

Simulación del precio en bolsa de la energía eléctrica en Colombia con un modelo de régimen cambiante basado en el ENSO

Sergio Andrés Vargas Torres

Universidad de los Andes

Bogotá D.C., Colombia

Junio 2014

Resumen

COLOMBIA es uno de los países a nivel mundial con mayor participación del agua como fuente generadora de energía. En este país, las alteraciones climatológicas ocasionadas por el ENSO disminuyen las precipitaciones y hacen más costosa la generación hidráulica. En la literatura se encuentran numerosas publicaciones que tiene como objetivo estudiar el precio de la electricidad en diferentes mercados energéticos, sin embargo en el caso específico de Colombia, no se conoce un modelo que estudie el comportamiento de la energía e incorpore de manera robusta el efecto del ENSO. En este artículo se propone un modelo de régimen cambiante para simular el precio en bolsa de la energía en Colombia. El cambio de régimen se realiza mediante un proceso estocástico que describe el tiempo entre arribos, la duración y la intensidad del ENSO.

1. Introducción

Desde la creación de la Bolsa de Energía a mediados de 1995, en Colombia se cuenta con un precio de mercado de la energía que cambia dinámicamente y refleja las condiciones actuales de la industria eléctrica en este país. Este precio es conocido como *precio en bolsa de la energía* y es determinado mediante una subasta de precio uniforme en la cual participan las empresas generadoras de electricidad (CREG, 1994).

En la actualidad, la generación de energía eléctrica en Colombia se realiza en un 70% a través de recursos hídricos (XM, 2014; International Energy Agency, 2013). Esto hace que el precio en bolsa de la energía se vea afectado en gran medida por las condiciones climatológicas y en especial por las precipitaciones, que en últimas definen el funcionamiento de las plantas hidroeléctricas (García et al., 2011). Dicho esto, un fenómeno climatológico como El Niño Southern Oscillation (ENSO) es determinante cuando se estudia el comportamiento del precio de la energía en el caso concreto de Colombia.

El ENSO se define como el aumento anormal en la temperatura de las aguas superficiales en el pacífico tropical y es causal de múltiples perturbaciones climatológicas principalmente en América del Sur (Nobre and Srukla, 1996). Poveda et al. (2001) señala que uno de los principales efectos del ENSO en Colombia es la reducción en las precipitaciones, lo cual disminuye la disponibilidad de agua y ocasiona un incremento en los costos marginales de generación de la energía. A pesar de la incidencia del ENSO y la importancia de la generación hidráulica en Colombia, no se conoce en la literatura un modelo que estudie el comportamiento de la energía en este país incorporando de manera robusta el efecto del ENSO.

En este artículo proponemos un modelo de régimen cambiante para simular el precio en bolsa de la energía en Colombia incorporando el efecto del ENSO. Los cambios de régimen están basados en un proceso estocástico que describe el tiempo entre arribos del ENSO, al igual que la duración e intensidad del mismo. El resto del artículo tiene la siguiente estructura: en la sección 2 se realiza una revisión de antecedentes relevantes para el desarrollo del modelo aquí propuesto. En la sección 3 se presenta la formulación del modelo propuesto para simular el precio en bolsa de la energía. La sección 4 presenta los resultados obtenidos al implementar el modelo de simulación. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del artículo y se perfila el trabajo futuro.

2. Antecedentes

2.1. Mercado eléctrico colombiano

En 1994 el mercado de la energía eléctrica en Colombia fue reestructurado a través de la Ley 142, en la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y la Ley 143, en la cual se establece el régimen para las actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de energía eléctrica. Esta reestructuración tuvo como uno de sus principales objetivos garantizar la calidad y eficiencia en la prestación del servicio eléctrico en el país, permitiendo la participación de agentes privados.

La reforma implementada en 1994 estableció una nueva configuración del mercado eléctrico en Colombia y de los agentes que participan en él, a través de la creación del Mercado de Energía Mayorista (MEM). En este mercado, las transacciones entre generadores y comercializadores se pueden realizar bien sea mediante contratos bilaterales de compra y venta con precios y cantidades libremente establecidos, o a través de transacciones directas en la Bolsa de Energía (UPME, 2004). Esta bolsa es administrada por el Centro Nacional de Despacho (CND) bajo un esquema de libre oferta y demanda, promoviendo la competencia y la generación de incentivos que resulten en beneficios para los usuarios finales de la electricidad.

2.2. Modelos para los precios de la energía

El comportamiento del precio de la energía ha sido objeto de numerosos estudios en la literatura. De manera general, se pueden identificar dos grandes grupos de modelos que se han propuesto para estudiar el precio de la electricidad: 1) Modelos autorregresivos y 2) Modelos de saltos y/o de régimen cambiante.

2.2.1. Modelos autorregresivos

Dentro de este grupo se encuentran estudios como el realizado por Guthrie and Videbeck (2007) en el cual se propone una autoregresión periódica (PAR) para modelar el precio spot de la energía, usando datos de la mercado eléctrico de Nueva Zelanda. Los mismos autores proponen en (Guthrie and Videbeck, 2002) modelos PAR, esta vez para dar soporte al tratamiento de la energía entre horas como commodities diferentes que generan un mercado entre-día. De igual manera en la literatura se encuentran trabajos como el publicado por Misiorek et al. (2006) donde se calibran modelos ARMA, ARMAX y GARCH a los precios spot del California Power Exchange (CalPX) system.

2.2.2. Modelos de saltos y/o régimen cambiante

La energía es un commodity con capacidad de almacenamiento limitada, lo cual hace que se precio sea altamente sensible a las condiciones temporales de la oferta y la demanda (De Jong, 2006). Cambios inesperados de estas condiciones hacen que los precios presenten picos pronunciados, gracias a la poca flexibilidad de las plantas generadoras resultado de los costos de arranque y parada propios de esta actividad. Existe un gran número de trabajos en la literatura que tienen como objetivo estudiar el precio de la energía eléctrica haciendo uso de modelos de difusión con saltos aleatorios y modelos de régimen cambiante.

Los picos inesperados en los precios de la energía pueden ser modelados con saltos representados mediante variables aleatorias completamente independientes del proceso principal que siguen dichos precios (Cartea and Figueroa, 2005; Weron et al., 2004), o con variables que dependen de factores relacionados con la energía misma (Huisman, 2008). Adicionalmente, la naturaleza de los precios de la energía se puede estudiar con modelos de régimen cambiante, donde el supuesto es que existen dos o más procesos que ocurren de manera simultánea y el precio sigue uno de estos procesos con cierta probabilidad (Bierbrauer et al., 2004; Haldrup and Nielsen, 2006). Cuando hay un cambio en el proceso que describe el comportamiento del precio, se dice que hay un cambio de régimen y en la mayoría de los casos se presenta un régimen normal y un régimen de pico.

2.3. Precio en bolsa de la energía en Colombia y el ENSO

En un país como Colombia, donde la participación de la generación hidráulica es tan alta, el precio de la energía no presenta los mismos picos inesperados de corta duración que se evidencian en otros mercados energéticos. Lo anterior es explicado por De Jong (2006) a través de la capacidad de almacenamiento que de manera indirecta se logra con la generación hidráulica.

A pesar de esto, en Colombia el precio de la energía está expuesto a otra clase de choques aleatorios que también alteran su comportamiento. Específicamente, las perturbaciones climatológicas que disminuyen el nivel de precipitaciones en el país, hacen que el costo de oportunidad del agua se incremente y por consecuencia el precio de la energía. La Figura 1 muestra la serie histórica del precio en bolsa de la energía en Colombia señalando con rojo los periodos en los cuales se presentó el ENSO.

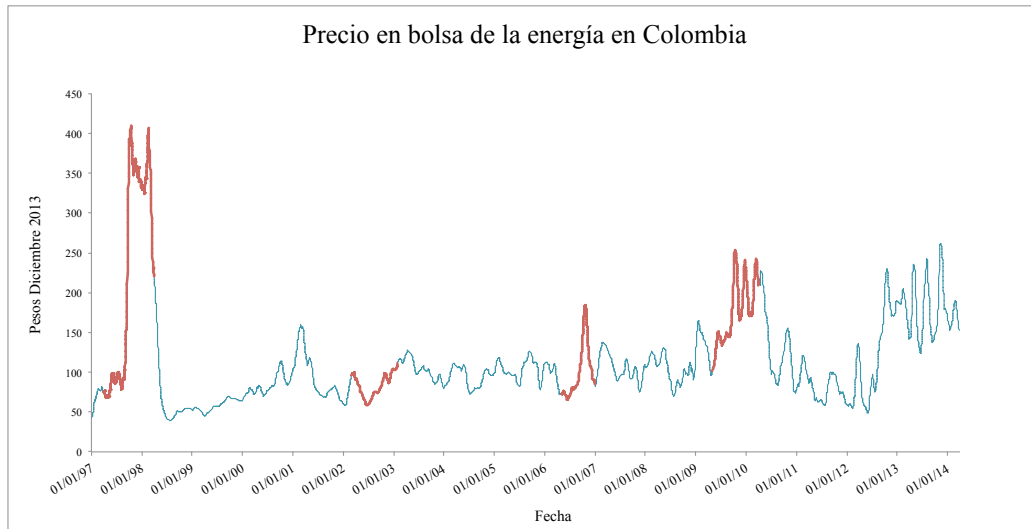


Figura 1: Serie suavizada del precio en bolsa de la energía en Colombia

En la gráfica de arriba se pueden identificar cuatros ocurrencias del ENSO. El primero de estos fenómenos se presentó durante el periodo Abril de 1997 - Marzo de 1998 y fue catalogado de intensidad Fuerte, el segundo y tercer ENSO fueron catalogados de intensidad Débil y ocurrieron durante los periodos Marzo de 2002 - Enero de 2003 y Mayo - Diciembre de 2006, respectivamente. Por último, el ENSO que tuvo lugar entre Mayo de 2009 y Marzo de 2010 fue catalogado de intensidad Moderada (Gobierno Australiano, 2013). Como se puede observar, además de la indudable relación entre la ocurrencia del ENSO y el incremento del precio en bolsa de la energía, la intensidad de ocurrencia del fenómeno juega un papel importante al momento de estudiar su efecto.

3. Métodos

El objetivo de este artículo es simular el precio en bolsa de la energía en Colombia, para lo cual proponemos un modelo de régimen cambiante. En nuestro modelo definimos cuatro regímenes relacionados con la ocurrencia del ENSO y su intensidad. Específicamente, proponemos dividir la serie del precio en un régimen normal (R_N), un régimen de ENSO débil (R_D), un régimen de ENSO moderado (R_M) y finalmente un régimen de ENSO fuerte (R_F). Nuestro supuesto es que durante cada uno de estos regímenes el precio en bolsa de la energía sigue un proceso subyacente diferente que se describe usando el modelo clásico unifactorial de reversión a la media propuesto por Schwartz (1997). Adicionalmente, el mecanismo usado para modelar los cambios de régimen se basa en un proceso estocástico que refleja las características de ocurrencia del ENSO.

3.1. Reversión a la media

La serie del precio en bolsa de la energía en Colombia cuenta con registros para cada hora del día, desde Julio de 1995 hasta la actualidad. Para el desarrollo de nuestro modelo tomamos el precio promedio diario entre Enero de 1997 y Diciembre de 2012. Lo anterior, debido al periodo

de desarrollo y consolidación que vivió la Bolsa de Energía desde su creación hasta 1997 y a que el precio en bolsa de la energía ha reflejado un comportamiento de mercado anormal desde principios de 2013, ya que éste se encuentra en niveles altos a pesar de que las condiciones climatológicas no son desfavorables. Esto ha sido explicado por algunos analistas como una reacción del mercado ante el anuncio de la venta de ISAGEN, una de las compañías generadoras de energía más importantes del país.

Durante el periodo de análisis (Enero 1997 - Diciembre 2012) tuvieron lugar cuatro ENSO. Dos de los fenómenos fueron catalogados como débiles, uno como moderado y otro como fuerte. Esto quiere decir que para estudiar el efecto del ENSO en el precio de la energía, actualmente se cuenta con una muestra de datos para los regímenes R_M y R_F y con dos muestras para el régimen R_D . Nuestro supuesto es que durante cada uno de los regímenes, el cambio del precio en bolsa de la energía se rige de acuerdo a la siguiente ecuación diferencial estocástica propuesta en (Schwartz, 1997)

$$dS_t = \lambda_i(\mu_i - \ln S_t)S_t dt + \sigma_i S_t dW_t \quad \forall i = \{R_N, R_D, R_M, R_F\} \quad (1)$$

Al definir $X_t = \ln(S_t)$ y aplicar el lema de Itô se tiene que el cambio en el logaritmo de los precios se rige por:

$$dX_t = \lambda_i(\alpha_i - X_t) dt + \sigma_i dW_t, \quad \alpha_i = \mu_i - \frac{\sigma_i^2}{2\lambda_i} \quad \forall i = \{R_N, R_D, R_M, R_F\} \quad (2)$$

La ecuación (2) describe un proceso de Ornstein-Uhlenbeck (OU) donde λ_i es la tasa de reversión a la media, α_i es la media de largo plazo, σ_i representa la volatilidad y dW_t denota un proceso de Wiener. Dada la relación entre el ENSO y el precio en bolsa de la energía, en principio se espera que cada régimen asociado al fenómeno climatológico revierta a una media de largo superior, conforme la intensidad se incrementa.

3.2. Cambios de régimen

En los modelos de régimen cambiante usados para estudiar el comportamiento de la energía, generalmente se usa una cadena de Markov para simular el paso de un proceso subyacente a otro. Ahora, si bien es cierto que una cadena de Markov permite una duración prolongada de las alteraciones que se modelan con un cambio de régimen, es necesario tener en cuenta las características de este proceso estocástico. En el modelo que proponemos, si se modelasen los cambios de régimen con una cadena de Markov se estaría suponiendo que los tiempos entre llegadas y de duración del ENSO siguen una distribución exponencial (Ross, 2006) debido a la propiedad de no memoria que caracteriza a estos procesos estocásticos.

A pesar de que en la actualidad sólo se cuenta con el registro meteorológico de 25 ocurrencias del ENSO -lo cual no permite realizar una prueba de bondad de ajuste estadísticamente confiable- una primera aproximación muestra que suponer una distribución exponencial para el tiempo entre arribos y de duración del ENSO, podría implicar un margen de error significativo. La Figura 2 y

la Figura 3 muestran un ajuste a la distribución exponencial para los tiempos entre arribos y de duración del ENSO, respectivamente.

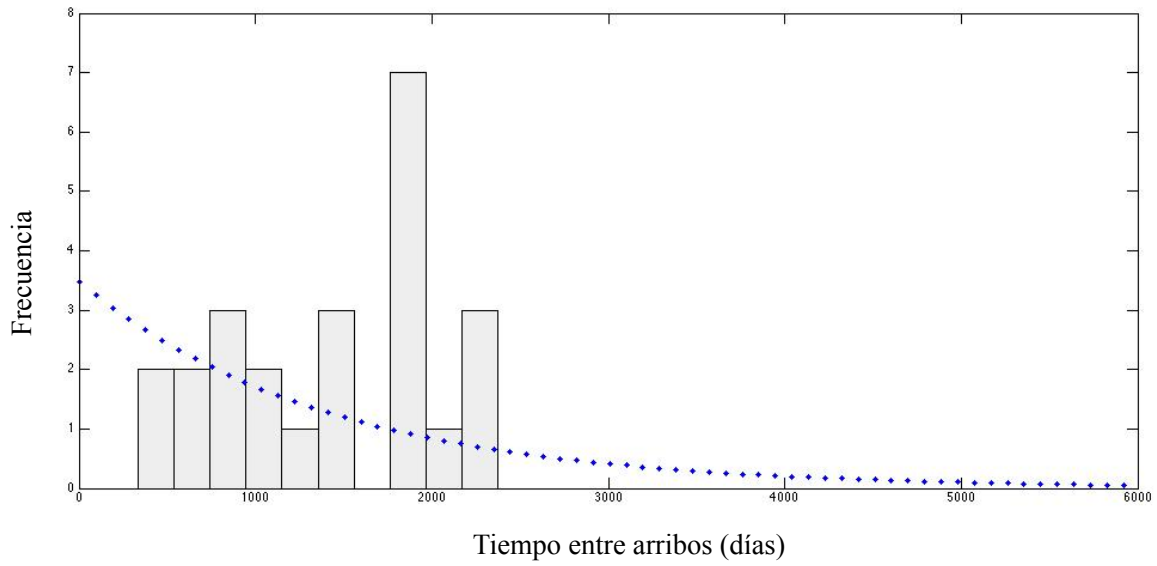


Figura 2: Histograma del tiempo entre arribos del ENSO expresado en días

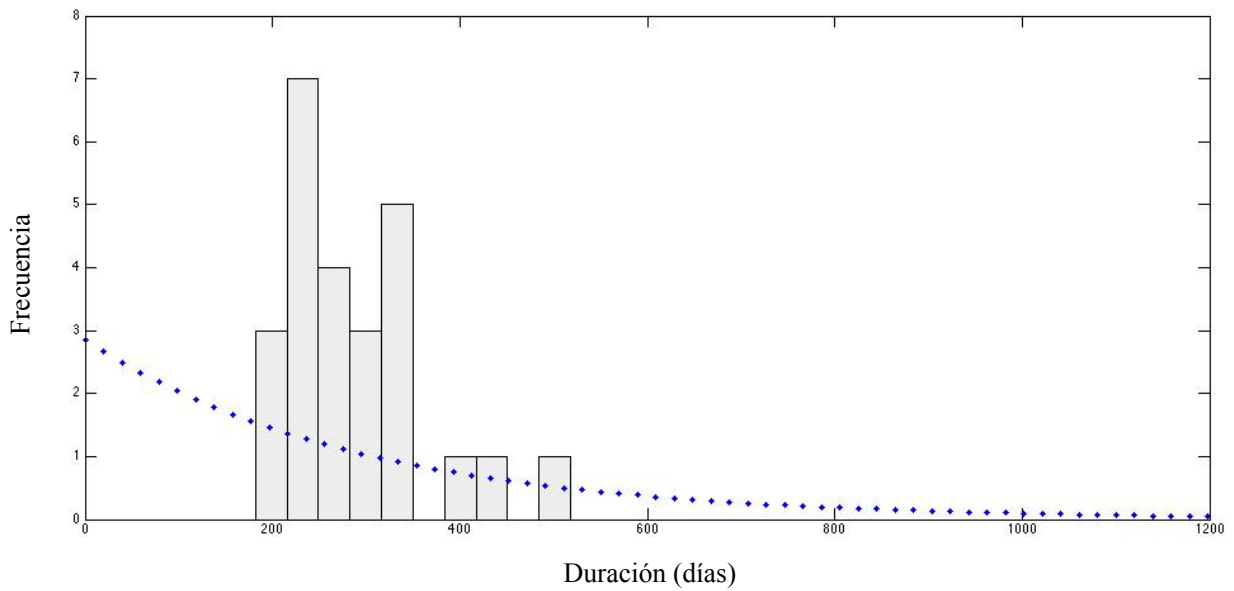


Figura 3: Histograma de la duración del ENSO expresado en días

Teniendo en cuenta lo anterior, proponemos modelar el comportamiento del ENSO con un proceso estocástico diferente a una cadena de Markov. Definimos formalmente el proceso estocástico que proponemos como $\{Z(t), t \geq 0\}$ donde $Z(t) \in \Omega$ y $\Omega = \{R_N, R_D, R_M, R_F\}$ con base en los regímenes anteriormente establecidos. La Figura 4. muestra una representación gráfica del proceso estocástico que describe el comportamiento del ENSO.

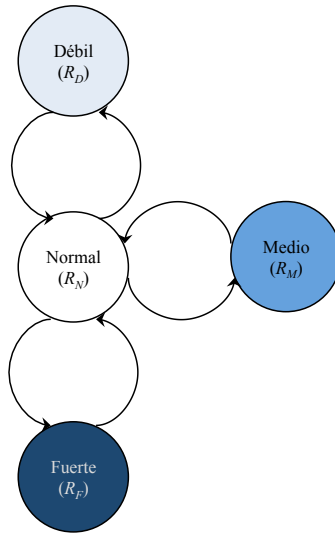


Figura 4: Proceso estocástico que describe el comportamiento del ENSO

Las transiciones en el proceso estocástico descrito en la Figura 4 están directamente relacionadas con el tiempo entre arribos y de duración del ENSO. Estas características del fenómeno climatológico son simuladas a través de variables aleatorias, cuyas distribuciones de densidad de probabilidad se asemejan un poco más a las formas presentadas en la Figura 2 y la Figura 3. Como se mencionó anteriormente, no existen suficientes datos para garantizar una prueba de bondad de ajuste estadísticamente significativa, por lo cual la escogencia de las distribuciones se hace de manera intuitiva y como una primera aproximación.

El tiempo entre arribos del ENSO es modelado a través de la variable aleatoria t_A y el tiempo de duración del fenómeno por medio de la variable aleatoria t_D . La Tabla 1 muestra las distribuciones de probabilidad de t_A y t_D que se suponen para efectos de la simulación del ENSO. Adicionalmente, la Figura 5 y la Figura 6 muestran la función de densidad de probabilidad de t_A y t_D , respectivamente.

Variable	Distribución	Parámetros
t_A	Triangular	$a = 330$ $b = 1700$ $c = 2800$
t_D	Lognormal	$\mu = 5,65$ $\sigma = 0,233$

Tabla 1: Distribuciones de probabilidad para el tiempo entre arribos y de duración del ENSO

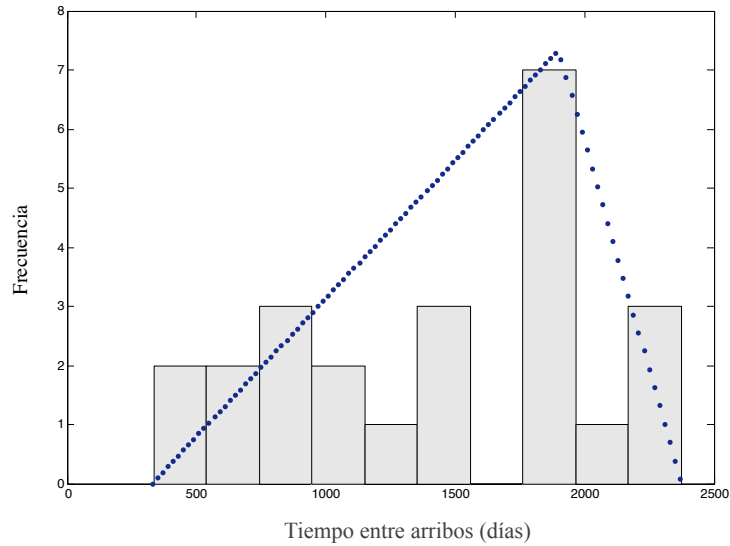


Figura 5: Función de densidad de probabilidad para el tiempo entre arribos del ENSO

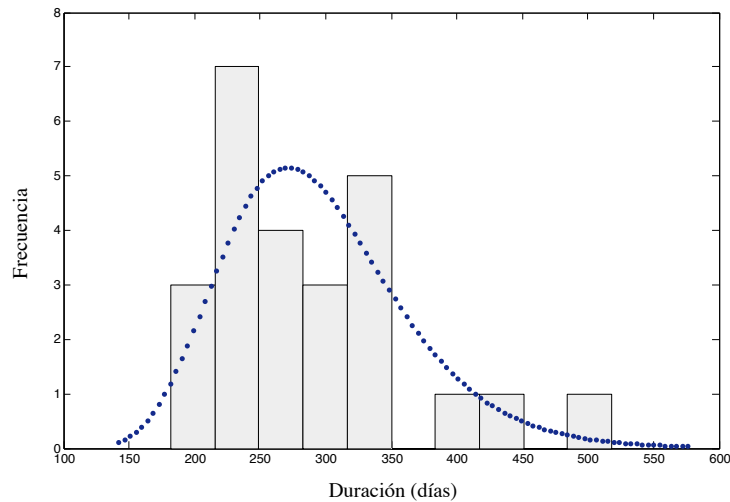


Figura 6: Función de densidad de probabilidad para el tiempo de duración del ENSO

Además de incorporar el tiempo entre arribos y de duración del ENSO, el modelo propuesto considera la intensidad del mismo. Lo anterior a través de una función de probabilidad discreta que determina si la ocurrencia del ENSO es de intensidad débil, moderada o fuerte, en concordancia con lo mencionado al comienzo de esta sección. Teniendo en cuenta lo establecido hasta este punto, la Figura 7 presenta el esquema de simulación propuesto para modelar el proceso estocástico $Z(t)$ que determina el comportamiento del ENSO y a su vez los cambios de régimen en nuestro modelo de precios.

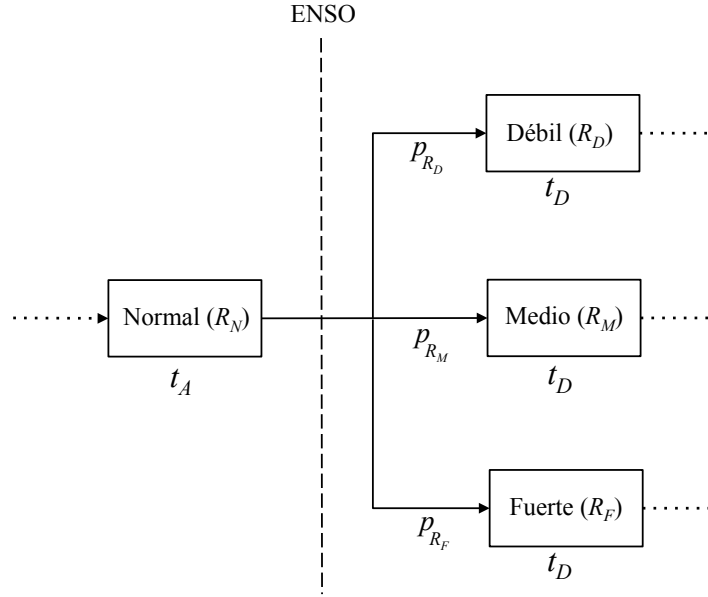


Figura 7: Esquema de simulación del ENSO

Como se ve en el esquema arriba presentado, nuestro modelo supone que el tiempo de duración del ENSO no se ve afectado por el grado de intensidad del mismo. Sin embargo, el tiempo entre llegadas para cada régimen de ENSO si se supone función de la intensidad del fenómeno climatológico debido a las probabilidades de ocurrencia de cada uno de dicho regímenes. Estas probabilidades se estiman con base en la información histórica del ENSO y la clasificación de su intensidad.

3.3. *Formulación del modelo*

Con base en lo expuesto en la §3.1 y §3.2, a continuación se presenta el modelo que proponemos para simular el precio en bolsa de la energía en Colombia.

$$si \ Z(t) = i \quad \rightarrow \quad dS_t = \lambda_i(\mu_i - \ln S_t)S_t dt + \sigma_i S_t dW_t \quad \forall \ i = \{R_N, R_D, R_M, R_F\} \quad (3)$$

Además del comportamiento de reversión a una media de largo plazo y los choques aleatorios producidos por el ENSO, nuestro modelo considera una tendencia en el tiempo para el precio de la energía eléctrica. Dicha tendencia está relacionada con en el incremento esperado en los costos marginales de producción hidráulica de la energía, para lo cual nuestro modelo supone que dicho incremento es aproximadamente igual a la variación en el Índice de Precios al Consumidor (IPC).

4. Resultados

4.1. Estimación de parámetros

La siguiente función es una solución exacta a la ecuación (2) y es usada en la literatura para la simulación en tiempo discreto de un proceso OU (Rieder, 2012).

$$X_t = X_{t-1}e^{-\lambda\delta} + \alpha(1 - e^{-\lambda\delta}) + \sigma\sqrt{\frac{1 - e^{-2\lambda\delta}}{2\lambda}}N_{0,1} \quad (4)$$

En la ecuación (3), $N_{0,1}$ representa una realización de una variable aleatoria normalmente distribuida con media 0 y varianza 1. Adicionalmente, δ representa la longitud de paso para cada simulación. Dixit (1994) argumenta que la ecuación (4) puede ser modelada como un proceso autorregresivo de orden uno, cuyos parámetros pueden ser estimados mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios de tal manera que:

$$X_t = a + b \cdot X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (5a)$$

$$a = \alpha(1 - e^{-\lambda\delta}) \quad b = e^{-\lambda\delta} \quad sd(\varepsilon_t) = \sigma\sqrt{\frac{1 - e^{-2\lambda\delta}}{2\lambda}}N_{0,1} \quad (5b)$$

Con base en las ecuaciones (5) se pueden estimar los parámetros de los modelos de reversión a la media para cada régimen climatológico de la siguiente manera:

$$\hat{\alpha} = \frac{a}{1 - b} \quad \hat{\lambda} = -\frac{\ln b}{\delta} \quad \hat{\sigma} = sd(\varepsilon_t)\sqrt{\frac{-2 \ln b}{\delta(1 - b^2)}}N_{0,1} \quad (6)$$

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos luego de realizar las regresiones propuestas en la ecuación (5a) y estimar los parámetros de los modelos con base en la ecuación (6) y la ecuación (2). Los datos usados en los modelos de regresión corresponden a la serie histórica de precios de la energía expresados en pesos constantes de diciembre del 2013.

Régimen	Regresión			Parámetros		
	a	b	$sd(\varepsilon_t)$	λ	μ	σ
Normal	0.285	0.936	0.116	0.066	4.57	0.378
Débil	0.339	0.926	0.125	0.077	4.68	0.409
Medio	0.391	0.925	0.101	0.078	5.27	0.331
Fuerte	0.177	0.967	0.176	0.034	5.76	0.567

Tabla 2: Parámetros de los modelos de reversión a la media para cada régimen

En la Tabla 2 se puede observar una clara relación entre el nivel de intensidad del ENSO y la media de largo plazo a la cual revierte el precio de la energía en cada uno de dichos niveles. Al

observar la media a la cual revierte el precio durante el régimen de ENSO débil se puede observar que ésta es muy cercana a la media de reversión del régimen normal. Este comportamiento se puede explicar debido a la naturaleza de los datos, ya que la muestra usada para calcular los parámetros del régimen débil es de tamaño reducido en comparación a los otros regímenes.

4.2. Simulación del precio en bolsa de la energía en Colombia

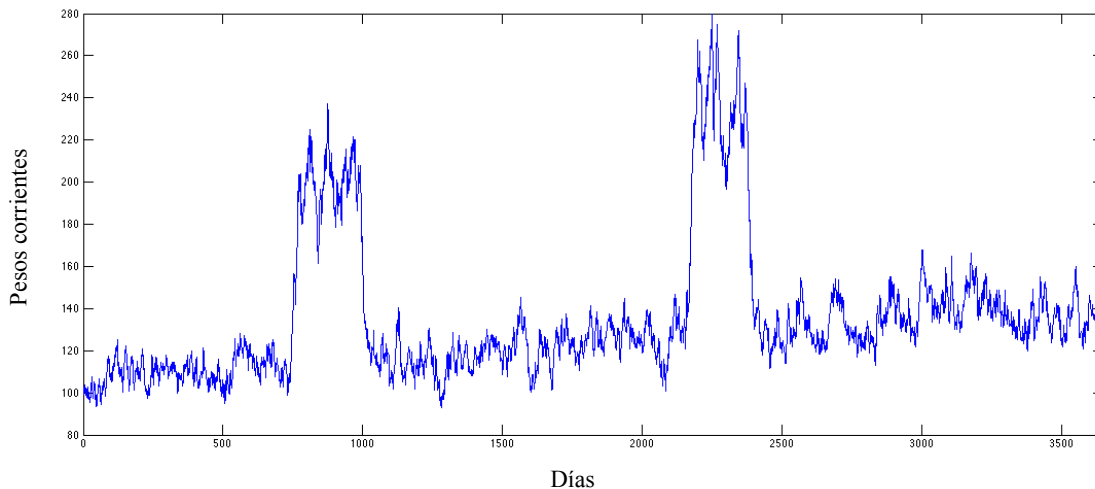
La implementación del modelo de régimen cambiante que se propuso en la §3 requiere de la simulación previa del comportamiento del ENSO. Lo anterior se llevó a cabo mediante un modelo de simulación de eventos discretos estructurado en el software Arena, que replica el proceso estocástico $Z(t)$ con base en el esquema presentado en la Figura (7). La estimación de las probabilidades de ocurrencia para cada uno de los niveles de intensidad del ENSO se realizó con base en la información histórica del fenómeno climatológico. Al calcular las probabilidades de acuerdo al número de eventos identificados dentro de cada nivel de intensidad y el número total de eventos se tiene que:

$$P(\Omega \setminus \{R_N\}) = [P_{R_D} \quad P_{R_M} \quad P_{R_F}] = [0,4 \quad 0,36 \quad 0,24] \quad (7)$$

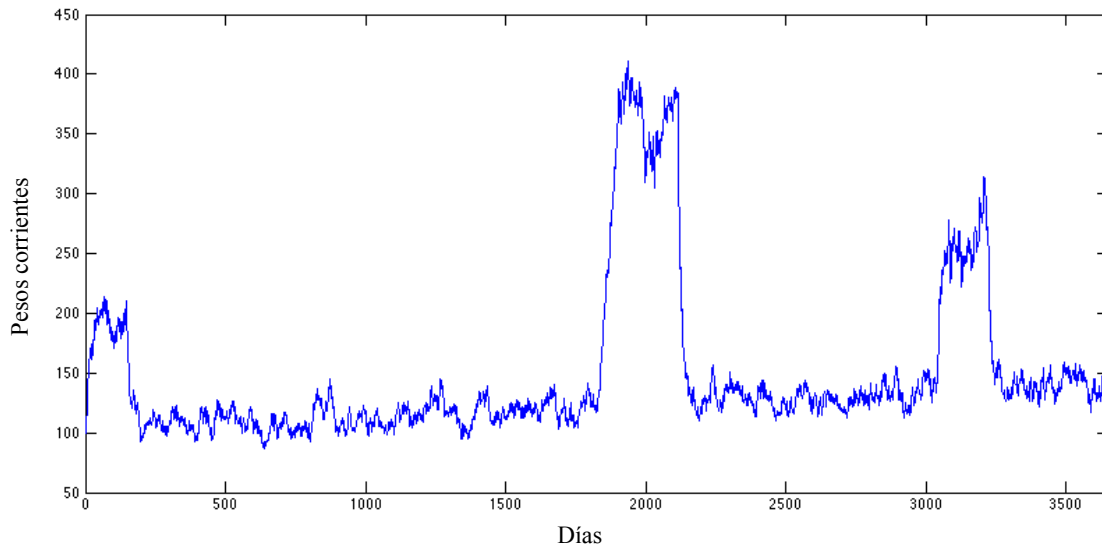
Luego de reproducir el comportamiento del ENSO, el precio en bolsa de la energía se simuló con base en la ecuación (1) y finalmente se incorporó la tendencia dada por la inflación ya que los parámetros estimados están basados en precios constantes de Diciembre de 2013. Para lo anterior se usó el pronóstico de inflación presentado en el Marco Fiscal de Mediano Plazo , según el cual la inflación esperada para los próximos 10 años es igual a 3% EA.

A continuación se presentan 3 posibles escenarios que se obtuvieron al realizar la simulación de los precios para un horizontes de tiempo de diez años.

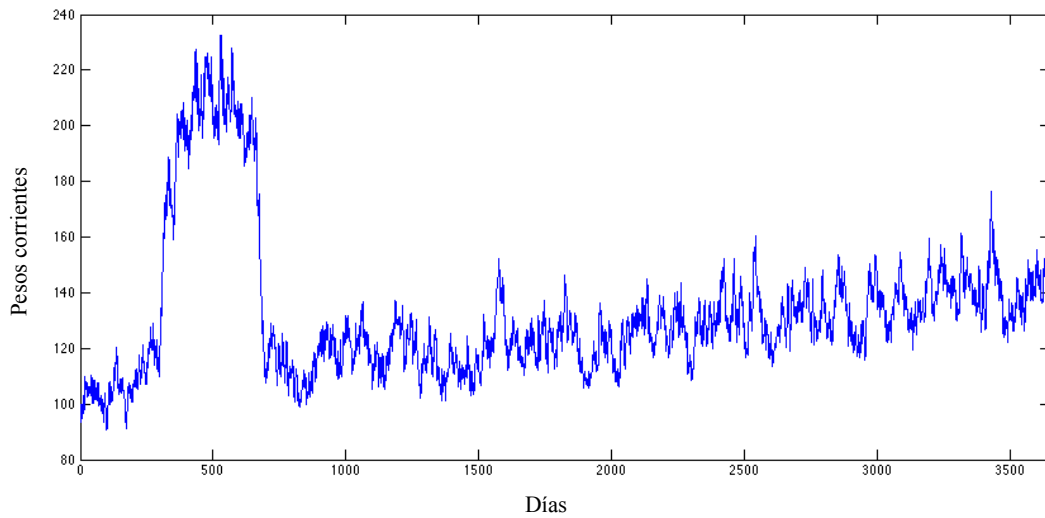
Escenario 1



Escenario 2



Escenario 3



4.3. Discusión

Como se observa en los resultados obtenidos, el modelo simulación propuesto captura los choques aleatorios que genera el ENSO sobre el precio en bolsa de la energía. Los escenarios de simulación presentados muestran la ocurrencia de 1, 2 y 3 ENSO en un horizonte de tiempo de

diez años. Las características de las simulaciones obtenidas permiten afirmar que el comportamiento replicado es consistente con el precio real e histórico de la energía en Colombia.

Es importante resaltar que, dada la alta sensibilidad de los resultados ante el comportamiento del ENSO, el modelo de precios aquí desarrollado es una primera aproximación a un problema que, como se ha mencionado anteriormente, requiere de la simulación de un fenómeno meteorológico que es en sí misma compleja y para la cual se deben tener en cuenta numerosos elementos. Nuestro modelo de simulación tiene en cuenta tres características del ENSO: tiempo entre arribos, duración e intensidad. Sin embargo, es plausible pensar en comportamientos estacionales y/o cíclicos asociados a factores meteorológicos que nuestro modelo no incorpora.

En la actualidad existe un rango amplio de aplicaciones en las cuales podría ser utilizado el modelo aquí propuesto. Un ejemplo de dichas aplicaciones es la valoración de elementos derivados que tienen como precio subyacente el precio en bolsa de la energía. Adicionalmente, la valoración de compañías generadoras de energía indudablemente requiere de una estimación de los ingresos generados por las transacciones que estas compañías hacen en la Bolsa de Energía. Un último ejemplo del potencial uso del modelo propuesto es la evaluación financiera de contratos bilaterales de compra y venta de energía entre generadores y comercializadores. En estos contratos se pueden fijar precios libremente y en la estructuración de los mismos es común asignar un porcentaje del precio al comportamiento en bolsa de la energía.

5. Conclusiones

En este artículo se desarrolló un modelo de régimen cambiante para estudiar el comportamiento del precio en bolsa de la energía en Colombia. El modelo se estructuró con base en dos ejes: el comportamiento de reversión a la media que es clásico en commodities y las alteraciones que se presentan en el caso colombiano debido al ENSO, las cuales fueron capturadas por medio de un proceso estocástico que determina los cambios de régimen.

Al estimar los parámetros del modelo formulado, se encontró una relación directa entre la intensidad del ENSO y los niveles en los cuales se encuentra el precio en bolsa de la energía. La anterior relación es intuitiva en un análisis de los registros históricos del precio, sin embargo no se tiene conocimiento en la literatura de un estudio formal donde dicha relación se hiciera explícita a través de un modelo matemático. Una vez estimados los parámetros del modelo, se realizaron simulaciones del comportamiento del precio de la energía para un horizonte de tiempo de diez años en las cuales se evidencia una similitud significativa con el comportamiento real del commodity.

El modelo aquí desarrollado podría ser aplicado en la práctica financiera para valoración de instrumentos derivados, estimación de ingresos en compañías generadoras de energía, evaluación financiera de contratos bilaterales entre generadores y comercializadores de energía, entre otros. Dentro del trabajo futuro a realizar se encuentra la inclusión de comportamientos estacionales y/o cíclicos dentro del proceso estocástico usado para estudiar el comportamiento del ENSO. De igual manera y en la medida que los datos lo permitan, la estimación de los parámetros podría ser mejorada al incluir una muestra más grande.

Referencias

- Bierbrauer, M., Trück, S., and Weron, R. (2004). Modeling electricity prices with regime switching models. In *Computational Science-ICCS 2004*, pages 859–867. Springer.
- Cartea, A. and Figueroa, M. G. (2005). Pricing in electricity markets: a mean reverting jump diffusion model with seasonality. *Applied Mathematical Finance*, 12(4):313–335.
- CREG (1994). Resolución No. 055 Comisión de Regulación de Energía y Gas. *Bogotá D.C., Colombia*.
- De Jong, C. (2006). The nature of power spikes: A regime-switch approach. *Nonlinear Analysis*, 10(3):3.
- Dixit, A. K. (1994). *Investment under uncertainty*. Princeton university press.
- García, J., Gaviria, A., and Salazar, L. (2011). Determinantes del precio de la energía eléctrica en el mercado no regulado en Colombia. *Revista Ciencias Estratégicas*, 19(26).
- Gobierno Australiano (Agosto, 2013). El Niño - Detailed Australian Analysis. *Bureau of Meteorology*. Recuperado de <http://www.bom.gov.au>.
- Guthrie, G. and Videbeck, S. (2002). High frequency electricity spot price dynamics: An intra-day markets approach. *New Zealand Institute for the Study of Competition and Regulation, Tech. Rep.*
- Guthrie, G. and Videbeck, S. (2007). Electricity spot price dynamics: Beyond financial models. *Energy Policy*, 35(11):5614–5621.
- Haldrup, N. and Nielsen, M. Ø. (2006). A regime switching long memory model for electricity prices. *Journal of econometrics*, 135(1):349–376.
- Huisman, R. (2008). The influence of temperature on spike probability in day-ahead power prices. *Energy Economics*, 30(5):2697–2704.
- International Energy Agency (2013). Energy Balances of Non-OECD countries. *IEA Statistics*.
- Misiorek, A., Trueck, S., and Weron, R. (2006). Point and interval forecasting of spot electricity prices: Linear vs. non-linear time series models. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 10(3):2.
- Nobre, P. and Srukla, J. (1996). Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *Journal of climate*, 9(10):2464–2479.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., and Mantilla, R. I. (2001). Seasonally in enso-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in colombia. *Water resources research*, 37(8):2169–2178.
- Rieder, S. (2012). Robust parameter estimation for the Ornstein–Uhlenbeck process. *Statistical Methods & Applications*, 21(4):411–436.

Ross, S. M. (2006). *Introduction to probability models*. Academic press.

Schwartz, E. S. (1997). The stochastic behavior of commodity prices: Implications for valuation and hedging. *The Journal of Finance*, 52(3):923–973.

UPME (2004). Una visión del mercado eléctrico colombiano. *Bogotá D.C., Colombia*.

Weron, R., Simonsen, I., and Wilman, P. (2004). Modeling highly volatile and seasonal markets: evidence from the Nord Pool electricity market. In *The application of econophysics*, pages 182–191. Springer.

XM (2014). Informe consolidado del mercado eléctrico. *Bogotá D.C., Colombia*.