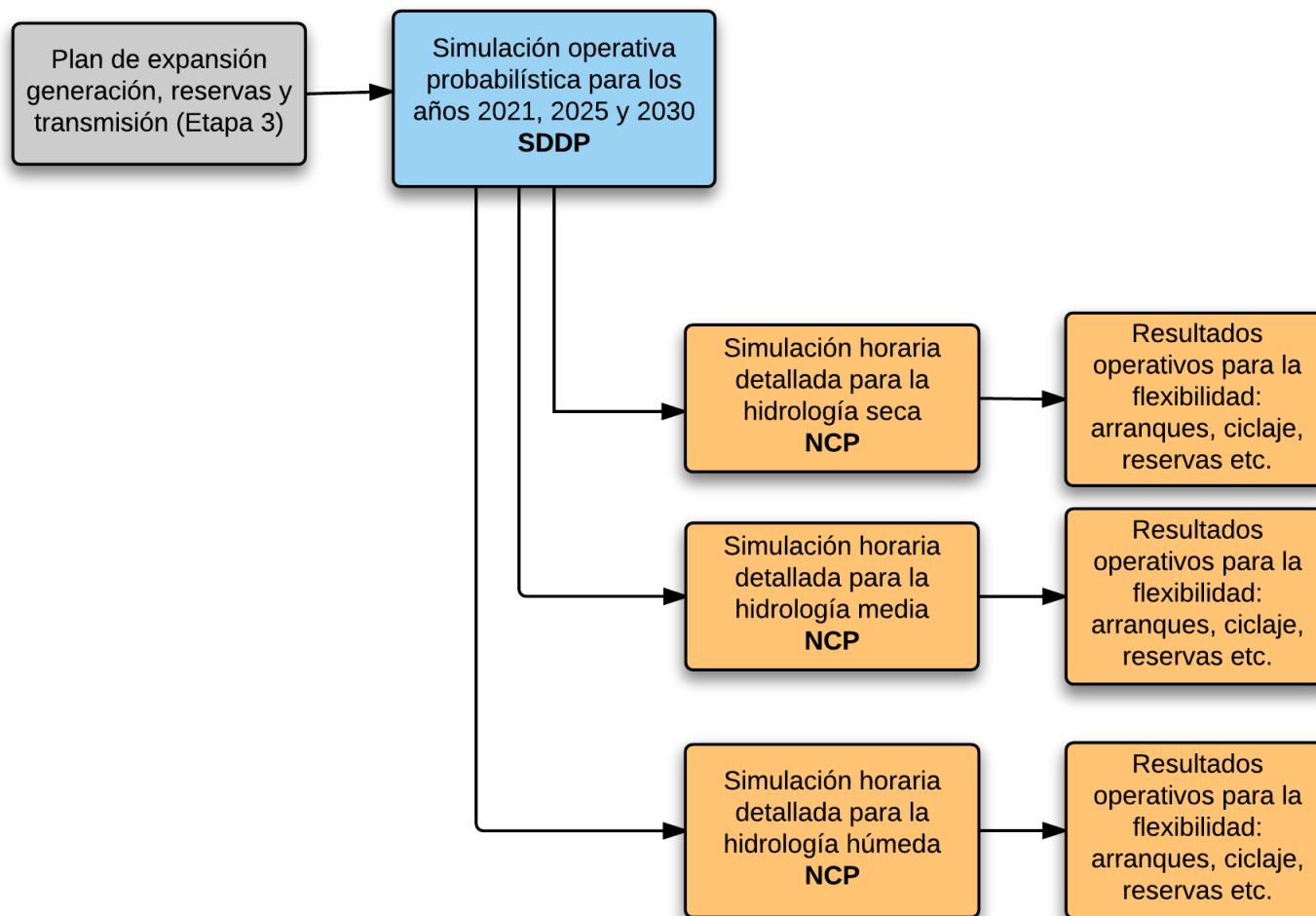


Etapa 2 – Paso 3. Expansión de la Transmisión

- Expansión óptima de la transmisión para el plan resultante de los pasos 1+2 (generación + reserva)



Etapa 3 – Simulación Probabilística Detallada



- ▶ En esta etapa se consideran parámetros detallados tales como: mínimos técnicos, tiempos de encendido y detención, tasas de toma de carga, etc.

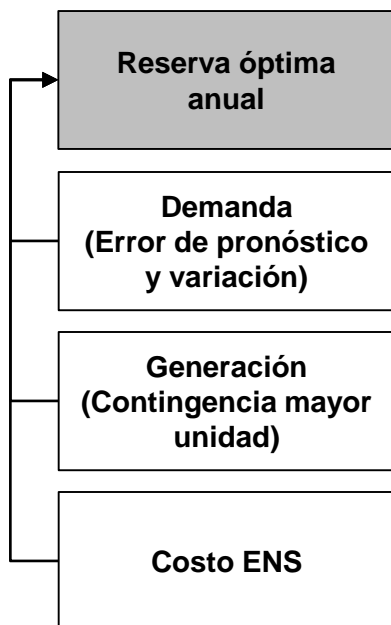
Criterios para reserva operativa

► Criterio de Reserva (R)

- Reservas independientes para zonas SING y SIC
- Incorpora efecto de ERV $\rightarrow R = f(D, G, \underline{ERV})$

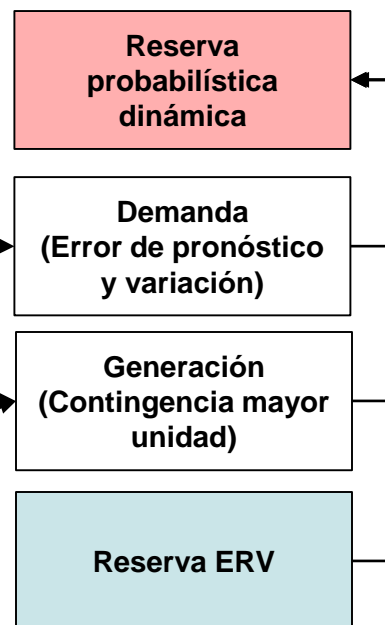
Metodología Vigente en Chile

$$R^{anual} = \min(C_{oper} + Falla)$$



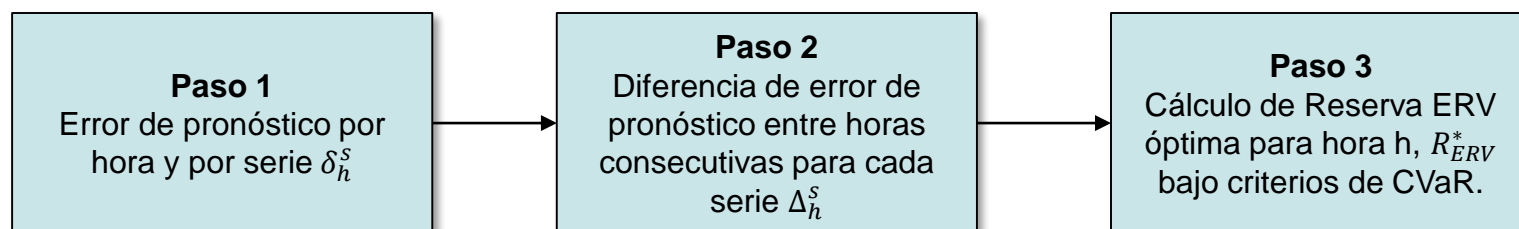
Modelación Implementada

$$R^h = Demanda + \max(R_G^h, R_{ERV}^h)$$



Reserva ERV (R_{ERV})

- El Consultor ha propuesto una metodología para determinar la reserva requerida para dar cuenta de la incertidumbre asociada al error de pronóstico de la generación ERV a partir de las series simuladas, que contempla 3 pasos.



Reserva ERV (R_{ERV}) – Paso 1

- ▶ Para cada hora (h) de cada serie simulada (s) se determina la desviación de la producción ERV (e_h^s) con respecto al valor esperado \tilde{e}_h^s (promedio)

$$\delta_h^s = e_h^s - \tilde{e}_h^s$$

- ▶ Se interpreta esta desviación (δ_h^s) como el error de pronóstico asociado a cada hora de producción ERV (para cada serie simulada)

Reserva ERV (R_{ERV}) – Paso 2

- Se determina la diferencia en el error de pronóstico entre dos horas consecutivas en cada serie simulada (Δ_h^s). Esto constituye la necesidad de reserva en giro en cada hora (h) para una serie simulada (s):

$$\Delta_h^s = \delta_h^s - \delta_{h-1}^s$$

- Si $\delta_{h-1}^s = 0 \rightarrow \Delta_h^s = \delta_h^s \rightarrow R_{ERV}^{h,s} =$ error de pronóstico hora h y serie s
- Si $\delta_{h-1}^s > 0 \rightarrow \Delta_h^s < \delta_h^s \rightarrow R_{ERV}^{h,s} <$ error de pronóstico hora h y serie s
- Si $\delta_{h-1}^s < 0 \rightarrow \Delta_h^s > \delta_h^s \rightarrow R_{ERV}^{h,s} >$ error de pronóstico hora h y serie s

Reserva ERV (R_{ERV}) – Paso 3

- Se determina el valor de la reserva probabilística de cada hora, R^* , como la siguiente expresión:

$$R_{ERV}^* = \lambda \times E(R) + (1 - \lambda) \times CVaR_{90\%}(R)$$

- $E(R)$ representa el promedio de Δ_h^S para todas las series¹
- $CVaR_{90\%}$ es el *conditional value at risk* de la muestra de de diferencias
- El peso λ representa el criterio de riesgo del planificador
- En la experiencia de los Consultores con este tipo de criterio de riesgo, $\lambda=0.8$ representa un compromiso razonable entre confiabilidad y costo

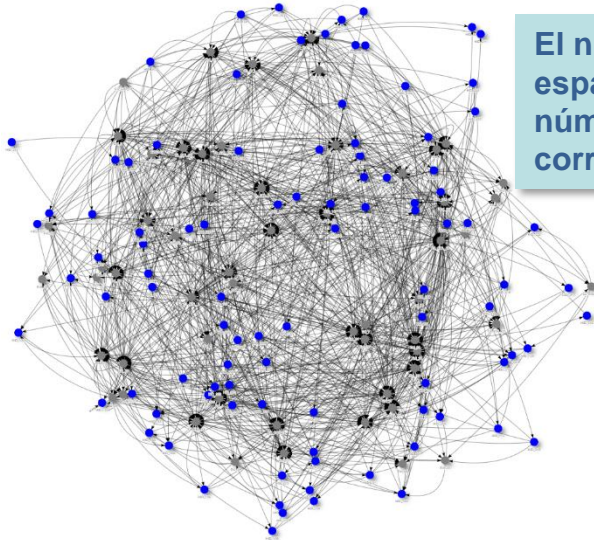
Nota: (1) En estricto rigor se estima un valor esperado para las Δ_h^S positivos y otro para los negativos, los que dan lugar a una reserva óptima dinámica UP y DOWN.

Producción de las VRE

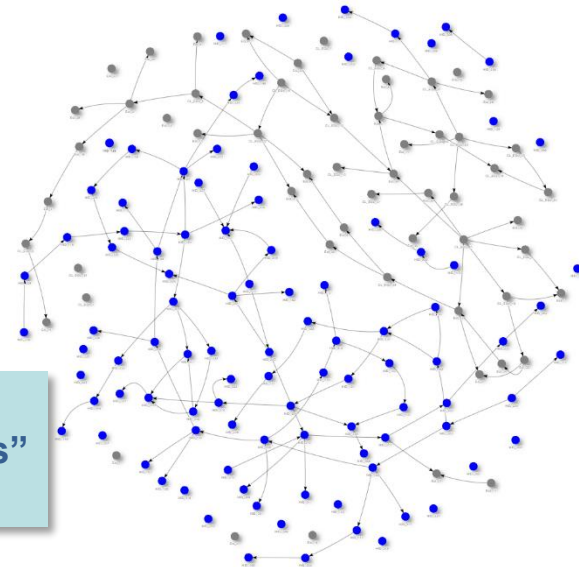
- ▶ A partir de las coordenadas geográficas de las plantas VRE, se obtuvieron las series históricas de viento y solar (convertidas para producción de energía)
 - <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>
 - <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/exploracion>
- ▶ Las series tienen resolución horaria (mediciones + reanálisis)
 - Viento: 1980-2013
 - Solar: 2004-2014

Correlación de recursos eólicos e hidrológicos

► Modelación de la correlación espacial por red Bayesiana

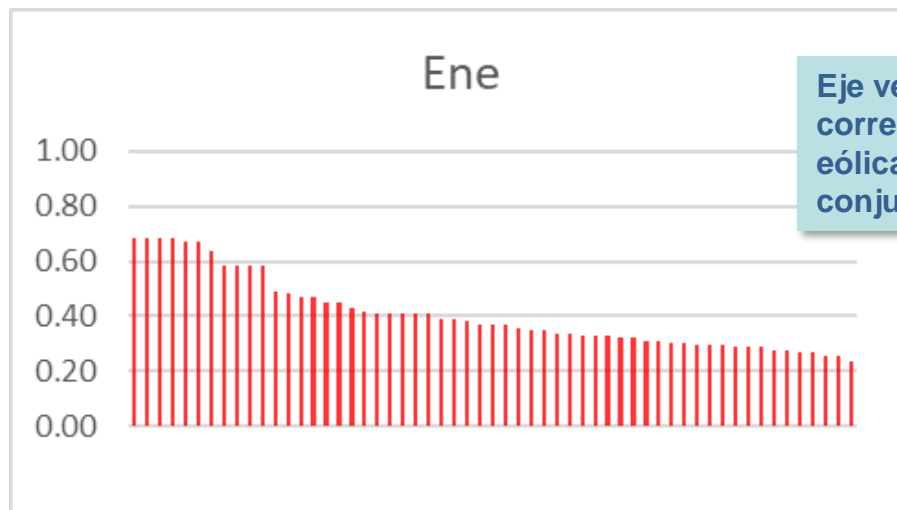


El número de elementos de la matriz de correlación espacial “llena” puede ser mucho mayor que el número de registros históricos. Esto puede llevar a correlaciones espurias

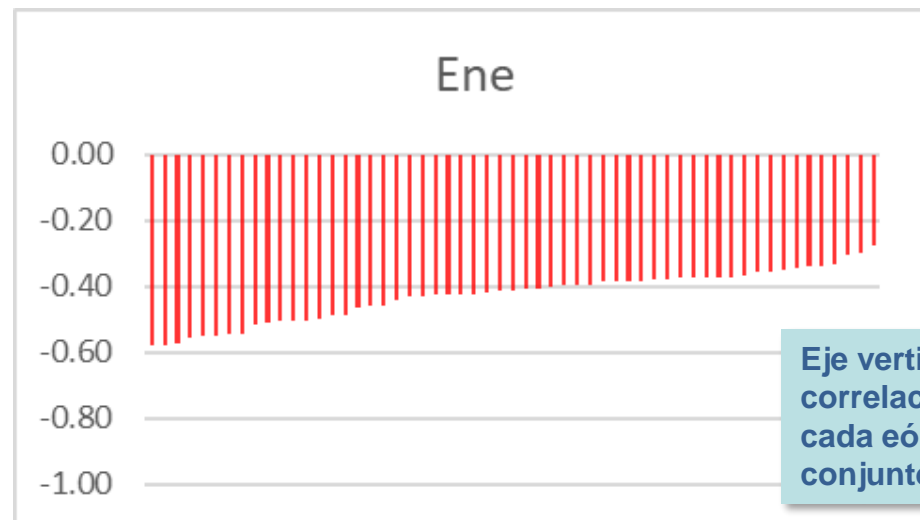


Se definen estaciones principales y “satélites” (condicionadas)

Correlación Espacial – Eólicas x Caudales



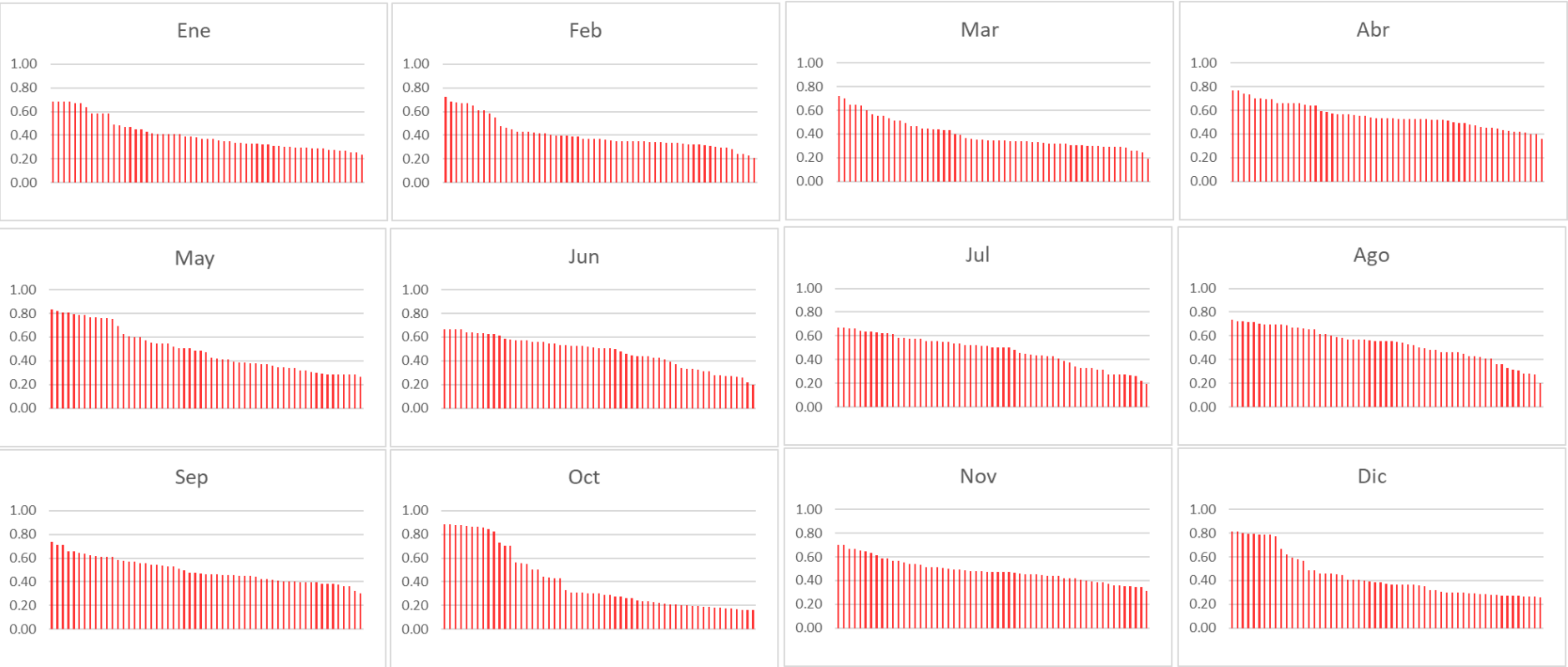
Eje vertical: máxima correlación **positiva** entre cada eólica (eje horizontal) y el conjunto de caudales



Eje vertical: máxima correlación **negativa** entre cada eólica (eje horizontal) y el conjunto de caudales

Correlación espacial mensual – Eólicas x Caudales

La correlación espacial eólica x caudal no varía mucho a lo largo del año

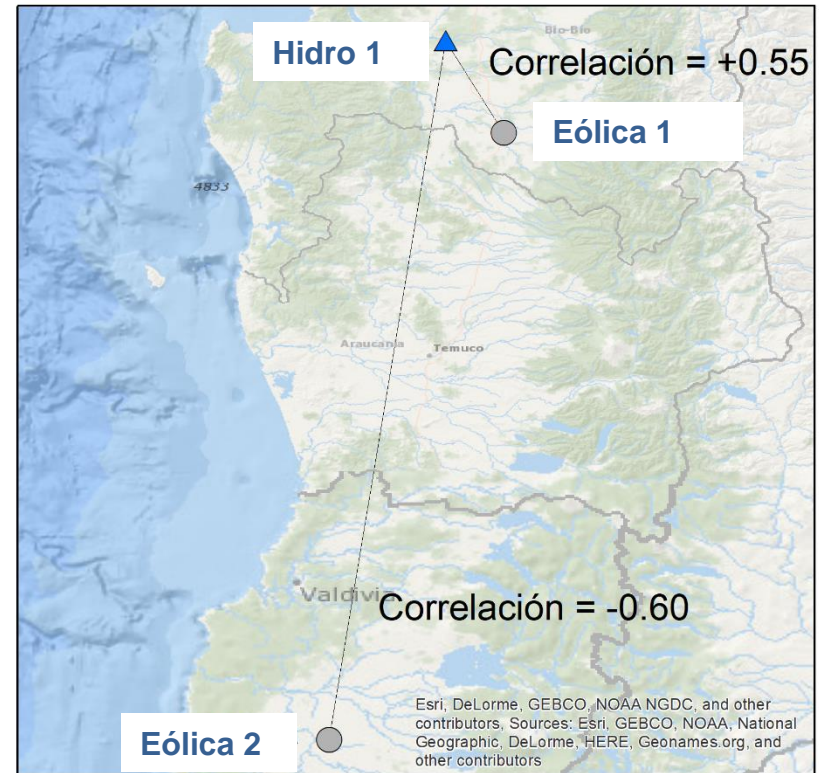
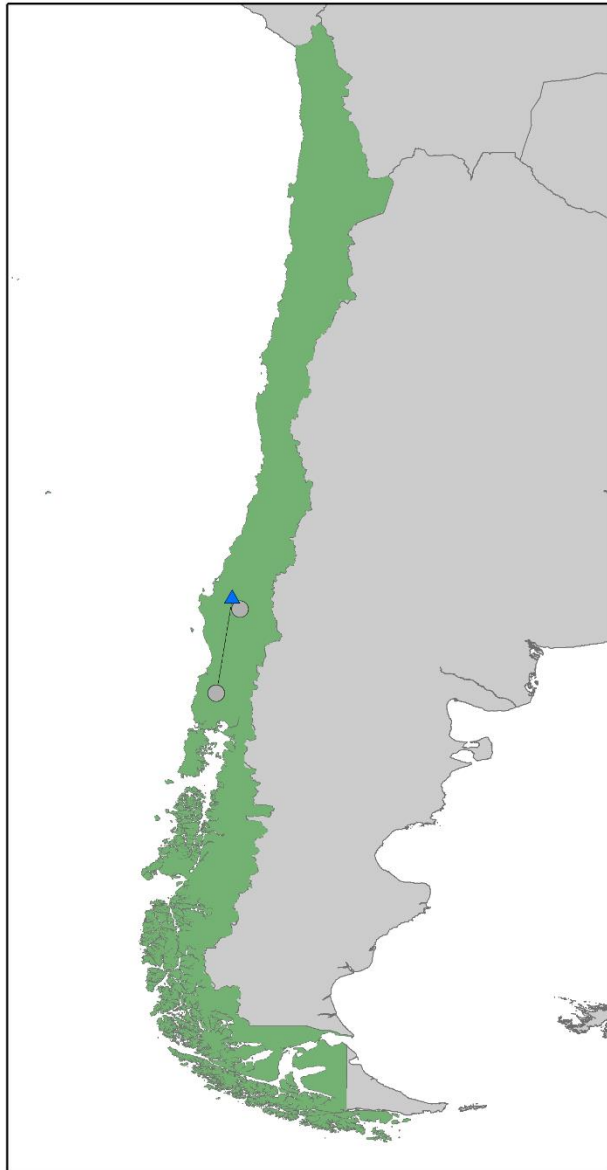


Correlación espacial mensual – Eólicas x Caudales

La correlación espacial eólica x caudal no varía mucho a lo largo del año



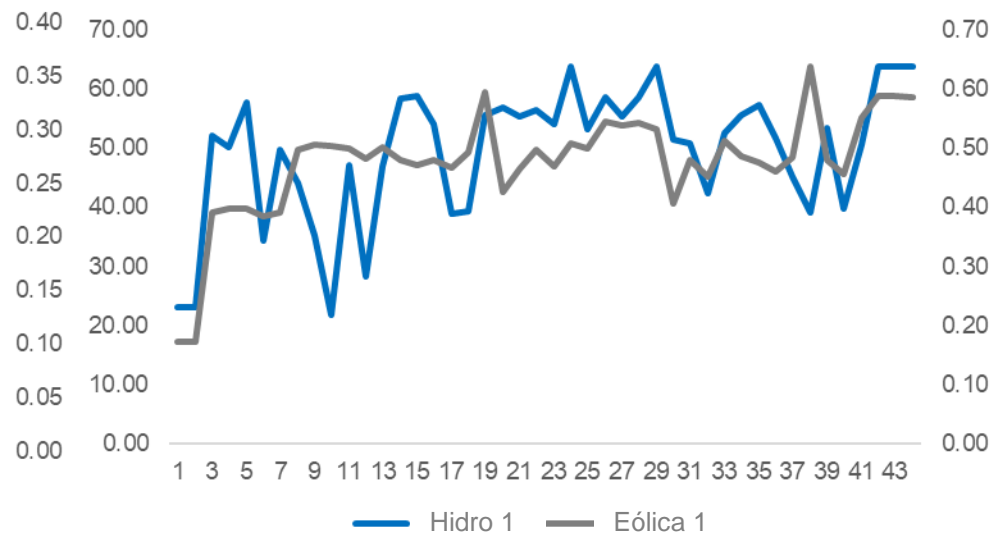
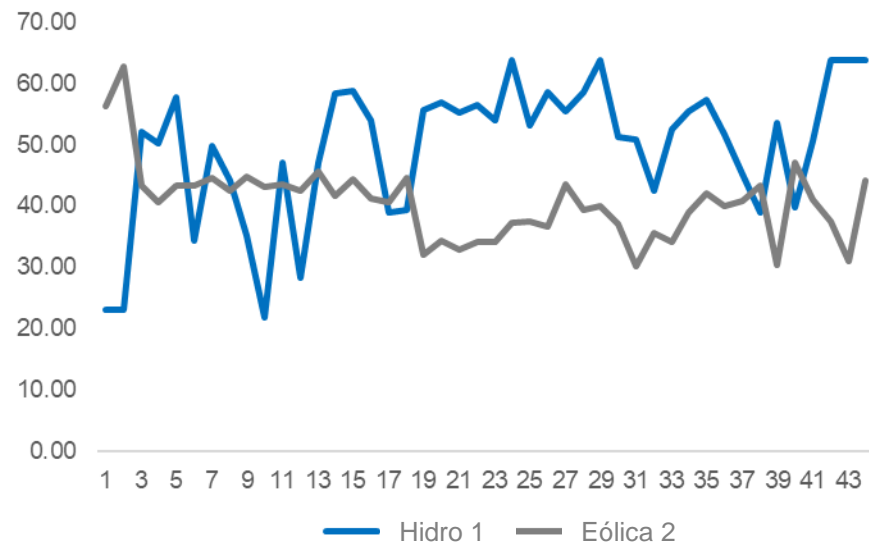
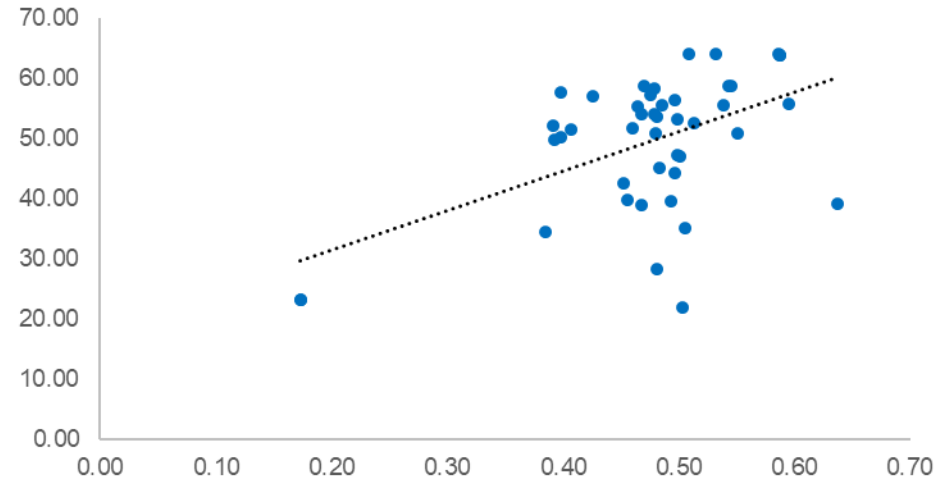
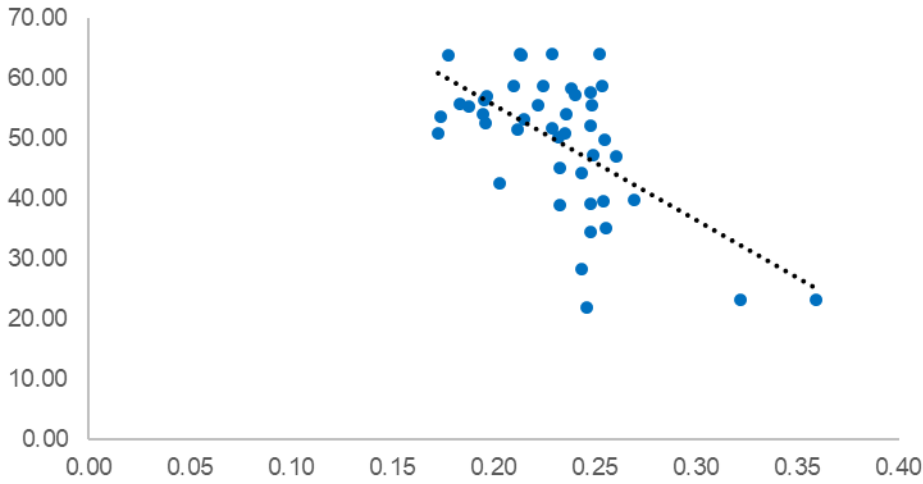
Ejemplo Correlación Eólica x Caudal



Ejemplo Correlación Eólica x Caudal

Eólica 2 vs. Hidro 1

Eólica 1 vs. Hidro 1



Costos de Flexibilidad

- Los costos de flexibilidad que serán evaluados son:

I	Costos Directos Encendido	Combustible, emisiones y otros costos.
II	Costo Indirecto Encendido	CAPEX y mantenimientos adicionales.
III	Costo de Seguimiento	CAPEX y mantenimientos adicionales.
IV	Costo de Eficiencia	Costos por operación en rangos de menor eficiencia
V	Costo de Oportunidad	Costo de oportunidad por aporte de reservas

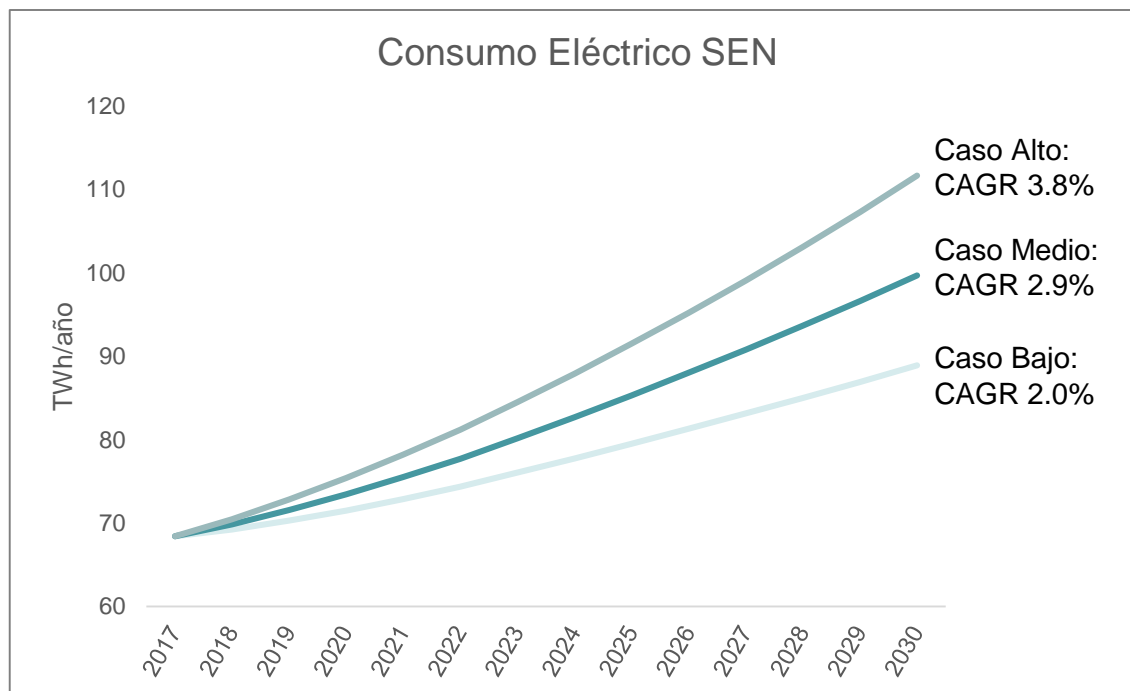
- Se valoran mediante funciones de costo dependientes de variables operativas obtenidas mediante la simulación.

Temario

- ▶ Conceptos Generales
- ▶ Herramientas de Modelación
- ▶ Objetivo del Estudio
- ▶ Metodología de Estudio
- ▶ **Supuestos del Estudio**

Demanda

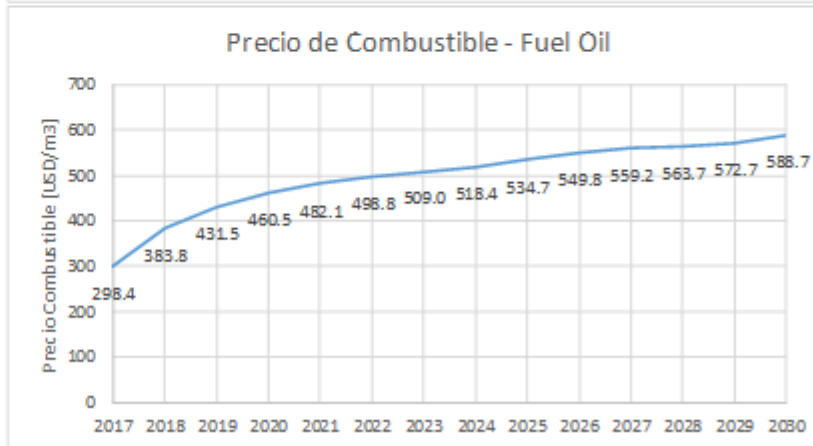
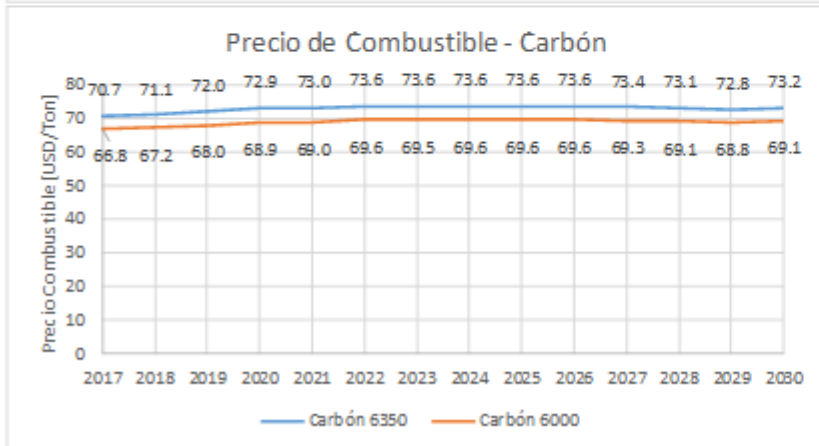
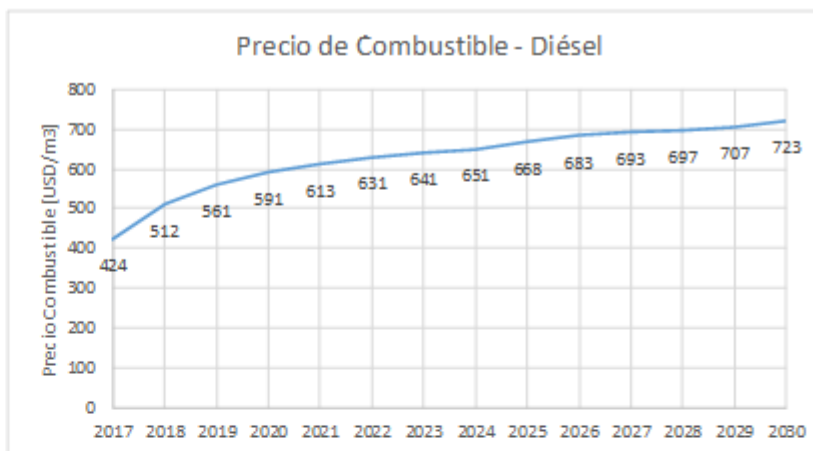
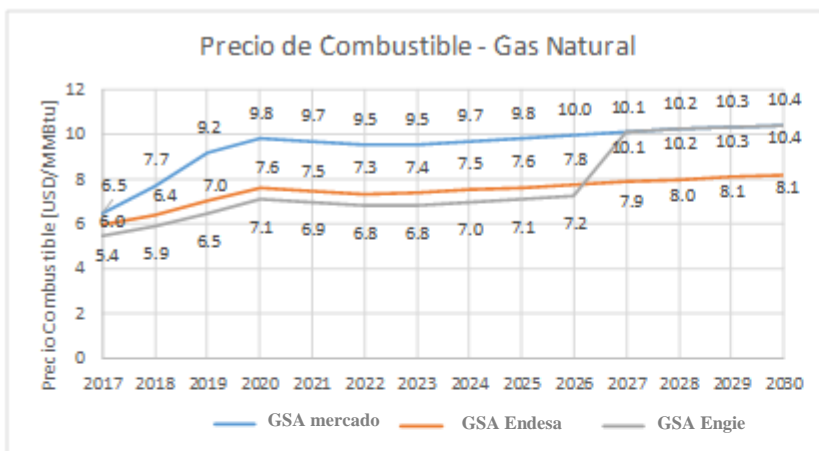
- ▶ Escenario medio proyectado en base a $\varepsilon_{Demanda-PIB}$
- ▶ Escenarios alto y bajo a partir de $PIB \pm 1\%$



Fuente: PSR-Moray. PIB basado en estimación FMI.

Costos Combustibles

- Se consideró un escenario de precios de combustibles



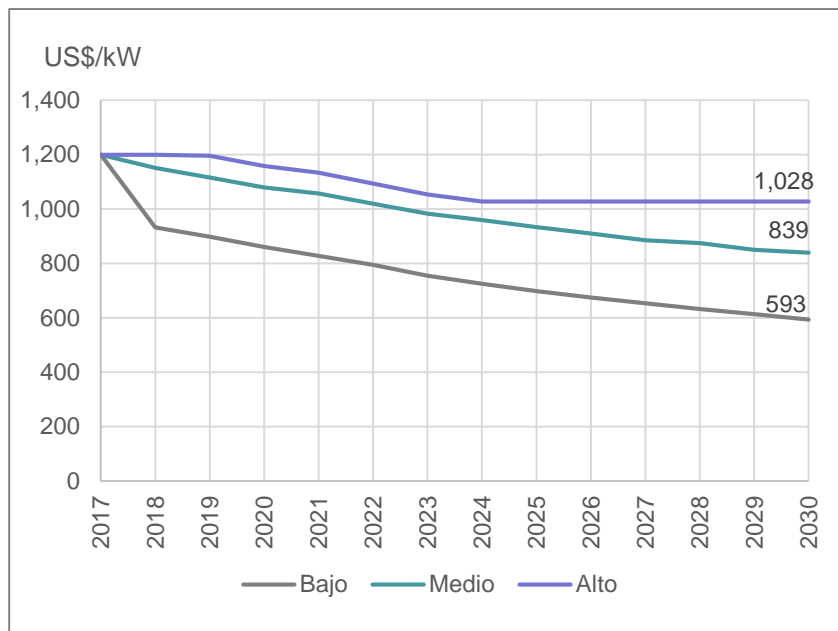
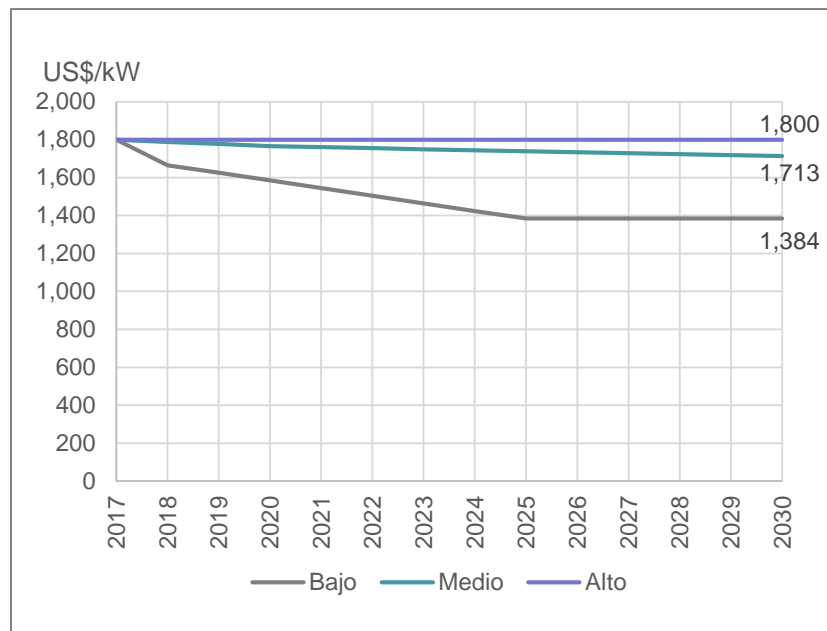
Fuente: Estudio de Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía (informe preliminar).

Nota (1). Precios de GSA Endesa y Engie en base a estimación de Moray

Costos de Inversión

- Se consideraron 3 escenarios de costo de inversión

Solar Fotovoltaico

Eólica¹

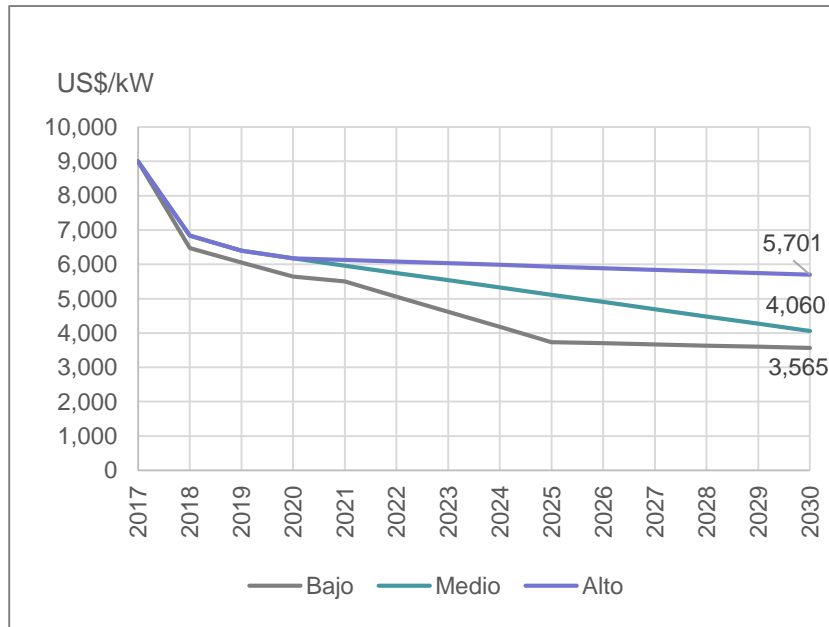
Fuente: Estudio de Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía (Preliminar).

Nota: (1) En la curva de costos de inversión de la tecnología eólica los niveles del caso Alto y Medio corresponden a los valores alto y medio respectivamente, propuestos por el Ministerio de Energía. Para el caso Bajo, se consideró una reducción de un 9% a partir del caso Medio, para así alcanzar el valor mínimo proyectado al 2030 por el estudio IEA Wind Task 26, Forecasting Wind Energy Costs & Cost Drivers: The Views of the World's Leading Experts, June 2016.

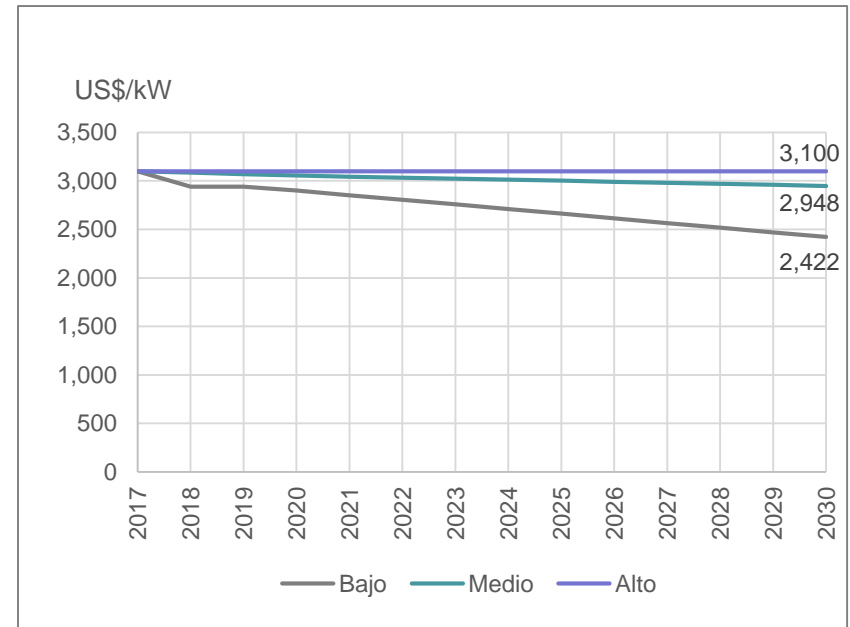
Costos de Inversión

- Se consideraron 3 escenarios de costo de inversión

Solar CSP



Biomasa

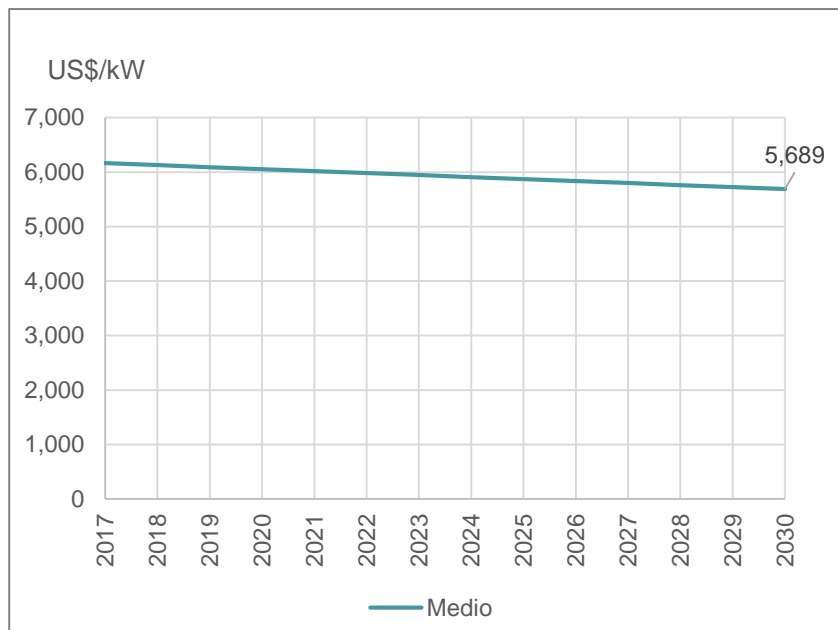
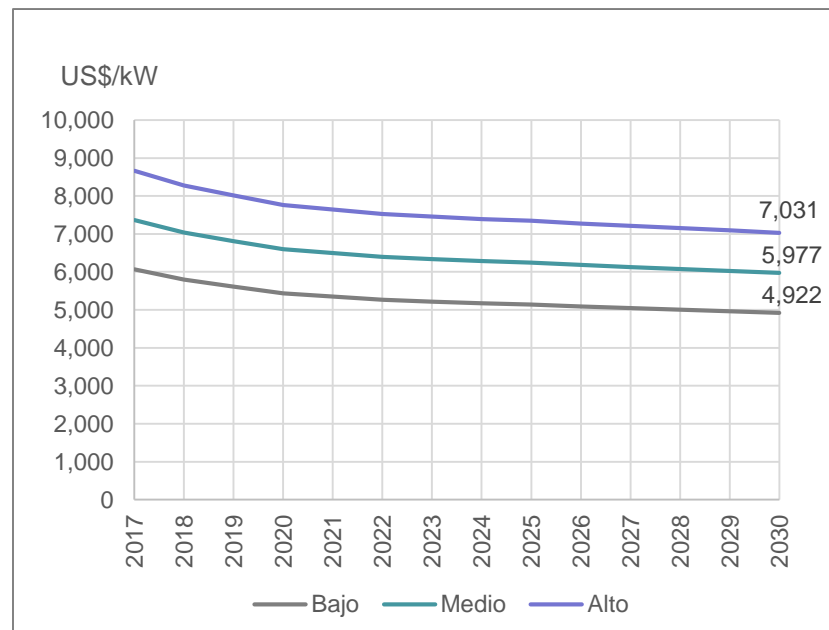


Fuente: Estudio de Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía (Preliminar).

Costos de Inversión

- Se consideraron 3 escenarios de costo de inversión

Geotermia

Baterías¹

Fuente: Estudio de Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía (Preliminar).

Nota: (1) Considera tecnología Lón-Litio y una capacidad de almacenamiento de 3 y 14 horas (dos modalidades)

Escenarios: Costos de Inversión

► Otras tecnologías:

- CC_GNL: 1,150 US\$/kW
- CA_GNL: 800 US\$/kW
- Diésel/Fuel Oil: 800 US\$/kW
- Carbón sin CCS: 3,000 US\$/kW

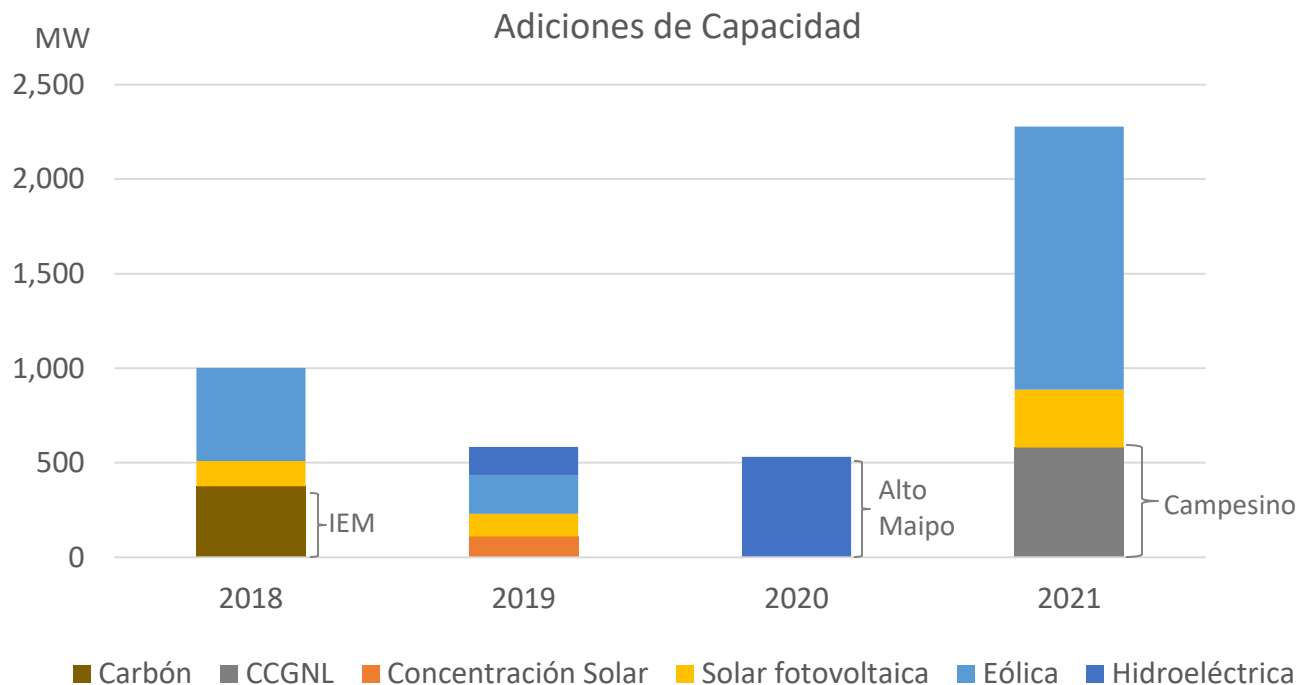
Fuente: Estudio de Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía (Preliminar).

Parámetros técnicos del modelo

- ▶ En base a lo acordado con la AG, solo se utilizó información pública para todas las unidades
- ▶ Se consideraron los parámetros técnicos publicados por el Coordinador Eléctrico Nacional para:
 - Unidades generadoras
 - Líneas de transmisión

Plan de obras

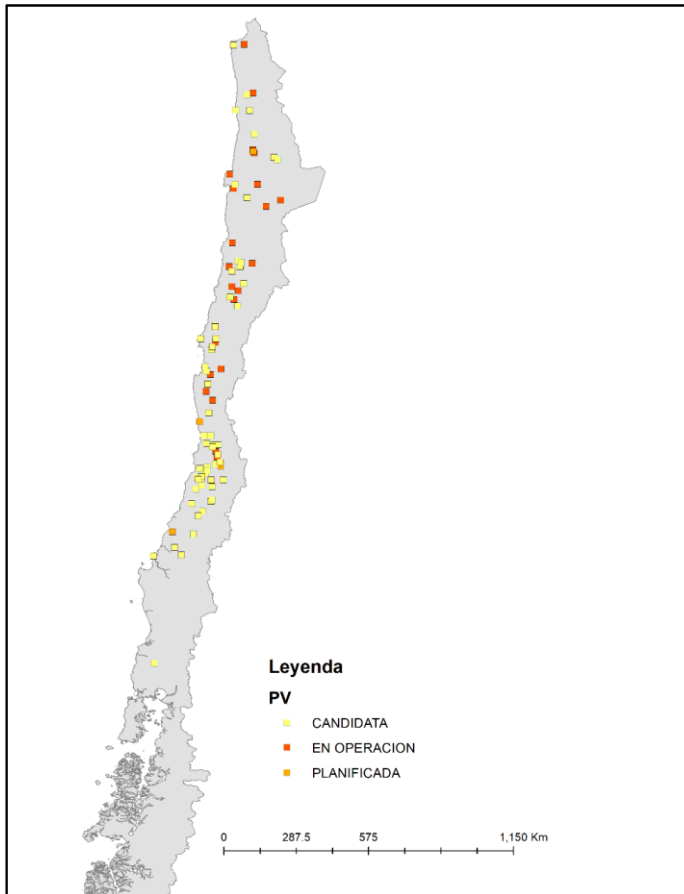
- Se consideraron las centrales en construcción y los proyectos con PPA's o energía adjudicada en licitaciones



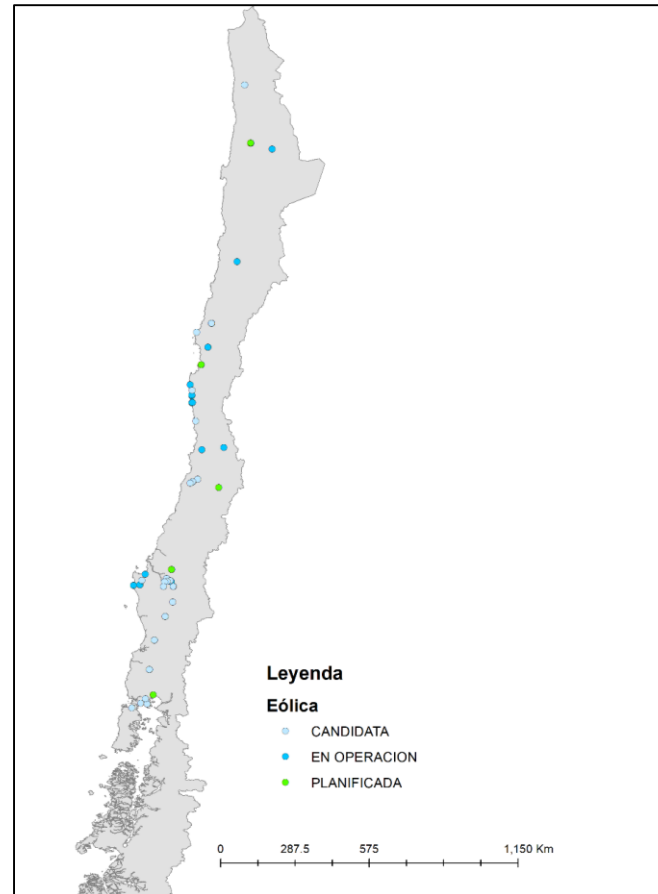
Candidatos de Expansión ERV

- Se utilizó ubicación de plantas no adjudicadas en procesos de licitación y proyectos genéricos en zonas cercanas

Solares



Eólicas



Análisis de Largo Plazo para el Sistema Eléctrico Nacional de Chile considerando Fuentes de Energía Variables e Intermitentes

Módulo 2: Metodología y Supuestos del Análisis

Muchas Gracias!



www.psr-inc.com



www.morayenergy.com



+55 21 3906-2100



+56 (2) 32451205