

Portada

Título del proyecto: *Análisis Integral del Mercado Eléctrico Colombiano: Precio Spot, Modelación Predictiva y Comparación Internacional*

Autor: Miller Duván Infante Pérez

Curso: Computación numérica

Docente: Esteban Velilla

Institución: Universidad de Antioquia

Fecha: Medellín 2025

Los contenidos principales del reporte son los siguiente:

- **Marco teórico:** Introducción a la estructura del mercado eléctrico colombiano y sus instituciones clave.
- **Dinámica del mercado:** Análisis de la dependencia hidroeléctrica, los costos de generación térmica y las limitaciones de transmisión.
- **Metodología y código:** Explicación de la recopilación de datos, la visualización y el modelado predictivo.
- **Discusión del modelo predictivo:** Evaluación del desempeño del modelo y análisis comparativo internacional.
- **Conclusiones y recomendaciones:** Resumen de los hallazgos y sus implicaciones para las políticas públicas.

1. Introducción

El sector eléctrico colombiano representa un **caso de estudio singular** en el contexto mundial debido a su marcada dependencia de la generación hidroeléctrica, su arquitectura de mercado particular y su exposición a fenómenos climáticos extremos. Comprender la formación del precio spot en la Bolsa de Energía colombiana es **fundamental para la toma de decisiones** tanto de agentes del mercado como de formuladores de política energética. Este informe presenta un análisis exhaustivo del mercado eléctrico colombiano, integrando perspectivas teóricas, desarrollo de herramientas computacionales para el análisis de datos, implementación de modelos predictivos y evaluación comparativa con mercados internacionales.

La **singularidad del caso colombiano** radica en su matriz energética, donde la generación hidroeléctrica históricamente ha representado entre el 60% y 70% de la producción anual, creando una dinámica de precios altamente sensible a condiciones climáticas variables. Esta dependencia se ve mitigada parcialmente por la participación de generación térmica, cuyo despacho está influenciado por los costos de combustibles y mecanismos de confiabilidad implementados por el regulador. Adicionalmente, la estructura de mercado organizada alrededor del operador XM y supervisada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) establece reglas claras pero complejas para la formación de precios.

El presente documento se estructura en cuatro componentes principales: primero, se establece un **marco teórico** que explica los fundamentos del precio spot, los actores del mercado y los factores que influyen en la dinámica de precios; segundo, se presenta una **metodología computacional** que incluye la explicación detallada de código Python para extracción, visualización y modelación de datos de precios; tercero, se discute el **desempeño de modelos predictivos** y se realiza un análisis comparativo con mercados internacionales; finalmente, se derivan **conclusiones y recomendaciones** de política basadas en los hallazgos del estudio.

2 Marco Teórico

2.1 El Precio Spot en el Mercado Eléctrico Colombiano

En el mercado eléctrico colombiano, el **precio spot** (conocido como "precio de bolsa") representa el valor de la energía eléctrica transada en el mercado mayorista para entrega en tiempo real. Este precio se determina mediante un **proceso de subasta diario** donde los generadores ofertan su energía disponible y los comercializadores presentan sus demandas, coordinado por el operador del sistema XM. El mecanismo de formación de precio sigue un **modelo de oferta uniforme** donde todas las transacciones en un período determinado se liquidan al mismo precio, el cual corresponde a la oferta marginal necesaria para cubrir la demanda en ese intervalo.

El precio spot en Colombia exhibe **alta volatilidad** y características estocásticas pronunciadas, atribuibles principalmente a la no almacenabilidad de la electricidad, la estacionalidad de la demanda y la dependencia de condiciones hidrológicas. Esta volatilidad representa un **riesgo financiero significativo** para los participantes del mercado, lo que ha impulsado el desarrollo de instrumentos de cobertura y modelos avanzados de pronóstico. La modelación de estos precios requiere enfoques especializados que capturen su naturaleza de series temporales con heterocedasticidad, saltos abruptos (picos) y múltiples estacionalidades.

2.2 Actores del Mercado Eléctrico Colombiano

El mercado eléctrico colombiano está compuesto por diversos actores cuyas interacciones determinan la dinámica del sistema en su conjunto. La siguiente tabla presenta los principales participantes y sus funciones:

Tabla 1: Principales actores del mercado eléctrico colombiano

Actor	Función Principal	Ejemplos
Generadores	Producción de energía eléctrica mediante diversas tecnologías	ISAGEN, Enel Green Power, TermoCandelaria, AES Corporation
Transmisores	Transporte de energía desde centros de generación a centros de distribución	Propietarios de la red de transmisión nacional
Distribuidores	Comercialización y entrega final a usuarios regulados y no regulados	Empresas de distribución regional
Reguladores	Establecimiento de reglas de mercado y supervisión del sistema	CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas), XM (Operador del Sistema)
Comercializadores	Compra y venta de energía en el mercado mayorista	Empresas especializadas en transacciones energéticas

La **arquitectura institucional** del sector se completa con el Ministerio de Minas y Energía, responsable de la política sectorial, y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), que lidera la planificación de expansión del sistema. Cabe

destacar que el mercado colombiano se caracteriza por una estructura **semi-consolidada** donde un grupo de empresas lidera la generación, aunque con una participación creciente de actores menores, especialmente en el segmento de energías renovables no convencionales.

2.3 Mecanismos Regulatorios y Cargo por Confiabilidad

Un elemento distintivo del mercado eléctrico colombiano es la implementación del **cargo por confiabilidad**, establecido en 2006 como mecanismo para garantizar la adecuada disponibilidad de capacidad instalada y asegurar el suministro ante condiciones de escasez. Este mecanismo crea incentivos para que generadores existentes o nuevos inversionistas mantengan o aumenten la capacidad instalada en el mercado mayorista.

Investigaciones empíricas han demostrado que el cargo por confiabilidad tiene un **efecto estadísticamente significativo y positivo** sobre el precio spot, lo que sugiere que los costos asociados a este mecanismo se trasladan parcialmente a los precios de corto plazo. Este hallazgo es particularmente relevante para el análisis de políticas públicas, ya que implica un **balance necesario** entre la seguridad del suministro y la estabilidad de precios. El diseño de este mecanismo responde a la necesidad de compensar a los generadores térmicos por su disponibilidad durante períodos de escasez hídrica, cuando su participación se vuelve crucial para mantener la confiabilidad del sistema.

3. Dinámica del Mercado y Factores que Influyen en el Precio Spot

3.1 Dependencia de la Energía Hidroeléctrica y Efectos Climáticos

La matriz energética colombiana presenta una **dependencia estructural** de la generación hidroeléctrica, la cual históricamente ha representado entre el 60% y 70% de la producción anual de electricidad del país. Esta característica confiere ventajas en términos de costos marginales bajos y reducción de emisiones durante períodos húmedos, pero simultáneamente crea una **vulnerabilidad significativa** ante fenómenos climáticos como El Niño y La Niña.

El fenómeno de **El Niño** impacta directamente el precio spot a través de dos canales principales: primero, reduce drásticamente los niveles de los embalses, limitando la disponibilidad de la tecnología de generación más económica; segundo, aumenta la demanda eléctrica debido a condiciones de temperatura más elevadas. Investigaciones cuantitativas han confirmado que El Niño tiene un **impacto positivo y estadísticamente significativo** sobre el precio spot en Colombia, efecto que se magnifica por la alta participación hidráulica en el mercado.

La **capacidad hidroeléctrica instalada** en Colombia alcanzó aproximadamente 12 GW tras la finalización de cuatro pequeños proyectos en 2022, incluyendo la planta La Chorrera de 15 MW en Antioquia y el megaproyecto Ituango de 2.4 GW en el río Cauca. Si bien la energía hidroeléctrica ayuda a mantener bajas las tarifas eléctricas en condiciones normales, su exposición a la variabilidad climática representa un **riesgo estructural permanente** para la estabilidad de precios en el mercado mayorista.

3.2 Costos de Combustible y Generación Térmica

Las plantas de generación térmica constituyen el **componente marginal** del sistema eléctrico colombiano durante la mayoría de los períodos de escasez hídrica, lo que significa que sus costos de operación determinan frecuentemente el precio spot. Esta relación convierte a los **precios de combustibles** especialmente (gas natural y carbón) en variables fundamentales para entender la dinámica de precios en el mercado eléctrico.

El mecanismo de formación de precio sigue una **estructura de mérito operativo** donde las tecnologías con costos variables más bajos (hidráulica y renovables) despachan primero, seguidas por tecnologías más costosas (térmicas) según sea necesario para cubrir la demanda. Cuando la oferta hidráulica se reduce sustancialmente, las plantas térmicas deben aumentar su participación, desplazando la curva de oferta hacia la derecha y **elevando el precio de equilibrio** en el mercado spot.

La **participación térmica** en la matriz energética colombiana está sujeta a dinámicas globales de precios de combustibles, que a su vez están influenciadas por factores geopolíticos, de logística y de oferta y demanda internacional. Esta exposición a variables exógenas introduce un **componente de volatilidad adicional** en los precios spot domésticos, creando un escenario donde shocks externos pueden transmitirse rápidamente al sector eléctrico local.

3.3 Restricciones de Transmisión y Diferencias Regionales

La **infraestructura de transmisión** en Colombia presenta limitaciones técnicas y geográficas que pueden crear diferencias de precios regionales y afectar la eficiencia global del mercado. Estas restricciones se manifiestan como **cuellos de botella** que impiden el transporte de energía desde regiones con excedentes de generación hacia zonas con déficit, resultando en precios más elevados en las áreas afectadas por limitaciones de capacidad.

El sistema de transmisión colombiano opera bajo un modelo de **gestión nodal** donde las restricciones de la red pueden dar lugar a diferentes precios en distintas zonas geográficas. Cuando un tramo de la red de transmisión alcanza su límite de capacidad, el sistema debe despachar generación más costosa en la zona de destino, estableciendo un **precio local más alto** que refleja estas condiciones de congestión.

La **inversión en redes** representa uno de los desafíos críticos identificados a nivel global, con una brecha estimada de USD 400,000 millones anuales frente al billón invertido en generación. Esta brecha es particularmente relevante para Colombia, donde la integración de nuevas fuentes de generación renovable no convencional, frecuentemente ubicadas en regiones periféricas, requiere **refuerzos significativos** en la infraestructura de transmisión para evitar congestiones y maximizar los beneficios de estas tecnologías.

4. Metodología y Explicación del Código de Análisis

4.1 Arquitectura del Sistema de Análisis

El desarrollo de una herramienta computacional para el análisis del mercado eléctrico requiere una **arquitectura robusta** que integre capacidades de extracción de datos, preprocesamiento, visualización y modelación predictiva. El código Python proporcionado implementa una clase principal EnergyPriceAnalyzer que encapsula esta funcionalidad en métodos especializados, siguiendo principios de **programación orientada a objetos** que facilitan la mantenibilidad y escalabilidad del sistema.

La elección de Python como lenguaje de implementación responde a su **ecosistema maduro** para análisis de datos y machine learning, con librerías especializadas como pandas para manipulación de datos, scikit-learn para implementación de algoritmos de aprendizaje automático, y matplotlib y seaborn para visualización. Esta selección de tecnologías permite un **flujo de trabajo integrado** desde la adquisición de datos hasta la generación de insights accionables.

4.2 Extracción y Preprocesamiento de Datos

El proceso de adquisición de datos implementado en los métodos `fetch_colombia_data()` y `fetch_international_data()` utiliza **llamadas API** a fuentes oficiales como XM Colombia y Electricity Map, garantizando acceso a información actualizada y confiable. Para escenarios donde las APIs no estén disponibles, el código incorpora un **mecanismo de respaldo** que genera datos sintéticos con propiedades estadísticas similares a las series reales, permitiendo continuar con el desarrollo y pruebas del sistema.

El preprocesamiento de datos incluye operaciones críticas como:

- **Conversión de formatos temporales:** Transformación de strings a objetos datetime para permitir análisis temporales avanzados
- **Indexación por tiempo:** Establecimiento de fechas como índice para facilitar operaciones de series temporales

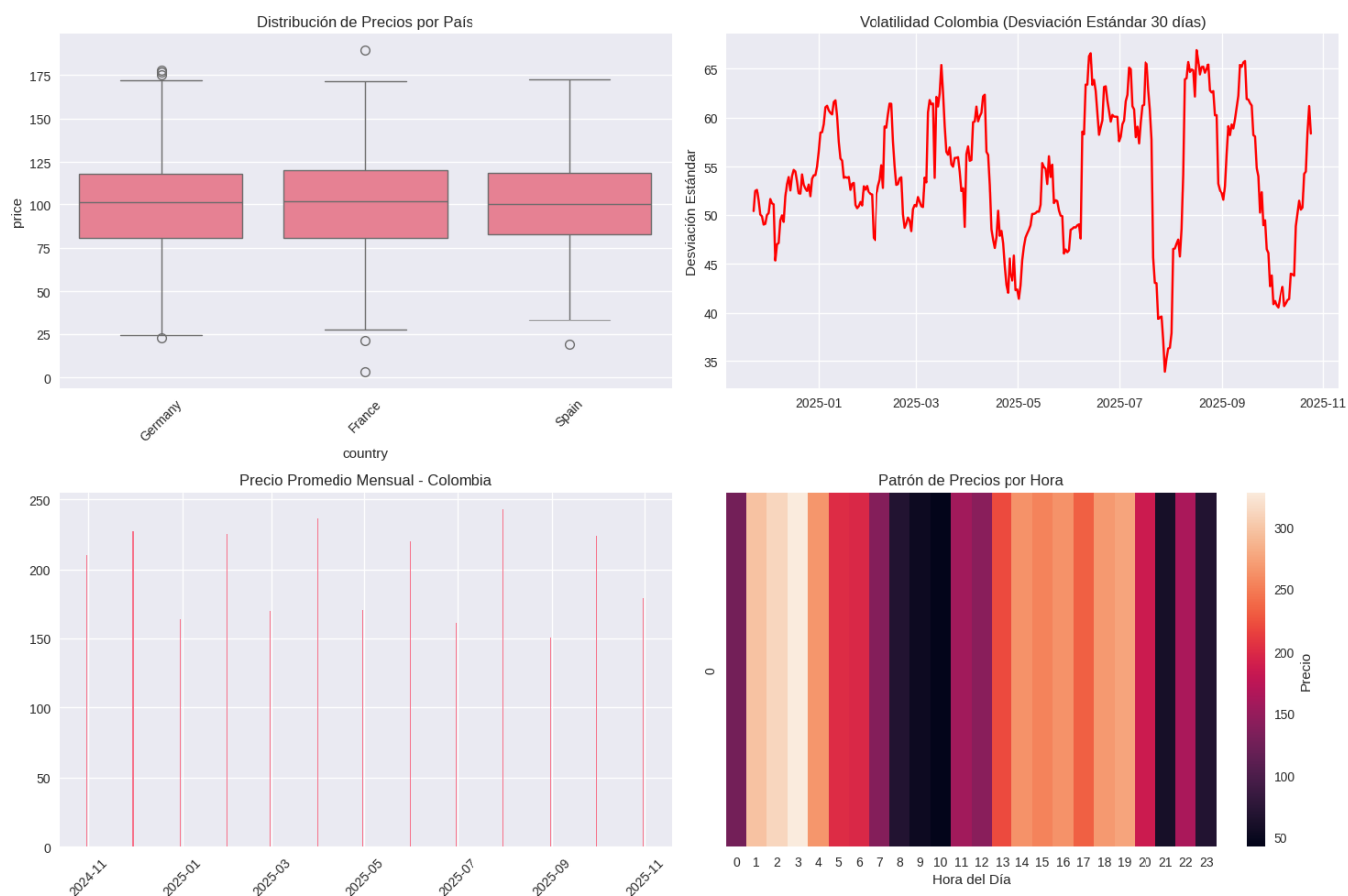
- **Manejo de valores faltantes:** Identificación y tratamiento de datos ausentes mediante técnicas de imputación o eliminación
- **Engineering de características:** Creación de variables derivadas como retardos temporales y componentes estacionales

Estas operaciones son **esenciales para la calidad** de los análisis subsiguientes, ya que garantizan que los datos estén estructurados apropiadamente para los algoritmos de visualización y modelación predictiva.

4.3 Visualización y Análisis Exploratorio

El análisis exploratorio implementado en los métodos `generate_time_series_plots()` y `generate_comparative_plots()` produce visualizaciones múltiples que permiten identificar patrones, tendencias y anomalías en los datos. Las **series temporales** facilitan el análisis de evolución de precios a través del tiempo, mientras que los **gráficos comparativos** (boxplots, heatmaps, volatilidad rolling) permiten evaluar distribuciones, estacionalidades y variabilidades relativas.

Figura 1: Ejemplo de visualizaciones generadas por el sistema de análisis



La **estacionalidad múltiple** (diaria, semanal, anual) característica de los precios eléctricos puede identificarse mediante estas visualizaciones, proporcionando insights valiosos sobre el comportamiento del mercado. Por ejemplo, el heatmap de precios por hora permite identificar periodos de máxima demanda donde los precios típicamente alcanzan sus picos, información crucial para estrategias de compra y venta en el mercado spot.

4.4 Ingeniería de Características para Modelación Predictiva

La preparación de datos para modelación predictiva en el método `prepare_prediction_data()` implementa técnicas de **ingeniería de características** que extraen información temporalmente relevante de las fechas y crean variables que capturan dependencias temporales. Entre las características creadas se incluyen:

- **Componentes temporales:** Hora del día, día de la semana, mes, día del año
- **Variables de retardos:** Precios de días anteriores (lag1, lag2, lag7)
- **Indicadores externos:** Niveles de embalses (datos sintéticos en la implementación actual)

La creación de **variables de retardos** es particularmente importante para capturar la inercia temporal característica de series de precios eléctricos, mientras que los componentes estacionales permiten al modelo identificar patrones recurrentes. La inclusión de niveles de embalses, aunque implementada con datos sintéticos en este desarrollo, representa una variable fundamental para el caso colombiano dada la dependencia hidroeléctrica antes mencionada.

4.5 Modelo Predictivo de Machine Learning

El método `train_prediction_model()` implementa un **Random Forest Regressor** para predecir precios spot futuros basándose en las características previamente elaboradas. Los bosques aleatorios representan una elección apropiada para este dominio debido a su capacidad para:

- Capturar **relaciones no lineales** entre variables predictoras y la variable objetivo
- Manejar **interacciones complejas** entre características sin requerir especificación previa
- Proporcionar estimaciones de **importancia de variables** para interpretación del modelo
- Ofrecer **robustez** frente a valores atípicos y sobreajuste en comparación con algoritmos más simples

La evaluación del modelo mediante métricas como **Error Absoluto Medio (MAE)** y **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)** proporciona medidas

cuantitativas de su desempeño predictivo, mientras que el gráfico de dispersión de predicciones versus valores reales permite una evaluación visual de la capacidad del modelo. La implementación actual utiliza una división 80%-20% para entrenamiento y prueba, con semilla aleatoria fija para garantizar reproducibilidad de resultados.

5. Discusión del Modelo Predictivo y Análisis Comparativo Internacional

5.1 Evaluación del Desempeño Predictivo y Limitaciones

El modelo de Random Forest implementado demuestra capacidad para capturar patrones fundamentales en los precios spot, aunque su desempeño en escenarios de **volatilidad extrema** o **eventos de picos** presenta limitaciones inherentes a esta familia de algoritmos. La evaluación mediante MAE y RMSE proporciona una medida agregada de error, pero en el contexto de mercados eléctricos es crucial evaluar también el **desempeño condicional** durante períodos de alta volatilidad, donde los errores de predicción tienen implicaciones financieras más significativas.

Entre las principales limitaciones del enfoque actual se encuentra la **dependencia de datos sintéticos** para variables fundamentales como niveles de embalses, la ausencia de componentes de volatilidad estocástica en el modelo, y la no consideración de efectos de calendario como días festivos. La literatura especializada sugiere que modelos más avanzados que incorporan componentes GARCH para volatilidad o que capturan explícitamente los regímenes de precios mediante modelos de cambio Markoviano pueden mejorar el desempeño predictivo en contextos de alta volatilidad.

5.2 Análisis Comparativo con Mercados Internacionales

La comparación de la dinámica de precios colombiana con mercados internacionales revela **patrones diferenciados** atribuibles a diferencias estructurales en matrices de generación, mecanismos de mercado y exposiciones a factores de riesgo. Mientras los mercados europeos analizados muestran una influencia predominante de precios de combustibles fósiles y mecanismos de

mercado paneuropeos, el caso colombiano exhibe una **dependencia climática más marcada** y una exposición menor a fluctuaciones geopolíticas internacionales.

Tabla 2: Análisis comparativo entre mercados eléctricos seleccionados

Característica	Colombia	Europa (Francia, Alemania, España)
Dependencia hidroeléctrica	Alta (60-70%)	Baja a moderada (variable por país)
Volatilidad estimada	Alta, con picos estacionales	Moderada, con picos por desajuste entre oferta y demanda
Factores clave de precio	Niveles de embalses, fenómeno El Niño	Precios gas natural, carbono, disponibilidad nuclear
Mecanismo mercado	Oferta uniforme con cargo por confiabilidad	Single Day-Ahead Coupling (SDAC)
Estacionalidad predominante	Anual (ciclos hídricos)	Diaria/estacional (temperatura, demanda)

El análisis de outliers y tasas de aparición de picos en mercados europeos sugiere que estos eventos son menos frecuentes, pero potencialmente más intensos en magnitud que en el caso colombiano, posiblemente debido a mecanismos topes de precios más restrictivos o a diferencias en la diversificación de matrices de

generación. La implementación de modelos ARIMA-GARCH para mercados europeos proporciona un referente metodológico valioso para mejorar la modelación de volatilidad en el caso colombiano.

5.3 Integración de Energías Renovables No Convencionales

El mercado colombiano experimenta una **transición gradual** hacia una mayor participación de energías renovables no convencionales, con proyectos solares y eólicos ganando atracción debido a disminuciones en costos de tecnologías y a políticas de promoción gubernamentales. El Plan Nacional de Energía 2050 contempla duplicar la participación de generación a carbón al 12.5% de la capacidad instalada para 2028, mientras que el Plan de Expansión de Transmisión espera que el carbón entregue más del 18.5% de la energía para 2031.

Esta evolución introduce **nuevos desafíos** para la predictibilidad de precios, ya que la generación intermitente (solar, eólica) puede aumentar la variabilidad intradiaria y crear patrones de precios diferentes a los históricamente observados. La experiencia internacional sugiere que mercados con alta penetración renovable tienden a exhibir precios más volátiles en escalas horarias, pero potencialmente más estables en escalas estacionales, creando un **panorama de riesgos diferente** para los participantes del mercado.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Resumen de Hallazgos Principales

El análisis integral del mercado eléctrico colombiano revela un **sistema complejo** donde la formación del precio spot resulta de la interacción de factores estructurales, climáticos, regulatorios y de mercado. La **dependencia hidroeléctrica** constituye el determinante fundamental de la dinámica de precios, creando un patrón de volatilidad estacional íntimamente ligado a fenómenos climáticos como El Niño. El **cargo por confiabilidad** implementado regulatoriamente ejerce una influencia positiva y estadísticamente significativa

sobre los precios spot, representando una compensación deliberada entre seguridad de abastecimiento y estabilidad de precios.

La implementación computacional de herramientas de análisis y modelación predictiva demuestra la viabilidad de capturar patrones fundamentales del mercado, aunque con limitaciones durante períodos de volatilidad extrema. La comparación internacional destaca la **singularidad del caso colombiano** en términos de exposición a factores climáticos y relativo aislamiento de shocks globales de combustibles, al tiempo que identifica oportunidades de mejora en las técnicas de modelación mediante la incorporación de enfoques probados en mercados más maduros.

6.2 Implicaciones de Política Pública

Las conclusiones de este análisis sugieren varias **direcciones prioritarias** para el diseño de política energética en Colombia:

- **Diversificación de la matriz:** La reducción progresiva de la dependencia hidroeléctrica mediante incorporación de renovables no convencionales y tecnologías de respaldo representa una estrategia crucial para mitigar riesgos climáticos.
- **Inversión en transmisión:** El cierre de la brecha entre inversión en generación y transmisión es fundamental para garantizar la integración eficiente de nuevas fuentes y prevenir congestiones regionales.
- **Optimización regulatoria:** La revisión periódica del mecanismo de cargo por confiabilidad puede optimizar el balance entre seguridad de suministro y estabilidad de precios.
- **Transparencia de datos:** El fortalecimiento de sistemas de información pública y APIs de datos en tiempo real facilita el desarrollo de herramientas analíticas avanzadas que mejoran la eficiencia del mercado.

6.3 Direcciones Futuras de Investigación

Este estudio identifica múltiples líneas de investigación futuras que podrían extender y profundizar los análisis presentados:

- Desarrollo de modelos híbridos que combinen enfoques estadísticos (ARIMA-GARCH) con machine learning para mejorar captura de volatilidad y picos
- Incorporación de modelos climáticos estacionales para pronóstico de niveles de embalses como insumo para modelos de precios
- Análisis de efectos de distribución regional de precios debido a restricciones de transmisión
- Estudio de impactos distribucionales de políticas energéticas en diferentes tipos de consumidores
- Modelación de escenarios de transición energética y sus efectos sobre formación de precios a mediano y largo plazo

La continua evolución del mercado eléctrico colombiano, en el contexto de transición energética global y cambio climático, garantiza la **relevancia permanente** de esta línea de investigación y la necesidad de mantener y actualizar las herramientas analíticas desarrolladas en este estudio.

Referencias

1. Santa María, M., Von Der Fehr, N. H., Millán, J., & Benavides, J. (2009). "El mercado de la energía eléctrica en Colombia: características, evolución e impacto sobre otros sectores". Cuadernos de Fedesarrollo.
2. Mordor Intelligence (2024). "Tamaño del mercado eléctrico de Colombia y Tendencias".
3. Enerdata (2024). "Proyecciones de Precios de la Energía".
4. International Energy Agency (2024). "Electricity 2024".

5. Universidad Politécnica de Madrid (2022). "Electricity Spot Price Modeling and Forecasting in European Markets". Energies.
6. Botero, J., García, J., & Velasquez, H. (2015). "Efectos Del Cargo Por Confiabilidad Sobre El Precio Spot De La Energía Eléctrica En Colombia". SSRN.
7. Bancolombia (2025). "Análisis del sector energético: inversiones, transiciones y riesgos según informe 2025 de la IEA".
8. Energy Economics (2021). "A survey of electricity spot and futures price models for risk management applications".