

**Metodología para estimación de series de tiempo en bonos:
observación de volatilidad en bonos de deuda pública
colombianos (TES)**

Andrés Montoya López

amontoyal@eafit.edu.co

Daniel Alberto Ocampo Marín

daocampom@eafit.edu.co

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Administración Financiera

Asesores:

Paula María Amonacid Hurtado

palmona1@eafit.edu.co

Andrés Mauricio Mora Cuartas

amorac@eafit.edu.co

**Universidad EAFIT
Escuela de Administración
Maestría en Administración Financiera
Medellín
2019**

Resumen

La aplicación de metodologías de series de tiempo para el precio de un bono resulta un proceso complejo debido a sus características financieras y matemáticas. En específico, el pago de cupones y el efecto de la duración modificada hacen que los precios (limpio o sucio) no puedan ser usados correctamente para aplicaciones de series de tiempo.

La comunidad académica ha propuesto diversas metodologías que pueden ser aplicadas para disminuir el sesgo en las estimaciones de volatilidad que presentan los bonos. Es necesario evaluar las ventajas y desventajas de cada una de ellas, y analizar las características que debe cumplir la serie de tiempo. En el presente trabajo se propone una metodología novedosa para estimar una serie de tiempo que permita ser usada para modelar adecuadamente los precios de los bonos de deuda pública colombiana, observando su implementación en la estimación de volatilidad.

Palabras claves: Volatilidad, Precio sucio, Precio limpio, Estructura de tasas de interés, TIR (Tasa interna de retorno), Series de tiempo, Duración modificada, Nelson Siegel, Valor en riesgo.

Abstract

The application of time series methodologies in bond prices turns out to be a complex process due to its mathematical and financial characteristics. In particular, the coupon payment and the modified duration effect makes prices (clean and dirty) unable to be used correctly in time series applications.

Academic community has proposed many different methodologies that could be applied to reduce the bias when estimating volatility on bond prices. It's necessary to evaluate advantages and disadvantages on each of them, and analyze the characteristics that must have the time series. The investigation aims to propose a new methodology to estimate a time series that allow the modeling of Colombian public debt bond prices, observing its implementation in the volatility estimation.

Key words: Volatility, Dirty price, Clean price, Term structure of interest rates, IRR (Internal Rate of Return), Time series, Modified duration, Nelson and Siegel, Value at risk.

Contenido

1. Introducción	6
2. Situación en estudio – problema	7
3. Objetivos, general y específicos.....	8
4. Marco de referencia conceptual	9
4.1 Problemas presentes para manejo de series de tiempo en bonos.....	9
4.1.1 Sobre-estimación de volatilidad con precio sucio	9
4.1.2 Efecto de la duración modificada en la volatilidad	11
4.1.3 Estimación de correlación con otros activos.....	13
4.1.4 Elección del título de referencia	14
4.2 Metodologías usadas para estimación de volatilidad en bonos	15
4.2.1 Precio sucio ajustado.....	15
4.2.2 Precio limpio	15
4.2.3 Modelos Garch robustos	16
4.2.4 Escalamiento de volatilidad con duración modificada	17
5. Metodología propuesta	18
6. Resultados del análisis	23
7. Conclusiones	31
Referencias	33

Lista de gráficos

Gráfico 1. Rendimientos diarios calculados a partir del precio sucio de TES con vencimiento en el 2024	11
Gráfico 2. Comportamiento de la duración modificada en el tiempo de los TES con vencimiento en 2024.....	13
Gráfico 3. Curva de tasas de descuento, TES tasa fija (10-10-2012).....	19
Gráfico 4. Comportamiento en el tiempo del precio sucio de los TES24	24
Gráfico 5. Comportamiento en el tiempo de los rendimientos del precio sucio de los TES.24	24
Gráfico 6. Comportamiento en el tiempo del precio limpio de los TES24	25
Gráfico 7. Comportamiento en el tiempo de los rendimientos precio limpio de los TES24. 26	
Gráfico 8. Comportamiento en el tiempo de la TIR de negociación TES24	27
Gráfico 9. Comportamiento en el tiempo de los rendimientos de la TIR de los TES24	28
Gráfico 10. Comportamiento en el tiempo del precio título teórico TES24 a la fecha (Metodología planteada).....	29
Gráfico 11. Comportamiento en el tiempo del rendimiento título teórico TES24 a la fecha	30

Lista de tablas

Tabla 1. Resultado de estimación de volatilidad y VaR precio sucio TES24	25
Tabla 2. Resultado estimación de volatilidad y VaR precio limpio TES24	26
Tabla 3. Resultado estimación de volatilidad y VaR por TIR TES24.....	28
Tabla 4. Comportamiento en el tiempo del resultado estimación de volatilidad y VaR por título teórico TES24.....	30

1. Introducción

La serie de tiempo del precio de negociación de un bono tiene particularidades que no permiten que sea usada de la misma forma, que el precio de una acción para estimaciones o modelación de series de tiempo. El pago de cupones, el interés acumulado y la duración no constante en el tiempo hacen que la aplicación de modelos de series de tiempo no pueda ser realizada de manera directa. La academia ha propuesto diferentes metodologías para dicha estimación, algunos ejemplos son: ajustes a la serie de precio sucio, uso del precio limpio, modelos Garch robustos, y la reexpresión de la volatilidad de la tasa de descuento, por medio de la duración modificada. Sin embargo, son aproximaciones que no resuelven todos los problemas que se presentan a la hora de analizar las características de los bonos y presentan ciertos sesgos que impiden tener estimaciones confiables. Adicionalmente, dichas metodologías son ampliamente usadas en mercados desarrollados y carecen de aplicación directa al mercado colombiano.

Para buscar resolver estos problemas, se propone una estimación de series de tiempo basada en el uso de la metodología de Nelson & Siegel (1987), de manera que los parámetros históricos permitan ajustar las características de negociación de los títulos para cada día, modificando las condiciones de valoración para evitar los problemas descritos. Dicha aplicación será adaptada a los títulos de deuda pública colombianos (TES), de manera que la construcción del modelo contemple las particularidades del mercado local.

Si bien el modelo se centra en la estimación de la serie de tiempo para bonos, es necesario plantear una aplicación de manera que el resultado pueda ser observado

de manera clara; para este fin, se pretende contrastar diferentes metodologías de estimación de volatilidad en bonos, sin abordar el rigor y profundidad de los diferentes modelos de estimación usados para activos financieros.

2. Situación en estudio – problema

Actualmente en Colombia y en las principales instituciones financieras del país, por normativa legal, tal como lo expresa la Superfinanciera de Colombia (2001), es obligación hacer seguimiento al riesgo de los portafolios administrados por las entidades vigiladas. Para ello, a lo largo de los últimos 20 años y posterior a la aparición de la metodología desarrollada por JPMorgan (1996), los diferentes entes de regulación y seguimiento interno de riesgos de las entidades vigiladas han creado herramientas útiles.

Tal como lo propone JPMorgan (1996), la medición del riesgo de un activo individual tiene como punto de partida la estimación de su volatilidad. Según JPMorgan (1996), esta consiste en hallar la desviación promedio de los rendimientos diarios del precio de un activo con el fin de determinar, dado un nivel de confianza, el Valor en Riesgo (VaR) del activo o portafolio. Es por esto que es relevante estudiar el comportamiento y cálculo de la desviación estándar en activos específicos y portafolios, que están sujetos a la administración de riesgo, para determinar una medida que refleje el comportamiento atípico de los activos.

Adicionalmente, la volatilidad y el riesgo están sujetos a un monitoreo constante, porque tal como lo menciona Salinas Ávila (2010), “Es, en primera instancia, una herramienta para la alta dirección de las instituciones financieras, ya que opera

como instrumento de control y auditoría que suministra información sobre la tendencia del riesgo en las inversiones realizadas” (p. 1).

En el contexto de nuestro caso de estudio, analizaremos las particularidades que presentan los títulos de renta fija para la estimación de la volatilidad. De acuerdo con Berk & DeMarzo (2008), tradicionalmente el precio de un bono puede ser calculado de maneras diferentes; la metodología de precio sucio y de precio limpio son útiles para calcular el precio de un activo descontando los flujos de caja a futuro a la tasa de negociación en el mercado. Sin embargo, como lo indica Solano Caicedo (2014a), bajo la metodología tradicional “si se trabaja con los precios sucios de los TES, es conocido que en la fecha de pago de los cupones su precio desciende significativamente, afectando sensiblemente las estimaciones de volatilidad” (p. 10).

Por lo anterior, es necesario revisar estas metodologías teniendo en cuenta el efecto de la variación del plazo al vencimiento y los pagos de cupones sobre los precios de los títulos. Esto con el fin de proponer una metodología que logre corregir dicha situación y permita obtener una estimación correcta de la volatilidad.

3. Objetivos, general y específicos

- Proponer una metodología para ajustar una serie de tiempo de bonos de deuda pública colombiana que permita estimar adecuadamente su volatilidad.

- Realizar una completa revisión de literatura acerca de las metodologías existentes para la estimación de la volatilidad de los precios de los bonos a nivel internacional y nacional.

- Identificar las características que debe reunir una metodología para ajustar una serie de tiempo en bonos.
- Aplicar la metodología propuesta para bonos de deuda pública colombiana, de manera que se pueda observar su volatilidad y la aproximación de VAR para que sean comparadas las metodologías tradicionales.

4. Marco de referencia conceptual

Con el fin de responder a nuestra pregunta de investigación, es necesario estudiar dos fenómenos que se presentan actualmente en el cálculo de la volatilidad de los bonos. Puntualmente, el primer elemento de estudio es la problemática en la estimación del precio que tienen las series de tiempo, dependiendo de las metodologías de cálculo empleadas, mientras que el segundo tiene un enfoque directo sobre cómo la serie de tiempo propuesta permite mejorar su estimación de volatilidad y riesgo para un portafolio diversificado. A continuación, se presentarán las falencias en las posibles metodologías a utilizar y, finalmente, se propone la estimación de series de tiempo que da solución a tales efectos.

4.1 Problemas presentes para manejo de series de tiempo en bonos

4.1.1 Sobre-estimación de volatilidad con precio sucio

Tradicionalmente el precio de los bonos en el mercado colombiano es calculado como lo definen Agudelo & Fernández (2000), quienes afirman que “el precio sucio de un bono es determinado como ‘el valor presente de los flujos de caja (Fct), a recibir en los periodos futuros ‘t’, traídos a una tasa de descuento TD adecuada” (p. 261), de la siguiente forma:

Ecuación 1. Precio sucio

$$P_0 = \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1 + TD)^t}$$

P₀: Precio sucio; FCt: Flujo de caja en t; TD: Tasa de descuento; t: tiempo

Adicionalmente, se define el precio limpio como:

Ecuación 2. Precio limpio

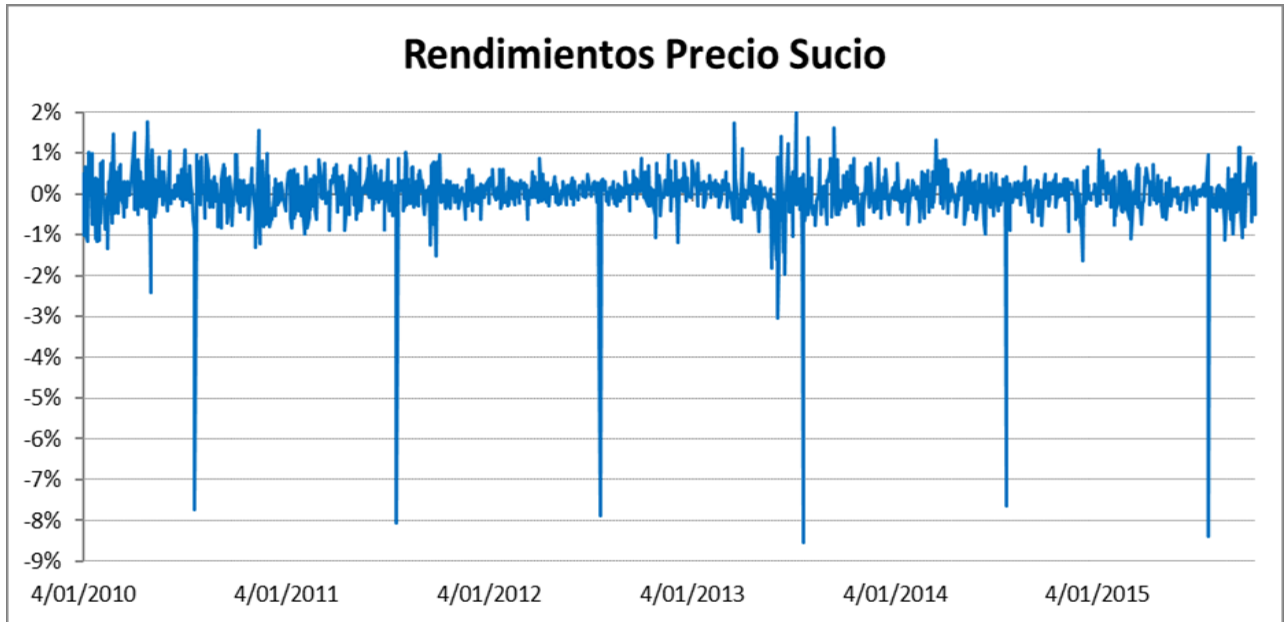
$$\text{Precio Limpio} = \text{Precio Sucio} - \text{Interés Acumulado}$$

De lo anterior y tal como lo mencionan Berk & DeMarzo (2008):

Los precios de los bonos fluctúan alrededor del tiempo de cada pago, con un patrón en forma de dientes de sierra: el precio sucio de los bonos se eleva conforme se acerca el pago del siguiente y luego cae cuando se paga. Esta fluctuación ocurre aún si no hay cambio en el rendimiento al vencimiento del bono. (p. 221)

Por lo anterior y como se puede observar en el gráfico 1, en caso de trabajar con esta serie de tiempo, se tendría un activo financiero con presencia de *clusters* de volatilidad, los cuales se definen como “los cambios grandes tienden a ser seguidos por cambios grandes, de cualquiera de los dos signos, y los cambios pequeños tienden a ser seguidos por cambios pequeños” (Cont, 2005 p. 2). Es decir, se incurriría en un error al afirmar que, como consecuencia del pago del cupón, manteniendo todo lo demás constante, se desencadenarían periodos de alta volatilidad en el título en mención. Por tal motivo, esto genera una sobre estimación de la volatilidad y, por ende, se debe revisar otro método con el fin de corregirla.

Gráfico 1. Rendimientos diarios calculados a partir del precio sucio de TES con vencimiento en el 2024



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT16240724.

4.1.2 Efecto de la duración modificada en la volatilidad

La duración modificada es una medida que se utiliza comúnmente para expresar el riesgo de un título en el mercado. Matemáticamente, es expresada de la siguiente manera:

Ecuación 3. Duración modificada

$$D = \frac{1}{P_0} \sum_{t=1}^n \frac{FCt * t}{(1 + TD)^t}$$

$$D^* = \frac{D}{\left(1 + \frac{TD}{p}\right)}$$

P₀: Precio sucio ; *TD*: Tasa de descuento; *FCt*: Flujo de caja en *t*; *t*: tiempo; *p*: periodicidad;

D: Duración Macaulay; *D**: Duración Modificada

Para tener un mayor entendimiento, se hace necesario mencionar la definición sobre este concepto que expresan Díez de Castro & Mascareñas (1991).

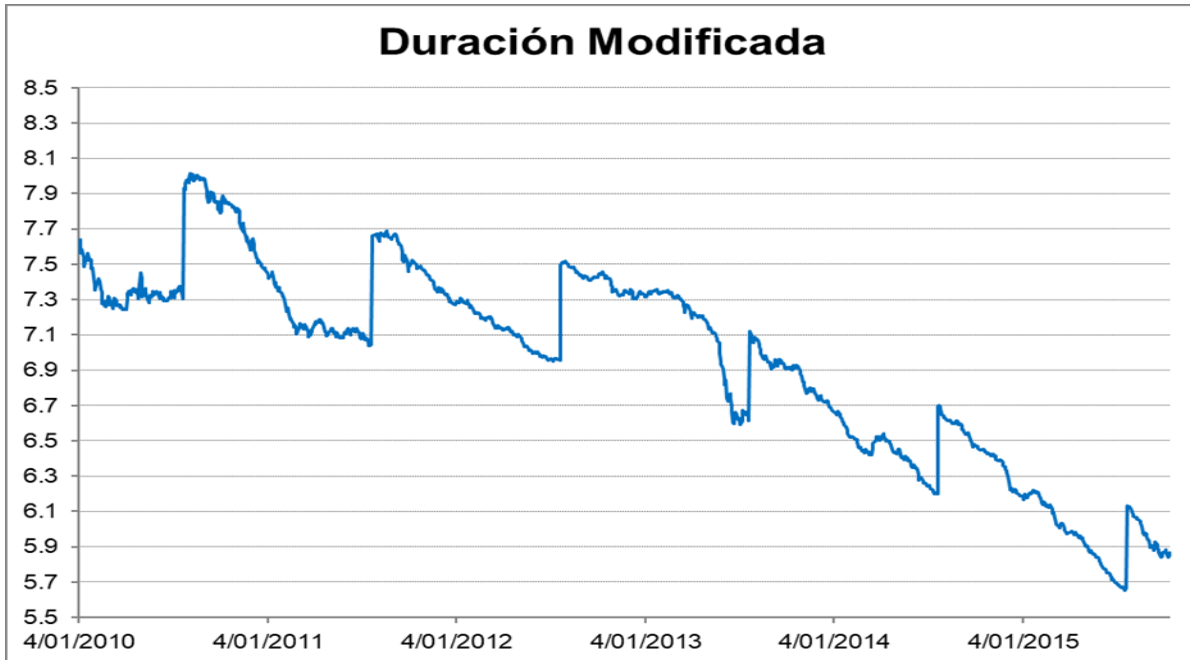
Cuando hacemos referencia a la volatilidad de los bonos nos estamos refiriendo a la sensibilidad de su precio de mercado, con relación a los cambios que se produzcan en el tipo de interés, luego la podemos definir como la variación que se produce en el precio del bono con respecto a un incremento de 1% sobre el rendimiento del mismo. (p. 244)

Según lo anterior, la duración modificada como medida de sensibilidad y riesgo tiene relación directa con el plazo al vencimiento del título, de manera que un papel con vencimiento en 10 años presenta mayor riesgo que uno con vencimiento a 2 años. Esto implica que cualquier metodología de series de tiempo que involucre el uso del precio (ya sea precio sucio o precio limpio), tiene para cada observación en el tiempo una estimación diferente de duración, haciendo que ésta disminuya en la medida que se acerque a su vencimiento.

El riesgo presente en la duración de los títulos es conocido y descontado por los agentes del mercado, de manera tal que existe una relación directa entre la duración y la volatilidad del precio del instrumento. Por lo anterior, la variabilidad del riesgo presente en el título, a través del tiempo, hace que la estimación de su volatilidad con base en la serie de tiempo del precio pierda objetividad.

En el gráfico 2 se puede observar cómo la duración modificada disminuye a medida que el título se acerca a su plazo de vencimiento.

Gráfico 2. Comportamiento de la duración modificada en el tiempo de los TES con vencimiento en 2024



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT 16240724.

4.1.3 Estimación de correlación con otros activos

Según Martínez & Uribe (2008), para determinar el cálculo de valor en riesgo de un portafolio, se debe determinar una matriz de varianzas y covarianzas, con el propósito de encontrar las relaciones que existen entre los activos. En dicha matriz, la diagonal contiene la desviación estándar de los retornos, es decir, las volatilidades de cada activo y las correlaciones entre activos se ubican por encima y por debajo de la matriz. Como lo menciona JPMorgan (1996), la matriz es utilizada para calcular la volatilidad del portafolio, la cual se utiliza para el cálculo del VAR. Por lo anterior es evidente que, al utilizar series de tiempo inapropiadas para los títulos de renta fija, la volatilidad del portafolio de activos se verá influenciada por dicho efecto y no reflejaría la medida real del riesgo, dejando en evidencia la

necesidad de tener un mejor indicador de volatilidad para los bonos y portafolios que incluyen estos activos.

4.1.4 Elección del título de referencia

Al hablar de los bonos como títulos representativos de deuda, es común encontrar que cada emisor puede tener en el mercado diferentes referencias (por plazos o tipos de indexación). Esta situación no es ajena a los títulos que emiten los gobiernos, de tal manera que, si un inversionista quiere tener exposición a una parte puntual de la curva, pueden existir varias referencias de títulos que cumplen las condiciones.

En países con sistemas financieros desarrollados es común encontrar un título entre esos que es representativo de una parte de la curva, el cual es conocido como el “On-the-run” y representa el último título emitido para un plazo específico. Sin embargo, dichos títulos de referencia cambian constantemente, lo que hace que no sea fácil tomar un solo bono para aplicar las metodologías de estimación de volatilidad.

De manera puntual, en el mercado colombiano, los títulos de referencia son negociados principalmente por su liquidez en el mercado secundario, y generalmente se tienen referencias que representan la parte corta, media y larga de la curva. Debido a lo anterior, cuando un título cambia de ser referencia puntual de un plazo y entra uno nuevo, las negociaciones hacen que la volatilidad de ambos aumente, sin embargo, esto no se asocia necesariamente a un riesgo real de los activos. Finalmente, usar series de tiempo de precio o tasa de descuento en

periodos que ha ocurrido este cambio de referencia, hace que las series no permitan absorber el riesgo puntal para una parte de la curva.

4.2 Metodologías usadas para estimación de volatilidad en bonos

4.2.1 Precio sucio ajustado

Los autores Bao & Pan (2008) y Bao, Chen, Hou, & Lu (2015) proponen una metodología para la estimación de la volatilidad de un bono, de acuerdo a la siguiente metodología:

Ecuación 4: Rendimiento del precio del bono con precio limpio ajustado

$$R_{i,t} = \ln \left(\frac{PL_{i,t} + IA_{i,t} + C_{i,t}}{PL_{i,t-1} + IA_{i,t-1}} \right)$$

Donde, $PL_{i,t}$ representa en precio limpio del bono para la fecha t , $IA_{i,t}$ se refiere al interés acumulado del pago actual de interés, y $C_{i,t}$ es el pago de cupón en la fecha t cuando de lugar.

Según la definición de precio sucio, la expresión se puede cambiar por:

Ecuación 5. Rendimiento del precio del bono con precio sucio ajustado

$$R_{i,t} = \ln \left(\frac{PS_{i,t} + C_{i,t}}{PS_{i,t-1}} \right)$$

Donde $PS_{i,t}$ es el precio sucio del bono para la fecha t .

4.2.2 Precio limpio

De la definición anterior, e ignorando el efecto del interés acumulado para la estimación de volatilidad, se puede definir el rendimiento de la siguiente manera:

Ecuación 6. Rendimiento del precio del bono con precio limpio directo

$$R_{i,t} = \ln\left(\frac{PL_{i,t}}{PL_{i,t-1}}\right)$$

Donde $PL_{i,t}$ es el precio limpio del bono para la fecha t.

4.2.3 Modelos Garch robustos

De acuerdo con Solano Caicedo (2014b):

Una gama de modelos alternos y de bastante utilidad para nuestro objetivo son las estimaciones robustas para métodos Garch, las cuales no son influenciadas significativamente por observaciones atípicas de la muestra, como es el caso de las estimaciones basadas en verosimilitud normal. Por ejemplo, si se trabaja con los precios sucios de los TES, es conocido que en la fecha de pago de los cupones, su precio desciende significativamente, afectando sensiblemente las estimaciones de volatilidad. No obstante, con estimadores robustos se les da un menor peso a esas observaciones “atípicas” para que su efecto sobre las estimaciones finales sea acotado. (p. 10)

Dicha metodología se detalla matemáticamente en Solano Caicedo (2014b). Sin embargo, sus alcances no mejoran la estimación con respecto a las otras metodologías expresadas, ya que esta incorpora una corrección de los pagos de cupones por medio de la modificación de los rendimientos en rezagos de la serie, sin embargo, se vuelve muy complejo y persiste el problema de la duración no constante en el tiempo.

4.2.4 Escalamiento de volatilidad con duración modificada

La duración modificada, como medida de sensibilidad, toma fuerza desde su definición matemática, debido a que se refiere a la primera derivada del precio del bono con respecto a cambios en su tasa de descuento. De acuerdo a Hull (2012), esto permite ajustar el Polinomio de Taylor de primer orden, de manera que el comportamiento del bono puede estar expresado por:

Ecuación 7. Polinomio de Taylor de primer grado

$$\Delta P_0 = \frac{\partial P_0}{\partial TD} \Delta TD$$

Ecuación 8. Aproximación del cambio en el precio

$$\Delta P_0 = -P_0 D^* \Delta TD$$

Debido a que la tasa de descuento para la valoración de los bonos no se ve afectada por el pago de cupones, y el efecto de la duración tiene menor impacto en esta que en el precio, es posible usar la anterior expresión para reexpresar la volatilidad de la tasa de interés a la volatilidad del precio:

Ecuación 9. Reexpresión de la volatilidad de la tasa de descuento

$$\sigma_{Bono} = \sigma_{TD} * D^* * TD$$

Esta expresión permite tener una estimación de la volatilidad del bono basada en la variabilidad de su tasa de descuento, brindando una buena alternativa para estimaciones individuales del activo. Sin embargo, presenta fuertes problemas para estimar volatilidad para un portafolio diversificado, ya que la estimación es puntual

en el tiempo, pero no refleja una serie de tiempo histórica, que permita estimar correlaciones con otros activos.

5. Metodología propuesta

Según los problemas expuestos inicialmente y las metodologías aplicadas en la academia actualmente, se evidencia que ninguna de estas cubre los inconvenientes que se presentan en la estimación de volatilidad para los bonos de deuda pública colombianos, por tanto, se propone llevar a cabo una metodología que denominaremos “Series de tiempo por títulos teóricos”.

Contextualización:

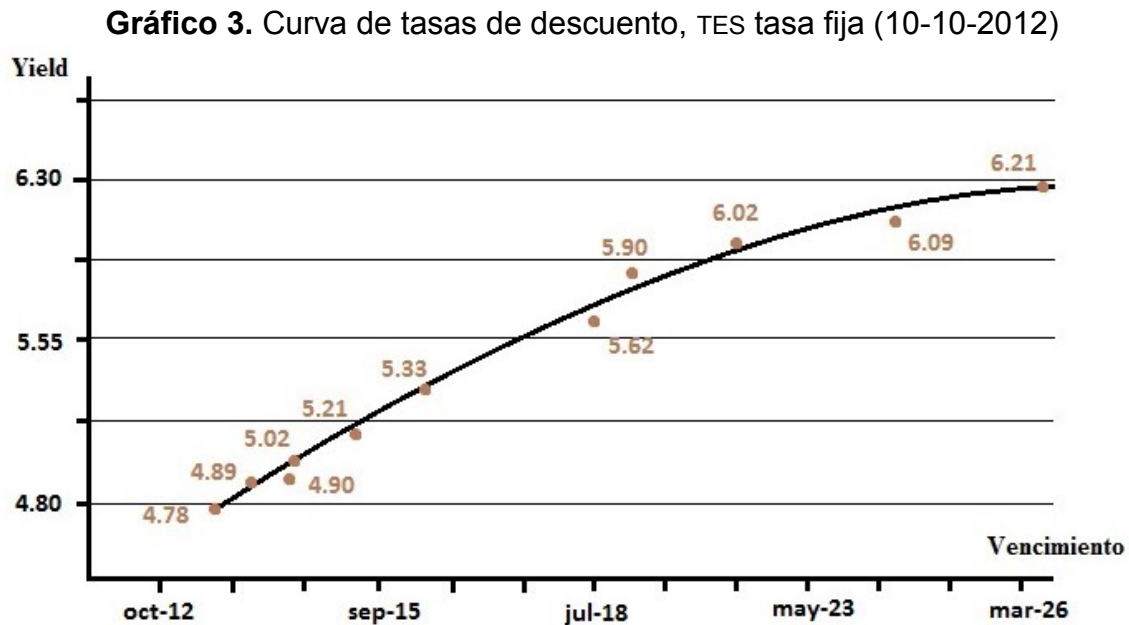
Metodología Nelson y Siegel.

La curva de rendimientos corresponde a una recopilación de información de las tasas de negociación del mercado, para cada día de títulos a ciertos vencimientos. Los títulos se agrupan dentro de grupos comparables con respecto a su indexación, es decir, de similar calidad crediticia, y cada uno de estos constituye una curva que representa las expectativas de los agentes económicos, con respecto a la evolución de la economía.

Nelson & Siegel (1987) dieron a conocer un modelo que ajusta la curva de rendimientos, donde la tasa de descuento depende de la madurez del instrumento. Esta metodología es la más aceptada a nivel mundial y es la aplicada por la Bolsa de Valores de Colombia (BVC) para la estimación de la curva de rendimientos. La curva de rendimientos se conoce también como curva cero cupón, ya que esta

representa las tasas de valoración de bonos cero cupón para diferentes vencimientos.

Conceptualmente, la curva de rendimientos tiene la siguiente forma:



Fuente: Elaboración propia, corte 10 de octubre de 2012.

El gráfico anterior muestra los diferentes vencimientos de bonos del gobierno, conocidos como TES, con respecto a la TIR (Yield) (Tasa Interna de Retorno), a la cual se están negociando en el mercado. Conceptualmente la curva muestra la relación entre el riesgo asumido en cada tramo al vencimiento y el retorno que estima el mercado. Una curva con pendiente positiva quiere decir que el mercado espera mayor rendimiento, cuando espera más tiempo para recuperar su inversión. Esta se podría decir que es una situación normal de mercado.

El objetivo de la metodología de Nelson y Siegel es ajustar la información de negociación de una sesión de mercado de bonos comparables (sector económico

del emisor, calificación, riesgo país, entre otras), y con base a las tasas de negociación y características de cada título, estimar una curva cero cupón por medio de un proceso de *bootstrapping* y, finalmente, ajustar un polinomio a dicha curva, de manera que estima cuatro parámetros (β_0 , β_1 , β_2 , τ), los cuales, al adicionarle un quinto parámetro, que es el tiempo (m , de forma anual), representan la curva de rendimientos. Dicha estimación se realiza de forma diaria, con el fin de tener para cada día de cotización, la curva cero cupón correspondiente:

Ecuación 10. Modelación de la curva de rendimientos

$$T\%_{NS}(m) = \left[\beta_0 + \beta_1 \frac{\left(1 - e^{-\frac{m}{\tau}}\right)}{\frac{m}{\tau}} + \beta_2 \frac{\left(1 - e^{-\frac{m}{\tau}}\right)}{\frac{m}{\tau}} - \beta_2 e^{-\frac{m}{\tau}} \right] \%$$

5.1 Aplicación del modelo Nelson y Siegel a la construcción de series de tiempo para los TES

La BVC junto con los proveedores de precio del mercado colombiano, publican de manera diaria los parámetros β_0 , β_1 , β_2 , τ correspondientes a la información de negociación de los TES tasa fija, de manera que se tiene la información necesaria para construir la curva cero cupón de manera histórica.

El objetivo es calcular una serie de tiempo teórica de un bono, valorando las condiciones actuales para cada día, de la siguiente manera:

Ecuación 11. Precio con base en la tasa de Nelson y Siegel

$$PrecioSocioNS_t = \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1+T\%_{NS_{i,t}})^i}$$

Donde,

FC_i: Es el valor del flujo de caja del papel para el periodo i .

T_{NS, i, t}: Es la tasa Nelson y Siegel para el periodo i y la fecha t .

La ecuación anterior permite tener control total de las condiciones del título teórico a valorar, de manera que el vencimiento y características de cupones van a ser constantes y consecuentes con las condiciones del título actual a modelar y sin presentar pago de cupones en su historia. Esto permite que se aislen los problemas de la duración modificada, ya que esta será constante en la serie de tiempo. Adicionalmente, usar los parámetros del modelo para cada uno de los días, asegura que la valoración absorba el comportamiento real del título para cada día de negociación, lo que permite calcular correlaciones con otros activos financieros.

Para dar ejemplo a la metodología, se tomó la serie de tiempo histórica de los parámetros de Nelson y Siegel desde el 4 de enero de 2010 y el 16 de octubre de 2015, publicados por el proveedor de precios para el mercado de deuda pública colombiano (curva CEC). Adicionalmente, con el objetivo de tener una comparación, se toma la serie de tiempo de la tasa de negociación (TIR), para estas fechas, de los TES con vencimiento al 2024 (Título de referencia del mercado), junto con su valoración a precio sucio y limpio.

Para efectos comparativos de las diferentes propuestas, se estima la volatilidad simple (desviación estándar) y VaR anual el día 16 de octubre de 2015, con base en una serie de tiempo de 3 años y un nivel de confianza de 95%, de manera que sean números conocidos por los participantes del mercado.

Características de los TES24:

Nemotécnico: TFIT16240724

Tasa cupón: 10% fija simple

Fecha de emisión: 24/07/2008

Periodicidad: anual

Fecha de vencimiento: 24/07/2024

Base: 365

5.2 Procedimiento de estimación

El objetivo de la metodología planteada es aislar las condiciones actuales del título de interés, de manera que se pueda valorar diariamente la serie de un título a precio teórico. Dicho procedimiento debe asegurar que siempre preserve las características del título a evaluar y la información de mercado para cada fecha, de manera particular para los TES24.

- El título a simular en cada fecha debe tener un plazo al vencimiento de 8.77 años aproximadamente (plazo al vencimiento de los TES24 al 16 de octubre de 2015).
- Para conseguir lo anterior, cada título debe conservar 10% de cupón (FC_i en la Ecuación 11. Al último cupón es necesario sumarle el 100% del nominal) para plazos anuales de 0.77, 1.77, 2.77, 3.77, 4.77, 5.77, 6.77, 7.77 y 8.77 (parámetro m a reemplazar en el polinomio planteado en la Ecuación 10).
- Cada uno de estos cupones debe ser descontado a valor presente con la tasa Nelson y Siegel para cada plazo acorde a los parámetros históricos, tomados del proveedor de precios (Resultado de la Ecuación 10 usando los parámetros β_0 , β_1 , β_2 , τ para cada fecha junto con el plazo m de cada cupón).

- El valor del precio de cada día de la serie de tiempo será la suma del valor presente de cada uno de estos flujos de caja estimados (Desarrollo de la Ecuación 11).

La metodología propuesta permite mantener las condiciones del título, al igual que las condiciones de negociación de cada día, al usar la curva cero cupón estimada por el modelo Nelson y Siegel.

Ecuación 12. Expresión para estimación de la volatilidad (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$$

Donde x corresponde a los rendimientos logarítmicos para cada serie de precios.

Ecuación 13. Expresión para estimación de VaR

$$VaR = \mu - \sigma * Z_{\alpha}$$

6. Resultados del análisis

A continuación, se detalla el estudio de series de tiempo realizado sobre los TES con vencimiento en el 2024, con el objetivo de comparar las estimaciones de volatilidad y VaR para las diferentes alternativas previamente planteadas, de manera que permita evidenciar si existe una mejora al usar la metodología planteada en la investigación.

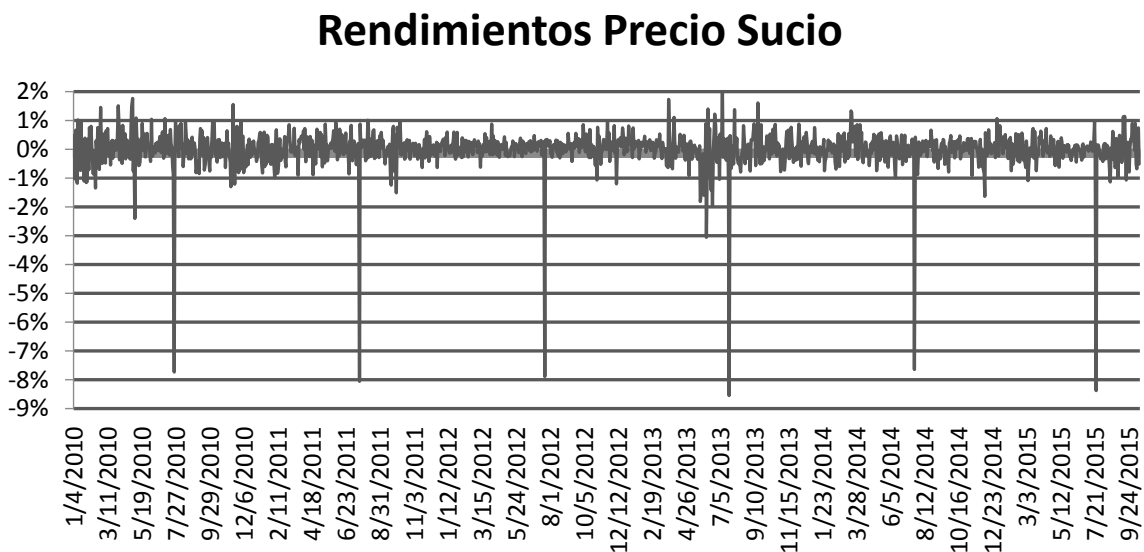
6.1 Estimación de la serie de tiempo mediante la metodología de precio sucio

Gráfico 4. Comportamiento en el tiempo del precio sucio de los TES24



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT 16240724.

Gráfico 5. Comportamiento en el tiempo de los rendimientos del precio sucio de los TES24



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT 16240724.

Tabla 1. Resultado de estimación de volatilidad y VaR precio sucio TES24

Precio Sucio		
Volatilidad	VaR Día	VaR Anual
0,721%	1,187%	18,762%

Fuente: Elaboración propia, observación al 16/10/2015.

Es claro el efecto que **presenta la acumulación de intereses y el pago de cupones** en la serie de tiempo, haciendo que presenten “picos” atípicos en la estimación del rendimiento, lo que evidentemente genera una sobre estimación de cualquier medida de riesgo.

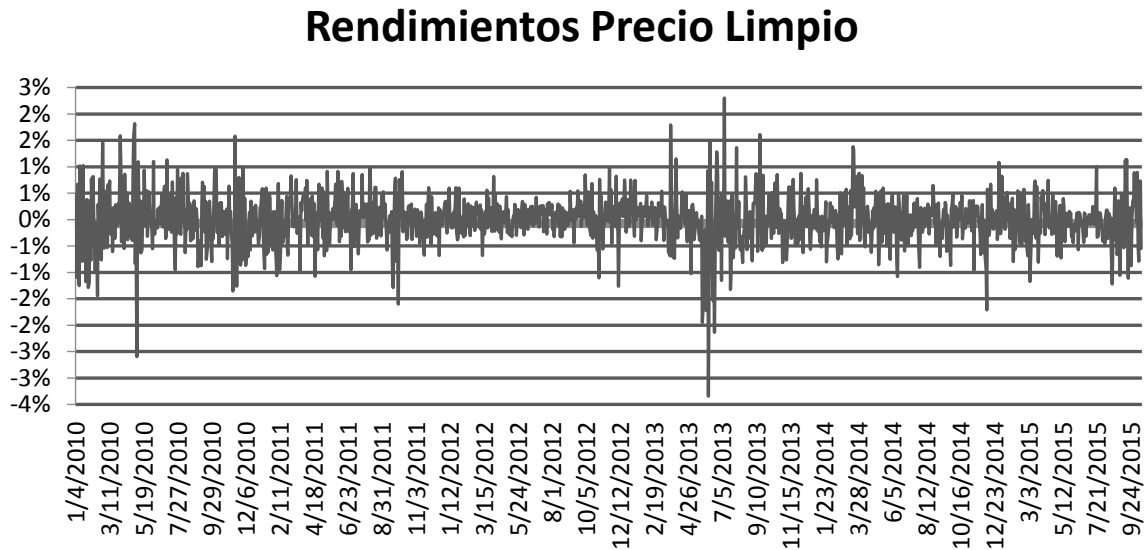
6.2 Estimación de la serie de tiempo mediante la metodología de precio limpio

Gráfico 6. Comportamiento en el tiempo del precio limpio de los TES24



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT 16240724.

Gráfico 7. Comportamiento en el tiempo de los rendimientos precio limpio de los TES24



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT 16240724.

Tabla 2. Resultado estimación de volatilidad y VaR precio limpio TES24

Precio Limpio		
Volatilidad	VaR Día	VaR Anual
0,460%	0,756%	11,955%

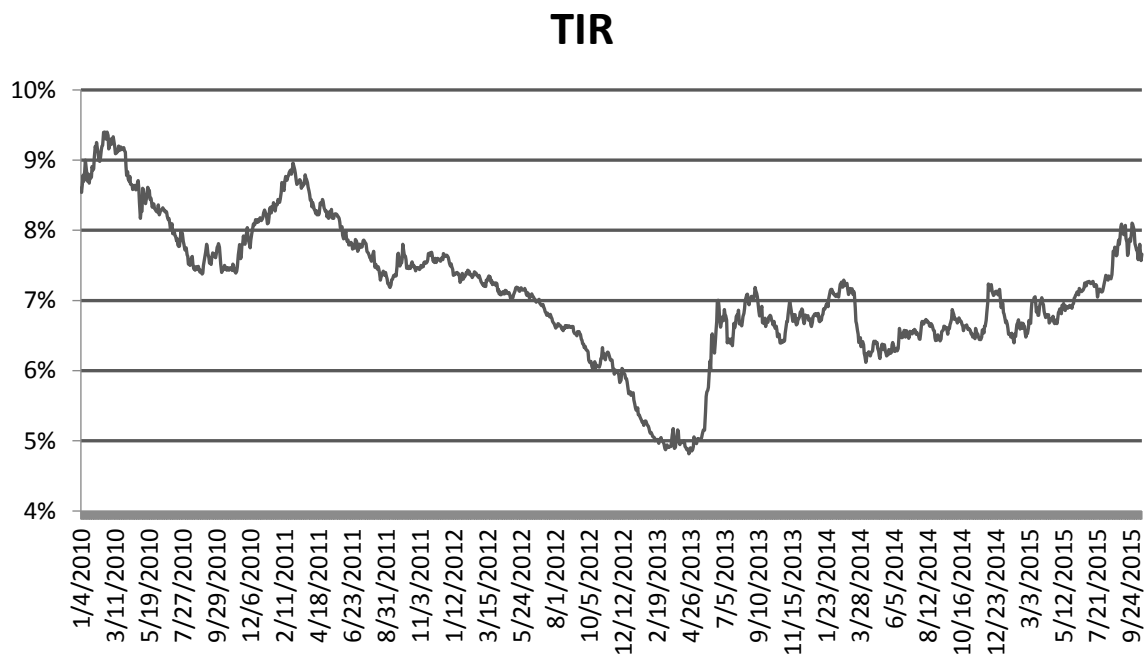
Fuente: Elaboración propia, observación al 16/10/2015.

El uso del precio limpio mejora la estimación de la volatilidad, sin embargo, es conocido el efecto de la duración en la serie de tiempo: cuando inicia tiene un plazo al vencimiento cercano a 12 años, mientras que al final presenta un plazo al vencimiento de 9 años aproximadamente. El efecto de lo anterior radica en la relación riesgo-rentabilidad en la negociación de renta fija, lo que hace que al inicio de la serie el título presente mayor volatilidad que la actual, lo que se refleja en la sobre estimación del riesgo.

Adicionalmente, sigue presente la particularidad del mercado colombiano del efecto del cambio de título de referencia para partes específicas de la curva, generando posibles distorsiones en la estimación.

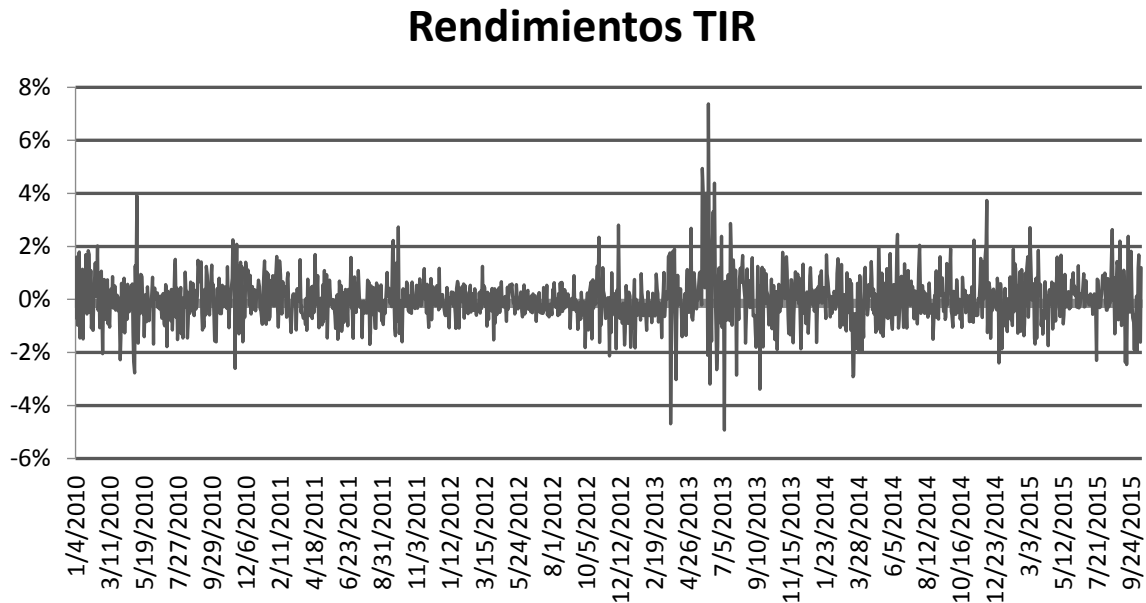
6.3 Estimación de la serie de tiempo a partir de la TIR de negociación (transferencia por duración modificada)

Gráfico 8. Comportamiento en el tiempo de la TIR de negociación TES24



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT 16240724.

Gráfico 9. Comportamiento en el tiempo de los rendimientos de la TIR de los TES24



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT 16240724.

Tabla 3. Resultado estimación de volatilidad y VaR por TIR TES24

DesVest Tasa	Duración Modificada	TIR Actual
1,03%	5,85	7,66%
Volatilidad	VaR Día	VaR Anual
0,461%	0,758%	11,986%

Fuente: Elaboración propia, observación 16/10/2015.

La anterior estimación obedece al desarrollo de la Ecuación 9, y plantea una manera alternativa sin tener el efecto de pago de cupones, y a pesar de persistir el problema de la duración no constante, el efecto se supone menor al que se presenta en el precio sucio. Sin embargo, como se expresó anteriormente, es una estimación al último día de la serie, pero no plantea una serie de tiempo que permita ser usada para la estimación de correlaciones con otros activos.

6.4 Estimación de serie de tiempo por medio de la metodología propuesta: título teórico

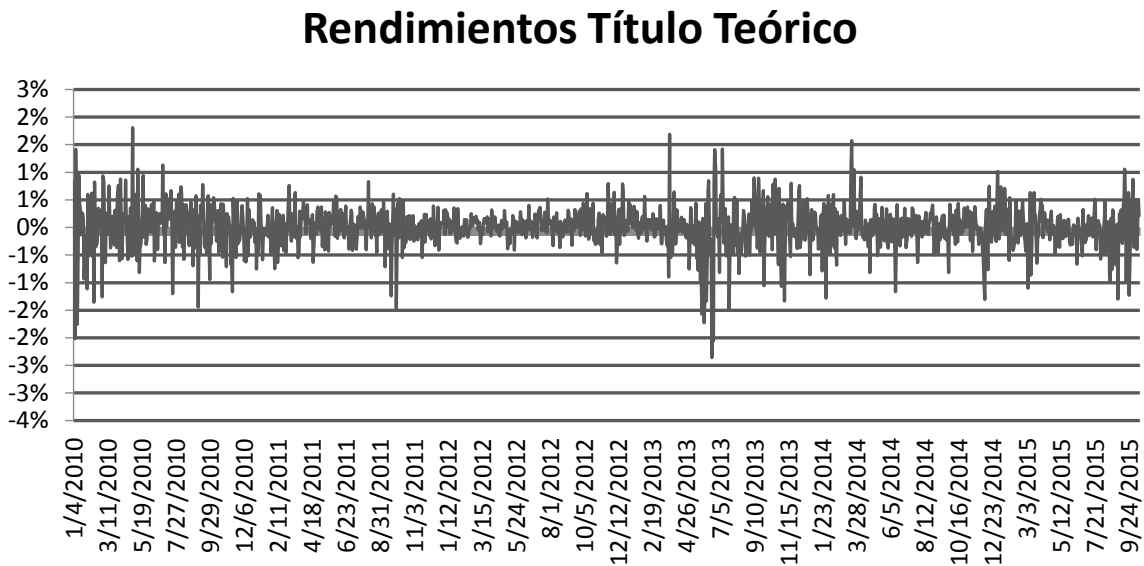
Procedimiento descrito en el numeral 5.2.

Gráfico 10. Comportamiento en el tiempo del precio título teórico TES24 a la fecha
(Metodología planteada)



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT16240724.

Gráfico 11. Comportamiento en el tiempo del rendimiento título teórico TES24 a la fecha



Fuente: Elaboración propia, periodo: 04/01/2010 a 16/10/2015, título TFIT 16240724.

Tabla 4. Comportamiento en el tiempo del resultado estimación de volatilidad y VaR por título teórico TES24

Título Teórico - Sintético		
Volatilidad	VaR Día	VaR Anual
0,401%	0,660%	10,439%

Fuente: Elaboración propia, observación al 16/10/2015.

Se evidencia que la metodología planteada disminuye la estimación del VaR anual en aproximadamente 150 pbs, con respecto al uso del precio limpio o la tasa de descuento, lo que se atribuye a la sobre estimación que dichas metodologías tienen presente, debido a la duración cambiante en el tiempo. Adicionalmente, mantener constante las características del título hace que se tenga una estimación del comportamiento para cada uno de los días de la serie de tiempo, mejorando la estimación de correlación con otros activos financieros.

7. Conclusiones

- El análisis de las series de tiempo halladas deja en evidencia las implicaciones de usar las diferentes metodologías comunes; efectos como el pago de cupones o el cambio de la duración en el tiempo hacen que la volatilidad sea sobre estimada. Adicionalmente, usar modelos Garch robustos o transferencia de riesgo vía duración modificada son exclusivos para estimaciones de volatilidad, sin embargo, no permiten hallar correlaciones con otros activos o utilizar otras aplicaciones de series de tiempo para los instrumentos de renta fija.
- La metodología propuesta mejora la estimación al usar los parámetros de Nelson & Siegel para construir títulos teóricos que aíslan las condiciones actuales del bono, permitiendo que estas no cambien durante la construcción de la serie. De manera puntual, extrae completamente el efecto de la negociación del mercado para un punto preciso de la curva de rendimientos, sin incurrir en acumulación de intereses, duración variable en el tiempo o pago de cupones.
- La estimación correcta de una serie de tiempo para activos de renta fija resulta de vital importancia para mejorar la estimación, de acuerdo con el objetivo de su uso. El desarrollo investigativo del trabajo evidencia el efecto en disminución de la volatilidad de los títulos estudiados en comparación con los métodos utilizados actualmente para construir sus series de tiempo y calcular la volatilidad.

- La metodología propuesta también puede ser usada para evaluación estadística como *backtesting* en *trading* algorítmico, estrategias de valor relativo entre diferentes partes de la curva, estimación de correlaciones con otros activos financieros, estimación del VaR para portafolios diversificados y modelación estadística con fines de cobertura, entre otras.

Referencias

- Agudelo R., D. A., & Fernández G., A. F. (2000). *Fundamentos de Matemáticas Financiera*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Bao, J., Chen, J., Hou, K., & Lu, L. (2015). *Prices and Volatilities in the Corporate Bond Market*. Ssrn. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2651243>
- Bao, J., & Pan, J. (2008). Excess volatility of corporate bonds. *MIT Working Paper*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1104765>
- Berk, J., & DeMarzo, P. (2008). *Finanzas Corporativas*. México: Pearson Educación.
- Cont, R. (2005). *Volatility Clustering in Financial Markets: Empirical Facts and Agent – Based Models*. Palaiseau, Francia: Ecole Polytechnique.
- Díez De Castro, L., & Mascareñas, J. (1991). *Ingeniería Financiera*. Madrid: McGrawHill.
- Hull, J. C. (2012). *OPTIONS, FUTURES, AND OTHER DERIVATIVES* Maple Financial Group Professor of Derivatives and Risk Management. <https://doi.org/10.1101/021634>
- JPMorgan (1996). *RiskMetrics — Technical Document*. Nueva York: Morgan Guaranty Trust Company.
- Martínez, Ó., & Uribe, J. M. (2008). *Una aproximación dinámica a la medición del riesgo de mercado para los bancos comerciales en Colombia*, 13. Recuperado el 13 de marzo de 2018 de:

<http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/aproximacion.pdf>

Nelson, C. R., & Siegel, A. F. (1987). Parsimonious Modeling of Yield Curves. *The Journal of Business*, 60(4), 473. <https://doi.org/10.1086/296409>

Salinas Ávila, J. J. (2010). Metodologías de medición del riesgo de mercado. *Innovar*, 19(34), 187–199. Recuperado el 15 de abril de 2019 de:
<http://www.scielo.org.co/pdf/inno/v19n34/v19n34a13.pdf>

Solano Caicedo, R. E. (2014a). *Valor en riesgo del portafolio de TES de los bancos colombianos*. Bogotá. Recuperado el 21 de julio de 2018 de:
<http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/8909/SolanoCaicedo-RaulinsoEnrique-2014.pdf;jsessionid=D342DD49C8FBB962AC7D41B2DB3A114F?sequence=1>

Superfinanciera de Colombia (2001). *Circular 042 SFC*. Bogotá. Recuperado el 25 de julio de 2018 de: <https://www.superfinanciera.gov.co/publicacion/20145>