

# Valuación de una nota estructurada que vincula el rendimiento de un bono cupón cero con una opción en un portafolio de inversión

## Pricing a Structured Note that Links a Zero-Coupon Bond Return with an Option in an Investment Portfolio

---

Héctor Alonso Olivares-Aguayo\*

Ambrosio Ortiz-Ramírez\*\*

Francisco Venegas-Martínez\*\*\*

(Fecha de recepción: 23 de enero de 2017. Fecha de aceptación: 24 de abril de 2017)

### RESUMEN

Este trabajo propone la construcción de una nota estructurada compuesta por activos de tres mercados: renta fija, acciones y derivados. Para la valuación del bono cupón cero se supone que la tasa de interés es estocástica y conducida por un proceso de tipo Cox, Ingersoll y Ross (1985). Para la construcción del portafolio de inversión, con perfiles de riesgo agresivo y conservador; se utilizan algunos activos del IPC de la Bolsa BMV. Mediante el modelo de Sharpe (1970) se determina el portafolio óptimo tangente a la curva de eficiencia obtenida por el modelo de Markowitz (1952). Posteriormente, se valúa la opción de compra sobre el portafolio de inversión mediante simulación Monte Carlo. Los resultados muestran que cuando un agente económico tiene un perfil de riesgo agresivo en su portafolio de inversión le es conveniente invertir en la nota estructurada propuesta.

---

\* Escuela Superior de Economía, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, hectorlivares@hotmail.com

\*\* Escuela Superior de Economía, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, amortiz@ipn.mx

\*\*\* Escuela Superior de Economía, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, fvenegas1111@yahoo.com.mx

Clasificación JEL: C15, G11, G13

**Palabras clave:** Monte Carlo simulation, teoría de portafolio, valuación de opciones

#### ABSTRACT

*This paper poses the creation of a structured note consisting of assets from three different markets: fixed income, equity and derivatives. To value the zero-coupon bond it is assumed that the interest rate is stochastic and driven by a Cox, Ingersoll and Ross (1985) process. Stocks from the IPC (Mexican Stock Exchange Index) were used to create investment portfolios with aggressive and conservative risk profiles. The optimal portfolio tangent to the Markowitz (1952) efficient frontier was determined using the Sharpe's (1970) model. Subsequently, a call option on the investment portfolio is valued by using Monte Carlo simulation. The results show that an economic agent with an aggressive risk profile investment portfolio will be better off investing in the suggested structured note.*

*JEL Classification: C15, G11, G13*

**Keywords:** Monte Carlo simulation, portfolio theory, option pricing

## Introducción

Los agentes económicos racionales buscan obtener ganancias al realizar inversiones en los mercados financieros, y con ello desean incrementar su consumo futuro para así maximizar su utilidad futura; sin embargo, deben considerar el riesgo al que están expuestos. El objetivo de esta investigación es construir una nota estructurada que satisfaga las necesidades de inversión de un agente racional considerando la relación entre riesgo y rendimiento. A diferencia de las características de las notas estructuradas que se negocian en la actualidad y que sólo consideran el mercado de dinero y de derivados; la presente investigación propone como alternativa que el agente económico pueda invertir en el corto plazo, en una nota estructurada conformada por un bono cupón cero y una opción sobre un portafolio de inversión, considerando activos que conforman el Índice de Precios y Cotizaciones (IPC). En general, una nota estructurada es un instrumento de inversión que consta de dos componentes: un bono y un derivado. El bono protege el capital inicial, asegurándole al inversionista que su capital será devuelto en la fecha de vencimiento del bono. El otro componente es un producto derivado con un subyacente asociado a un índice bursátil, a una acción o a un portafolio de acciones. Este componente podría generar mayores rendimientos si ocu-

rriera algún evento fortuito. Así, el bono mitiga el riesgo que representa la adquisición del producto derivado en caso de que el evento no ocurra. La nota propuesta en esta investigación es un instrumento que une tres mercados financieros (renta fija, acciones y derivados). Entre los instrumentos de renta fija más comunes se encuentran los bonos, estos pueden ser cupón cero o con cupones; los cuales tienen como característica principal que son de nulo o bajo riesgo. Mientras que una opción es un instrumento apalancado que se negocia en el mercado de derivados. Por otro lado, los portafolios de inversión usualmente se construyen con activos del mercado accionario, cuya principal característica es la diversificación en la selección de activos. Al realizar esta diversificación, el objetivo es reducir el riesgo no sistemático de los activos, esperando obtener un rendimiento mayor al ofrecido por la tasa libre de riesgo crédito de los instrumentos que emite el gobierno federal.

El trabajo seminal en cuanto a la exposición y medición del riesgo de los instrumentos financieros que componen la nota estructurada analizada es el estudio de Macaulay (1938). Este estudio analiza los cambios que pueden tener los precios de los bonos al variar la tasa de interés. Asimismo, al construir portafolios de inversión, el artículo seminal que investiga la relación riesgo y rendimiento es el de Markowitz (1952), en el cual se supone racionalidad de los agentes económicos y eficiencia de mercado. Asimismo, existe un hecho significativo en la historia de las finanzas, las cuales pasaron a tener un enfoque moderno con los trabajos seminales de Black y Scholes (1973) y Merton (1973) quienes proporcionan una fórmula cerrada para calcular el precio de la opción financiera (prima), y donde una de las variables relevantes para el cálculo de la prima es la volatilidad del subyacente. Por otro lado, la literatura especializada sobre valuación de notas estructuradas es relativamente escasa; véanse, al respecto, los trabajos de: Shefrin y Statman (1993), Das (1996), Stoimenov y Wilkens (2005), Palmer (2006), Venegas-Martínez (2007) y (2008), Henderson y Pearson (2007), Carlin (2009), López-Herrera *et al.* (2011), Ortiz-Ramírez *et al.* (2011), Aguilar-Juárez y Venegas-Martínez (2015) entre otros.

Esta investigación propone la construcción de una nota estructurada compuesta por activos de tres mercados: renta fija, acciones y derivados. Para la valuación del bono cupón cero se supone que la tasa de interés es estocástica y conducida por un proceso de reversión a la media del tipo Cox, Ingersoll y Ross (1985). Para la construcción del portafolio de inversión se consideran dos agentes, el primero con perfil de riesgo agresivo y otro conservador. Uno de los resultados empíricos relevantes de este trabajo es que

si el agente económico racional invierte en la nota estructurada propuesta, entonces obtiene, en promedio, rendimientos mayores que los ofrecidos por el bono cupón cero.

El desarrollo de la presente investigación es como sigue: en la siguiente sección se explica el modelo de selección de portafolios de inversión, la estimación de parámetros por máxima verosimilitud del modelo CIR y la construcción de la nota estructurada propuesta; en la sección 2 se presentan y analizan los resultados obtenidos; por último, en la sección 3 se concluye.

## 1. Modelo de selección de portafolios de inversión

Entre los primeros modelos asociados con la teoría de la utilidad y elección en los mercados se encuentra el de Von Neumann y Morgenstern (1944). Sin embargo, la teoría financiera moderna comienza con el desarrollo del modelo de Markowitz (1952). En este modelo, bajo el supuesto de normalidad se desarrolla un portafolio óptimo que mantiene un rendimiento dado con la mínima varianza posible. De acuerdo con Markowitz, el rendimiento esperado de un portafolio es el promedio ponderado (por proporciones) de los rendimientos esperados de los activos que componen el portafolio:

$$E(r_p) = \sum_{i=1}^n w_i E(r_i) \quad (1)$$

donde:

$E(r_p)$  = rendimiento esperado del portafolio  $P$ ,

$P$  = portafolio de activos,

$w_i$  = proporción de la inversión realizada en cada activo del portafolio,

$E(r_i)$  = rendimiento esperado de cada activo del portafolio.

El riesgo de un portafolio se mide con la varianza del portafolio ( $\sigma_p^2$ ). Esta varianza se calcula mediante la matriz de varianzas y covarianzas:

$$\sigma_P^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \sigma_{ij} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nn}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde:

- $\sigma_P^2$  = varianza de los rendimientos del portafolio  $P$ ,
- $w_i$  = proporción de la inversión en el activo  $i$ ,
- $\sigma_{ij}$  covarianza entre los rendimientos de los activos  $i$  y  $j$  si  $i \neq j$ ,
- $\sigma_{ii}$  = varianza entre los rendimientos de los activos  $i$  y  $j$  si  $i = j$ .

Si se estiman los rendimientos y varianzas de cada activo y las covarianzas de cada par de activos, es posible identificar el conjunto de oportunidades de inversión. En particular, se obtiene una frontera de inversiones eficiente en la que se maximice el rendimiento fijando el riesgo; o al contrario, para un nivel dado de rendimiento se minimice el riesgo (problema dual). La frontera eficiente corresponde al límite superior de las posibles inversiones. Esta frontera siempre es una curva convexa en el plano  $[\sigma_P, E(r_P)]$  y con ella se construye la curva de carteras eficientes.

Para determinar la frontera eficiente de inversiones es necesario encontrar las proporciones  $(w_1, \dots, w_n)$  que minimicen la varianza del portafolio para cada uno de los rendimientos esperados posibles. Esto es, el modelo de Markowitz no determina un portafolio único óptimo, sino una serie de portafolios eficientes, cada uno de los cuales maximiza el rendimiento para un nivel específico de riesgo, a partir del portafolio de mínima varianza global.

El problema de optimización para obtener el portafolio de mínima varianza global se plantea como:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } \frac{1}{2} \sigma_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \sigma_{ij} \\ &\text{s. a} \\ &E(r_p) = \sum_{i=1}^n w_i r_i, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0. \end{aligned} \tag{3}$$

De aquí que el problema dual es de la siguiente manera:

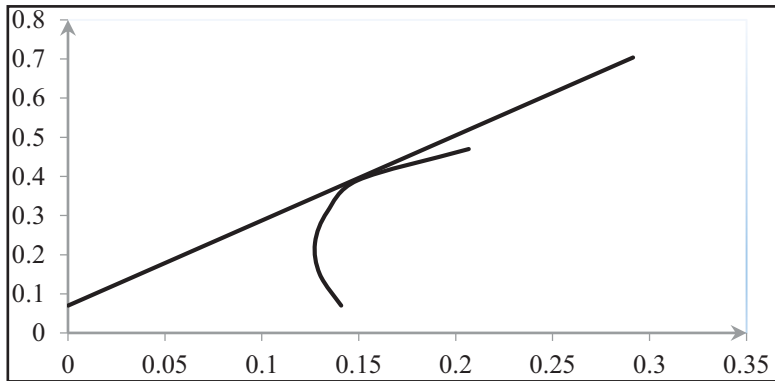
$$\begin{aligned} &\text{Maximizar } E(r_p) = \sum_{i=1}^n w_i r_i \\ &\text{s.a} \\ &\frac{1}{2} \sigma_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \sigma_{ij}, \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j = 1 \end{aligned} \tag{4}$$

A partir de (3) y (4) se tiene la teoría de portafolios de Markowitz, la cual tiene como objetivo ponderar el riesgo del portafolio. Al resolver el problema mediante multiplicadores de Lagrange para el caso de dos activos se obtiene que las ponderaciones óptimas a invertir son:

$$\left( w_1^* = \frac{r_2 - E(r_p)}{r_2 - r_1}, \quad w_2^* = \frac{E(r_p) - r_1}{r_2 - r_1} \right).$$

Extendiendo el modelo de Markowitz, William Sharpe (1963 y 1970) y James Tobin (1958) señalaron que si en una economía existe un activo libre de riesgo, como los Certificados de Tesorería (Treasury Bills o CETES) y el inversionista puede prestar o pedir prestado a la tasa “libre de riesgo” (TLR), entonces Sharpe señala que se obtiene una frontera eficiente lineal que domina a la frontera eficiente de portafolios basada en el cálculo de las covarianzas. Esta línea parte del rendimiento libre de riesgo y es tangente a la frontera eficiente de Markowitz, obteniendo el portafolio de Sharpe, como se representa en la Gráfica 1.

Gráfica 1. Línea del mercado de capitales



Fuente: Elaboración propia en Excel.

### 1.1. Estimación de parámetros del modelo CIR

Los modelos de tasa de interés estocástica conforman un campo teórico muy amplio, ya que las tasas de interés son uno de los factores más importante en la economía. Las tasas de interés se pueden clasificar como: de corto, mediano y largo plazo, según sea el vencimiento de los bonos subyacentes. En el caso de los modelos de tasa de interés instantánea, de muy corto plazo, o usualmente referidos como modelos de tasa corta poseen características especiales tales como reversión a la media y estacionariedad. Estas propiedades son importantes para modelar la dinámica de la tasa instantánea de corto plazo, la cual es útil para la valuación de diversos instrumentos financieros que se negocian en los mercados financieros. La mayoría de los modelos de tasa corta se plantean mediante la siguiente ecuación diferencial estocástica:

$$dX_t = \kappa(\theta - X_t^\alpha)dt + \sigma X_t^\beta dW_t, \quad (5)$$

con  $\alpha, \beta \geq 0$ . Los parámetros  $\kappa$  y  $\theta$  se interpretan de la misma manera que en los modelos de volatilidad estocástica y representan la velocidad de reversión y el nivel de largo plazo, respectivamente. La ecuación establecida en (5) se conoce como modelo de un solo factor homogéneo en el tiempo, ya

que los parámetros de este proceso son constantes en el tiempo. El precio de un bono de plazo  $T - t$ ,  $B_{t,T}$ , se calculan mediante la tasa corta  $X_t$ , dada en (5), de la siguiente forma

$$B_{t,T} = E \left[ \exp \left\{ -\frac{1}{T-t} \int_t^T X_t dt \right\} \middle| F_t \right]$$

donde  $F_t$  es la información de mercado relevante al tiempo  $t$ . En este caso, la estructura de plazos (o curva de rendimientos) está dada por:

$$R_{t,T} = -\frac{1}{T-t} \ln(B_{t,T})$$

Una vez determinada la estructura de plazos se resuelve el problema de la estimación de los parámetros subyacentes.<sup>1</sup> Uno de los métodos más comunes para estimar parámetros en estadística inferencial es el de máxima verosimilitud. La estimación de los parámetros en los modelos de tasa corta es usualmente realizada mediante el método generalizado de momentos debido que no requiere un supuesto sobre la distribución de los errores. Un método alternativo es el propuesto por Overbeck y Rydn (1997). En términos prácticos este método consiste en la estimación de un conjunto de parámetros que aparecen dentro de la esperanza condicional de un proceso estocástico  $E[X_t | X_{t-1}]$ . Posteriormente, los valores estimados se usan como valores iniciales en el método de máxima verosimilitud, lo que acelera la convergencia a un óptimo global. A continuación se presenta el método alternativo en el caso del modelo CIR. Si  $\alpha = 1$  y  $\beta = 0.5$  en el modelo de Cox Ingersoll Ross (1985) se describe la dinámica de un proceso  $X_t$  como la solución a una ecuación diferencial:

$$dX_t = \kappa(\theta - X_t)dt + \sigma\sqrt{X_t^+}dW_t, \quad (6)$$

---

<sup>1</sup> Véase, al respecto, Ángeles-Castro y Venegas-Martínez (2010).



donde  $W_t$  es un movimiento browniano,  $x^+ = \max(x, 0)$  es la parte positiva,  $\kappa > 0, \theta > 0$  y  $\sigma > 0$ .<sup>2</sup> Este modelo es consistente con la característica de reversión a la media a una tasa de interés con una velocidad de reversión  $\kappa$  hacia un valor medio  $\theta$ .

Para la estimación de los parámetros se requiere la densidad de transición. El proceso CIR tiene una expresión en forma cerrada para dicha densidad.<sup>3</sup> En el modelo CIR (1985) se muestra que la densidad de  $x_{t+\Delta t}$  al tiempo  $t + \Delta t$  es:

$$f(x_{t+\Delta t} | x_t, \phi, \Delta t) = ce^{(-u-v)} \left( \frac{u}{v} \right)^{\frac{q}{2}} I_q(2\sqrt{uv}),$$

donde:

$$c = \frac{2a}{\sigma^2(1 - e^{-a\Delta t})}, \quad u = cx_t e^{-a\Delta t}, \quad v = cx_{t+\Delta t}, \quad q = \frac{2ab}{\sigma^2} - 1,$$

$I_q(2\sqrt{uv})$  es la función modificada de Bessel de primera clase de orden  $q$  (véase Venegas-Martínez, 2005).

Uno de los factores de éxito del método de máxima verosimilitud son los valores iniciales adecuados, los cuales se emplean como insumo en un algoritmo de optimización numérica. De acuerdo con la notación utilizada anteriormente, la esperanza condicional del modelo CIR es:

$$m(x; \phi) = E_{\phi}(x_t | x_{t-1} = x) = \gamma_0 + \gamma_1 x$$

$$\gamma_0 = -b(e^{-a\Delta t} - 1) \text{ y } \gamma_1 = e^{-a\Delta t}.$$

<sup>2</sup> Estimaciones de la volatilidad en México y otros países Latinoamericanos se encuentran en Venegas-Martínez e Islas Camargo (2005) y López-Herrera et al. (2009).

<sup>3</sup> Véase Overbeck y Rydn (1997), p. 433.

Al respecto, Overbeck y Rydn (1997) muestran que los estimadores por mínimos cuadrados condicionales para  $\kappa$  y  $\theta$ , respectivamente, son:

$$\hat{\kappa} = -\frac{1}{\Delta t} \left[ \left\{ \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x}_n)(x_{t-1} - \bar{x}'_n) \right\} / \left\{ \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_{t-1} - \bar{x}'_n)^2 \right\} \right]$$

$$\hat{\theta} = -\frac{\bar{x}_n - e^{(-\kappa \Delta t)} \bar{x}'_n}{e^{-\kappa \Delta t} - 1},$$

donde

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t, \bar{x}'_n = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_{t-1}.$$

El estimador de  $\theta$  se basa en el segundo momento condicional dado por:

$$v(x; \phi) = E \left[ (x_t - E_\phi [x_t | x_{t-1} = x])^2 | x_{t-1} = x \right] = \sigma^2 (\eta_0 + \eta_1 x),$$

$$\eta_0 = \frac{\theta}{2\kappa} (e^{-\kappa \Delta t} - 1)^2 \quad y \quad \eta_1 = -\frac{1}{\kappa} e^{-\kappa \Delta t} (e^{-\kappa \Delta t} - 1).$$

y el estimador para  $\sigma^2$  satisface:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{\{x_t - m(x_{t-1}; \hat{\kappa}, \hat{\theta})\}^2}{\hat{\eta}_0 + \hat{\eta}_1 x_{t-1}}$$

donde  $\hat{\eta}_0$  y  $\hat{\eta}_1$  se evalúan en  $(\hat{\kappa}, \hat{\theta})$ . Ahora bien, dada una muestra de tamaño  $n$  de la variable  $x$ , la función de verosimilitud es:

$$L(\phi) = \prod_{t=1}^{n-1} f(x_{t+1} | x_t, \phi, \Delta t).$$

y el logaritmo de la función anterior es:

$$\ln L(\phi) = \sum_{t=1}^{n-1} \ln f(x_{t+1} | x_t, \phi, \Delta t)$$

De esta manera, la función de verosimilitud del proceso CIR es:

$$\begin{aligned} \ln L(\phi) &= \sum_{t=1}^{n-1} \ln \left( c e^{(-u-v)} \left( \frac{u}{v} \right)^{\frac{q}{2}} I_q(2\sqrt{uv}) \right) \\ &= (n-1) \ln c + \sum_{t=1}^{n-1} \left[ -u_t - v_{t+1} + \frac{q}{2} \ln \frac{v_{t+1}}{u_t} + \ln \left( I_q(2\sqrt{u_t v_{t+1}}) \right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $u_t = cx_t e^{-\kappa \Delta t}$  y  $v_{t+1} = cx_{t+1}$ . Mediante un proceso de optimización encontramos los estimadores máximo verosímiles  $\hat{\phi}$  al minimizar la expresión en (7) como

$$\hat{\phi} = (\hat{\kappa}, \hat{\theta}, \hat{\sigma}) = \arg \max_{\phi} \ln L(\phi)$$

## 1.2. Nota estructurada que incluye dinero, capitales y derivados

En la composición del portafolio se utilizan dos tipos de notas estructuradas: una denominada *call spread* (sin barrera) y otra llamada *Down and Out* y *Up and Out* (doble barrera), a continuación se describen las fórmulas teóricas para la valuación de las notas.

### 1.2.1. Nota estructurada sin barrera (*call spread*)

El precio de una nota estructurada *call spread* está dada por la siguiente expresión:

$$P_V = P_B + P_D \times F \quad (8)$$

donde:

$F$  = factor establecido en el prospecto determinado por el emisor desde el inicio del depósito y ajusta el rendimiento de la nota estructurada,

$P_V$  = precio de valuación de la nota estructurada *call spread*,

$P_D$  = prima de las opciones implícadas en la estrategia. En este caso.

$$P_D = C_{X_1} + C_{X_2} \quad (9)$$

donde  $C_{X_1}$  y  $C_{X_2}$  son las primas de un *call* con precios de ejercicio  $X_1$  y  $X_2$ , respectivamente, las cuales se calculan con la fórmula de Black y Scholes (1973). El precio del bono cupón cero está dado por:

$$P_B = \frac{N}{\left(1 + R_n \frac{n}{360}\right)} \quad (10)$$

donde:

$P_B$  = precio del bono cupón cero,

$N$  = valor nominal de la nota estructurada *call spread*,

$n$  = número de días por vencer de la nota estructurada,

$R_n$  = tasa de interés libre de riesgo asociada al número de días por vencer; además:

$$S_0 = E(r_p) \times I_0 \quad (11)$$

$$C_X = S_0 N(d_1) - X e^{-R_n T} N(d_2) \quad (12)$$

con  $d_1, d_2$  y  $T$  definidas por:

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S_0}{X}\right) + \left(R_n + \frac{\sigma_p^2}{2}\right)T}{\sigma_p \sqrt{T}}, d_2 = d_1 - \sigma_p \sqrt{T} \text{ y } T = \frac{n}{360},$$

donde:

$I_0$  = inversión disponible en opciones,

$C_x$  = prima de la opción tipo *call* con precio de ejercicio  $X$ ,

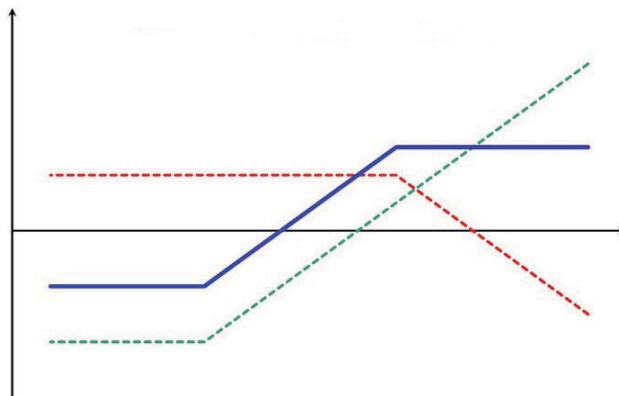
$S_0$  = valor del activo subyacente inicial,

$N(\cdot)$  = función de distribución acumulada de una variable normal estándar,

$\sigma_p$  = volatilidad del rendimiento del portafolio de inversión (subyacente).

La Gráfica 2 muestra un *call spread* que se construye con una posición larga en una opción de compra y una posición corta en una opción de compra con mayor precio de ejercicio que la de la posición larga, ambas sobre un mismo subyacente y con igual plazo al vencimiento.

Gráfica 2. Call spread



Fuente: Elaboración propia.

### 1.2.1. Descripción de la nota estructurada doble

El precio de una nota estructurada de doble barrera *Down and Out* y *Up and Out* (i.e., al tocar las barreras el subyacente, la opción se desactiva) está dada por la siguiente expresión:

$$P_E = P_B + P_D \times F \quad (13)$$

$P_E$  = precio de valuación de la Nota Estructurada *Down and Out* y *Up*,

$F$  = factor establecido en el prospecto determinado por el emisor desde el inicio del depósito y ajusta el rendimiento de la nota estructurada,

$P_B$  = precio del bono cupón cero.

$$P_D = D_o + D_u \quad (14)$$

donde:

$D_o$  = prima de una opción barrera *Down and Out*,

$D_u$  = prima de una opción barrera *Down and Up*,

$$D_o = A - B \quad (15)$$

El modelo para la valuación de las opciones *Down and Out* y *Up and Out*, es el propuesto por Rubinstein y Reiner (1991), con  $A$  y  $B$  dadas por.

$$A = X(1 + R_n)^{-T} N \left( \frac{\ln \left( \frac{S_0}{H_i} \right)}{\sigma_p \sqrt{T}} + \left( 1 + \frac{\left( 1 + R_n - \frac{\sigma_p^2}{2} \right) T}{\sigma_p^2} \right) \sigma_p \sqrt{T} - \sigma_p \sqrt{T} \right)$$

$$B = X(1 + R_n)^{-T} \left( \frac{H_i}{S_0} \right)^2 \left( 1 + \frac{\left( 1 + R_n - \frac{\sigma_p^2}{2} \right) T}{\sigma_p^2} \right)^{-2} N \left( \frac{\ln \left( \frac{H_i}{S_0} \right)}{\sigma_p \sqrt{T}} + \left( 1 + \frac{\left( 1 + R_n - \frac{\sigma_p^2}{2} \right) T}{\sigma_p^2} \right) \left( \sigma_p \sqrt{T} - \sigma_p \sqrt{T} \right) \right),$$

con  $H_i$  como barrera inferior.

$$D_u = C - D, \tag{16}$$

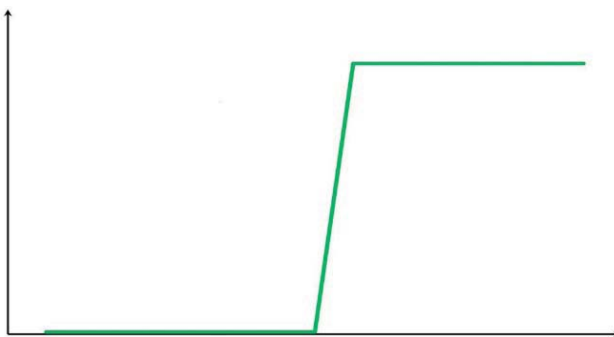
$$C = X(1 + R_n)^{-T} N \left( - \left( \frac{\ln \left( \frac{S_0}{H_s} \right)}{\sigma_p \sqrt{T}} + \left( 1 + \frac{\left( 1 + R_n - \frac{\sigma_p^2}{2} \right) T}{\sigma_p^2} \right) \left( \sigma_p \sqrt{T} - \sigma_p \sqrt{T} \right) \right) \right)$$

$$D = X(1 + R_n)^{-T} \left( \frac{H_s}{S_0} \right)^2 \left( 1 + \frac{\left( 1 + R_n - \frac{\sigma_p^2}{2} \right) T}{\sigma_p^2} \right)^{-2} N \left( - \left( \frac{\ln \left( \frac{H_s}{S_0} \right)}{\sigma_p \sqrt{T}} + \left( 1 + \frac{\left( 1 + R_n - \frac{\sigma_p^2}{2} \right) T}{\sigma_p^2} \right) \left( \sigma_p \sqrt{T} - \sigma_p \sqrt{T} \right) \right) \right),$$

con  $H_s$  como barrera superior.

En la Gráfica 3 se observa el rendimiento de la nota estructurada *Knock Out* del tipo *Down and Out*. Una particularidad de este tipo de nota estructurada es que el rendimiento que puede generar se paga al vencimiento y depende de si el subyacente toca o no la barrera estipulada en el contrato.

Gráfica 3. Nota estructurada doble barrera *Knock Out* del tipo *Down y Out*



Fuente: Elaboración propia.

## 2. Aplicación y análisis de resultados

La nota estructurada propuesta en este trabajo está conformada por un bono cupón cero y una opción sobre un portafolio de inversión. Se obtuvo información de BLOOMBERG para los precios de los activos del IPC y se consideró la tasa de interés “libre de riesgo” (CETES 360) publicada por BANXICO. Se simula el rendimiento esperado del portafolio por la inversión disponible en opciones y la desviación estándar del portafolio como la volatilidad en la opción para ambos perfiles (agresivo y conservador) de riesgo. La simulación Monte Carlo utiliza 100,000 trayectorias de precios del subyacente para el cálculo de las primas de las opciones sin barreras y doble barrera. El análisis estadístico correspondiente a la matriz de varianzas y covarianzas y al portafolio de Sharpe se muestra en el Apéndice A con los rendimientos históricos diarios de los componentes del IPC. Se seleccionaron sólo cinco acciones para la conformación del portafolio de inversión de acuerdo al perfil de riesgo (conservador o agresivo) del inversionista como se observa en los cuadros siguientes:



En el Cuadro 1 se observan las Betas de los activos  $\beta_i = \text{Cov}(r_i, r_{IPC}) / \sigma_{IPC}^2$ , y la Beta del portafolio<sup>4</sup>  $\beta_p$ , calculada como el promedio ponderado por volumen de las betas de los activos. La Beta del portafolio es relativamente baja, es decir, menor a uno, por lo que, al cambiar una unidad porcentual, el IPC, el rendimiento del portafolio cambia 0.53298496 veces, es decir, el portafolio conservador es poco sensible ante cambios en el Índice del Mercado Accionario Mexicano (IPC).

Cuadro 1. Componentes del portafolio de Sharpe, bajo perfil de riesgo conservador

Componente	$W_i$	Rendimiento $E(r_i)$	Beta
AC	62%	43.30%	0.56840955
ASURB	29%	44.54%	0.3597306
CHDRAUIB	0%	-2.66%	0.70235691
GAPB	0%	13.46%	0.3140612
SORIANAB	9%	37.32%	0.82740446
<b>Suma</b>	<b>100%</b>	<b>Beta portafolio</b>	<b>0.53298496</b>

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

En el Cuadro 2 se observa el riesgo y el rendimiento que ofrece el portafolio conservador con mayor índice de Sharpe<sup>5</sup>  $(E(r_p) - r) / \sigma_p$ . En el Cuadro 3 se muestran los niveles de riesgo asociados a un nivel de rendimiento dado para cada portafolio. Asimismo, en dicha tabla, se observa el índice de Sharpe y la Beta correspondiente.

<sup>4</sup> La Beta del portafolio es una medida de volatilidad del portafolio relativa a variabilidad del mercado. Se obtiene como el promedio ponderado por monto de las betas de los activos.

<sup>5</sup> El índice de Sharpe del portafolio es una medida del excedente del rendimiento esperado del portafolio con respecto de rendimiento libre de riesgo ajustado por volatilidad.

Cuadro 2. Factores del portafolio de Sharpe bajo perfil de riesgo conservador

Rendimiento $E(r_p)$	Varianza ( $\sigma_p^2$ )	Desviación ( $\sigma_p$ )	TLR ( $r$ )	I. Sharpe
0.4308455	0.02120234	0.14561025	4.45%	2.65328511

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

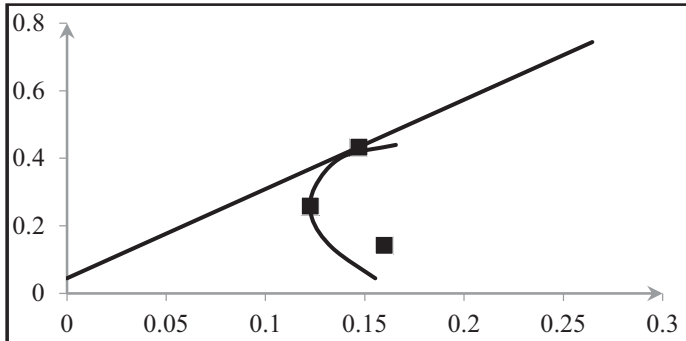
Cuadro 3. Resultados obtenidos en los portafolios bajo perfil de riesgo conservador

# portafolio	Desviación	Rendimiento	I. Sharpe	Beta
1	0.155336348	4.45%	0	0.531133855
2	0.133824707	13.45%	0.672521555	0.492496642
3	0.123790694	22.45%	1.454067297	0.484060562
4	0.124983657	31.45%	2.160282457	0.489672229
5	0.138145699	40.45%	2.605944332	0.520000928
6	0.165697809	44.00%	2.386875238	0.45032693
<b>Min. Varianza</b>	0.122962225	0.259576621	1.749127602	0.486247602
<b>Max. Sharpe</b>	0.145610251	0.43084551	2.653285115	0.532984969
<b>IPC</b>	0.159794699	0.142074745	0.610625672	1

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

La Gráfica 4 muestra los portafolios: mínima varianza global (vértice de la parábola), el de Sharpe (tangencia entre la frontera eficiente de Markowitz y la línea de mercado de capitales) y el que ofrece el mercado (IPC). El cual ofrece un menor rendimiento, y un mayor riesgo a los dos portafolios anteriormente mencionados.

Gráfica 4. Portafolio de inversión conservador



Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

En el Cuadro 4 se observa que la Beta del portafolio es relativamente alta, es decir, mayor a uno, por lo que al cambiar una unidad porcentual el IPC el rendimiento del portafolio agresivo cambia 1.3748755 veces, es decir, es muy sensible ante cambios en el Índice del mercado mexicano (IPC).

En el Cuadro 5 se observa el riesgo y el rendimiento que ofrece el portafolio agresivo con un mayor índice de Sharpe. En el Cuadro 6 se muestran los niveles de riesgo asociados a un nivel de rendimiento dado para cada portafolio. Asimismo se observa el índice de Sharpe y la Beta correspondientes al portafolio agresivo.

Cuadro 4. Componentes del portafolio de Sharpe bajo perfil de riesgo agresivo

Componente	$W_i$	Rendimiento $E(r_i)$	Beta
ALFAA	61%	41.22%	1.18689223
CEMEXCPO	15%	61.78%	2.68173025
ELEKTRA	0%	-73.24%	1.33813851
GMEXICOB	0%	14.51%	1.38367637
MEXCHEM	24%	28.41%	1.05456501
<b>Suma</b>	<b>100%</b>	<b>Beta del portafolio</b>	<b>1.3748755</b>

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

Cuadro 5. Factores del portafolio de Sharpe bajo perfil de riesgo agresivo

Rendimiento $E(r_p)$	Varianza ( $\sigma_p^2$ )	Desviación ( $\sigma_p$ )	TLR	I. Sharpe
0.411360679	0.077359015	0.278134886	4.45%	1.31900275

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

Cuadro 6. Resultados obtenidos en los portafolios bajo perfil de riesgo agresivo

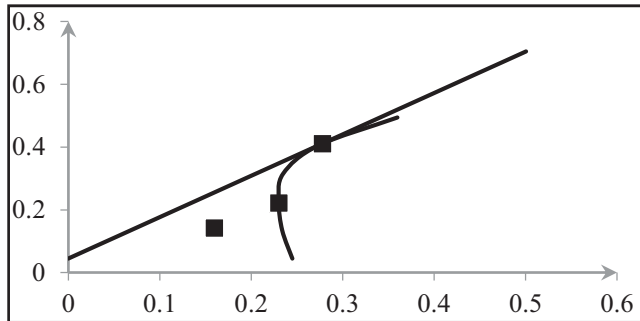
# portafolio	Desviación	Rendimiento	I. Sharpe	Beta
1	0.245132858	4.45%	0	1.233313841
2	0.23404582	13.45%	0.186368065	1.221058063
3	0.230357014	22.45%	0.38013141	1.208802261
4	0.234882294	31.45%	0.57717078	1.196546495
5	0.273062155	40.45%	0.772721913	1.184290651
6	0.359816219	49.45%	0.961892643	1.172034841
<b>Mínima varianza</b>	0.230354746	0.222332586	0.771994455	1.184336944
<b>Sharpe</b>	0.278134304	0.411359911	1.319002748	1.374877991
<b>IPC</b>	0.159794699	0.142074745	0.610625672	1

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

La Gráfica 5 muestra los portafolios: mínima varianza global (vértice de la parábola), el de Sharpe (Tangencia entre la frontera eficiente de Markowitz y la línea de mercado de capitales) y el que ofrece el mercado (IPC). El último ofrece un menor rendimiento y un menor riesgo a los dos portafolios anteriormente mencionados.

Por otra parte, bajo el supuesto de que la tasa de interés del bono cupón cero es conducida por un proceso del tipo Cox, Ingersoll y Ross (CIR), y con una muestra de 255 observaciones de la tasa de CETES a plazo de un año

Gráfica 5. Portafolio de inversión agresivo



Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

se determinan los parámetros de este modelo bajo el método de máxima verosimilitud, los resultados se muestran en el Cuadro 7:

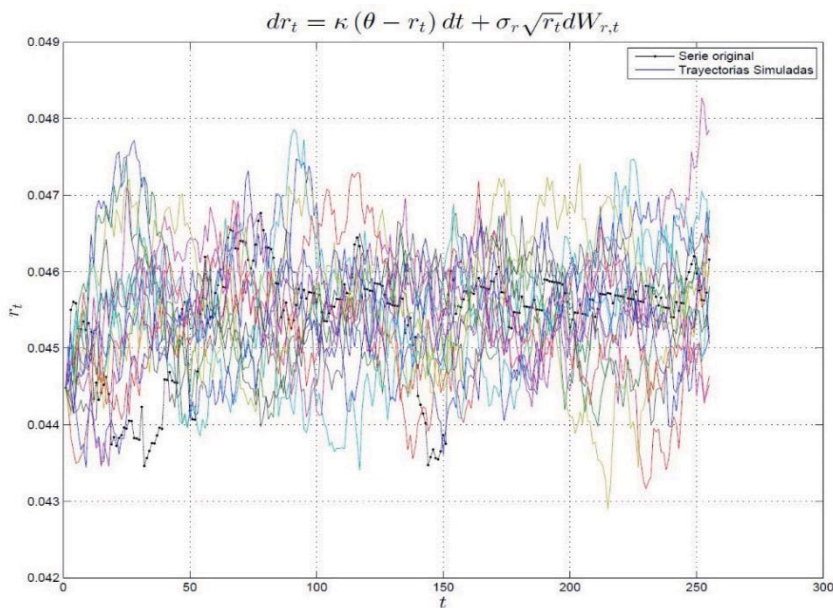
Cuadro 7. Parámetros del modelo CIR

Parámetros	Valor
$\kappa$	0.066265
$\theta$	0.045479
$\sigma$	0.020086

Fuente: Elaboración propia.

La Gráfica 6 muestra la serie original de la tasa libre de riesgo (de incumplimiento) y sólo quince trayectorias simuladas con los parámetros dados por el modelo CIR. Esto se hace así con el propósito de que las trayectorias se puedan observar. La línea punteada representa la tasa de interés libre de riesgo. Con cada trayectoria se calcula el valor intrínseco de la opción. Después de calcular 100,000 trayectorias se promedian los valores intrínsecos obtenidos para calcular la prima de la opción. Al ir aumentando el número de trayectorias en la Gráfica 6, se podría observar que el modelo CIR posee reversión a su valor medio, es decir, en el largo plazo se regresa a la tasa promedio.

Gráfica 6. Proceso CIR



Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

Después de realizar el análisis de los instrumentos financieros correspondientes al mercado de dinero y de capitales, con los resultados obtenidos podemos valorar las primas de las opciones financieras que se negocian en el mercado de derivados, conformando así las notas estructuradas sin barrera y doble barrera que ligán los tres mercados financieros, los resultados obtenidos ver Cuadro 8:

En el Cuadro 9 se muestra el valor de la prima y el número de opciones sin barrera que puede comprar el agente económico.

Cuadro 8. Resultados de la nota estructurada bajo el perfil de riesgo conservador

Tiempo	TLR	VN	K	$\theta$	$\sigma$	$P_B$	$I_0$	simulaciones	$S_0$	$\sigma_p$	$H_s$	$H_i$
1	0.04	10,000,000	0.06	0.04	0.02	9,551,576.15	448,423.85	100,000	194,229	0.14	314,001	44,842

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

Cuadro 9. Resultados de opciones sin barrera bajo perfil de riesgo conservador

<b>X</b>	<b>Valor opción sin barrera</b>	<b>Parte opción sin barrera</b>
44,842	149,743.50	2.99
89,684	108,726.63	4.12
134,584	67,077.23	6.68
179,439	26,339.87	17.03
224,280	4,852.09	92.44
269,159	434.86	1,031.58

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

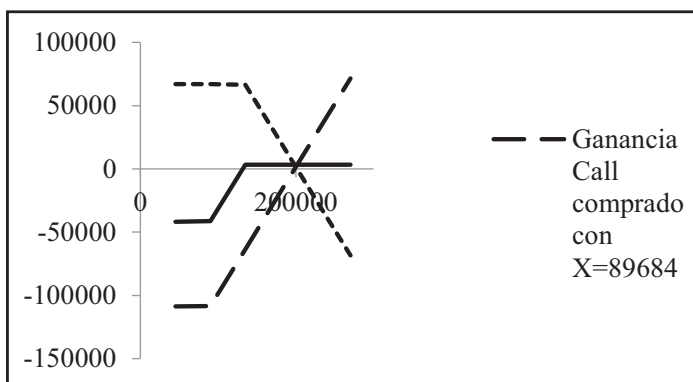
A partir del Cuadro 10 y la Gráfica 7 se puede concluir que los rendimientos obtenidos se encuentran en la zona de máximas pérdidas de la estrategia, por lo que no es conveniente invertir los rendimientos obtenidos del bono cupón cero en opciones financieras. En el Cuadro 11 se muestra el valor de la prima y el número de opciones con barrera que puede comprar el agente económico:

Cuadro 10. Resultado de la nota estructurada call spread bajo perfil de riesgo conservador

<b>S</b>	<b>Ganancia comprado Call con X=89,684</b>	<b>Ganancia Call vendido con X=134,584</b>	<b>Ganancia de la estrategia (P<sub>D</sub>)</b>
45,000.00	-108,726.63	67,077.23	-41,649.40
90,000.00	-108,411.40	67,077.23	-41,334.17
135,000.00	-63,411.40	66,661.69	3,250.30
180,000.00	-18,411.40	21,661.69	3,250.30
225,000.00	26,588.60	-23,338.31	3,250.30
270,000.00	71,588.60	-68,338.31	3,250.30
<b>53,926.08</b>	<b>-108,726.63</b>	<b>67,077.23</b>	<b>-41,649.40</b>

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

Gráfica 7. Gráfica de la nota estructurada Call spread bajo perfil de riesgo conservador



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 11. Resultados de opciones con barrera bajo perfil de riesgo conservador.

X	Valor opción con barrera	Parte opción con barrera
44,842	149,060.33	3.01
89,684	108,116.14	4.14
134,584	66,556.02	6.74
179,439	25,977.31	17.26
224,280	4,579.09	97.95
269,159	302.36	1,483.61

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

A partir del Cuadro 12 y la Gráfica 8 se observa que los rendimientos obtenidos se encuentran en la zona de máximas pérdidas de la estrategia, por lo que no es conveniente invertir los rendimientos obtenidos del bono

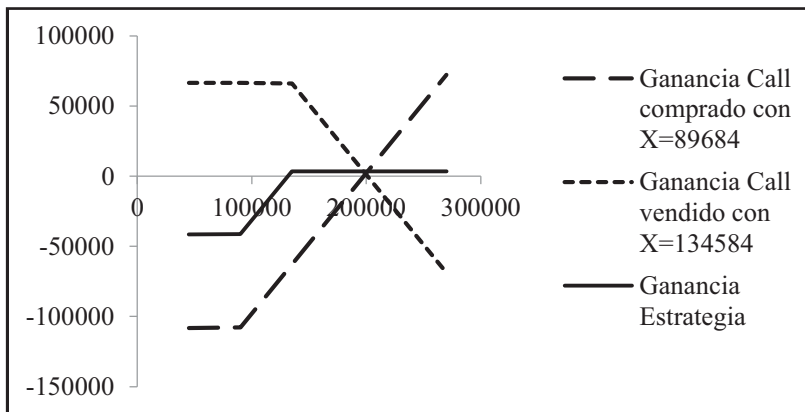


Cuadro 12. Resultado de la nota estructurada call spread considerando una opción doble barrera bajo perfil de riesgo conservador

S	Ganancia Call comprado con X=89,684	Ganancia Call vendido con X=134,584	Ganancia de la estrategia (P <sub>D</sub> )
45,000.00	-108,116.14	66,556.02	-41,560.12
90,000.00	-107,800.91	66,556.02	-41,244.89
135,000.00	-62,800.91	66,140.49	3,339.57
180,000.00	-17,800.91	21,140.49	3,339.57
225,000.00	27,199.09	-23,859.51	3,339.57
270,000.00	72,199.09	-68,859.51	3,339.57
<b>53,926.08</b>	<b>-108,116.14</b>	<b>66,556.02</b>	<b>-41,560.12</b>

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

Gráfica 8. Gráfica de la nota estructurada Call spread considerando una opción doble barrera bajo perfil de riesgo conservador



Fuente: Elaboración propia.

cupón cero en opciones financieras. Se realiza el mismo análisis pero para notas estructuradas bajo un perfil de riesgo agresivo, como se muestra en el Cuadro 13:

Cuadro 13. Resultados de la nota estructurada bajo perfil de riesgo agresivo

Tiempo	TLR	VN	K	$\Theta$	$\sigma$	$P_B$	$I_0$	simulaciones	$S_{0-}$ $E(r_p)$ $*(I_0)$	$\sigma_p$	$H_s$	$H_i$
1	0.04	10,000,000	0.06	0.04	0.02	9,551,576.15	448,423.85	100,000	184,464	0.27	314,001	44,842

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 14 muestra el valor de la prima y el número de opciones sin barrera que puede comprar el inversionista.

Cuadro 14. Resultados de opciones sin barrera bajo perfil de riesgo agresivo

<b>X</b>	<b>Valor opción sin barrera</b>	<b>Parte opción sin barrera</b>
44,842	140,188.17	3.19
89,684	99,127.29	4.52
134,584	59,286.97	7.56
179,439	27,543.30	16.28
224,280	10,526.96	42.61
269,159	3,629.50	123.59

Fuente: Elaboración propia.

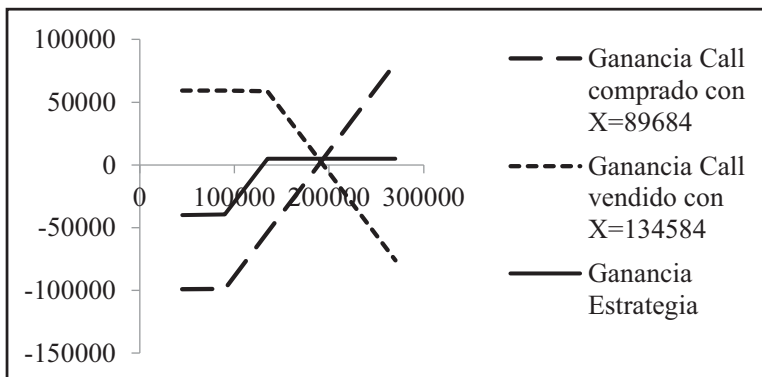
Del Cuadro 15 y la Gráfica 9 se observa que los rendimientos obtenidos se encuentran en la zona de máximas ganancias de la estrategia, por lo que es conveniente invertir los rendimientos obtenidos del bono cupón cero en opciones financieras, generando así una ganancia adicional como resultado de la operación por \$55,653.16. En el Cuadro 16 muestra el valor de la prima y el número de opciones con barrera que puede comprar el agente económico.

Cuadro 15. Resultado de la nota estructurada call spread bajo el perfil de riesgo agresivo

S	Ganancia Call comprado con X=89,684	Ganancia Call vendido con X=134,584	Ganancia de la estrategia ( $P_D$ )
45,000.00	-99,127.29	59,286.97	-39,840.31
90,000.00	-98,812.06	59,286.97	-39,525.08
135,000.00	-53,812.06	58,871.44	5,059.38
180,000.00	-8,812.06	13,871.44	5,059.38
225,000.00	36,187.94	-31,128.56	5,059.38
270,000.00	81,187.94	-76,128.56	5,059.38
<b>151,873.96</b>	<b>-36,938.09</b>	<b>41,997.47</b>	<b>5,059.38</b>
número de opciones de la nota (F)	<b>11</b>	ganancia en opciones	<b>55,653.16</b>
$P_B$	9,551,576.15		
$I_0$	<b>448,423.85</b>	ganancia total	<b>504,077.02</b>
$P_V$	<b>10,055,653.16</b>		

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

Gráfica 9. Gráfica de la nota estructurada Call spread bajo el perfil de riesgo agresivo



Fuente: Elaboración propia.

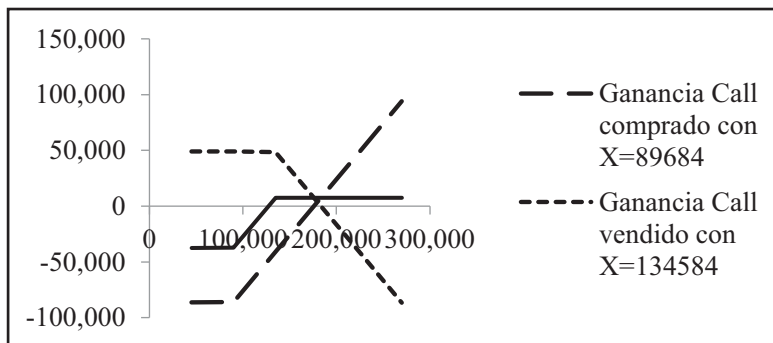
Cuadro 16. Resultados de opciones con barrera bajo perfil de riesgo agresivo.

X	Valor opción con barrera	Parte opción con barrera
44,842	125,252.48	3.58
89,684	86,340.55	5.19
134,584	48,872.94	9.17
179,439	19,608.24	22.87
224,280	5,195.42	86.33
269,159	633.17	708.49

Fuente: Elaboración propia.

Observe que del Cuadro 17 y la Gráfica 10 los rendimientos obtenidos se encuentran en la zona de máximas ganancias de la estrategia, por lo que sí es conveniente invertir los rendimientos obtenidos del bono cupón cero en opciones financieras, generando una ganancia adicional como resultado de la operación por \$89,185.02, la cual representa la mayor ganancia de todas las notas estructuradas analizadas en esta investigación.

Gráfica 10. Gráfica de la nota estructurada call spread considerando doble una opción barrera bajo el perfil de riesgo agresivo



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos y del análisis de las gráficas de las notas estructuradas anteriores, se concluye que en el caso del perfil de riesgo conservador no es conveniente invertir en la nota estructurada, mientras que con el perfil agresivo es conveniente, puesto que en este caso los rendimientos que ofrece la opción al conformar la nota son mayores que sólo si se hubiera realizado la inversión en el bono cupón cero.

Cuadro 17. Resultado de la nota estructurada call spread considerando una opción doble barrera bajo perfil de riesgo agresivo

S	Ganancia Call comprado con X=89,684	Ganancia Call vendido con X=134,584	Ganancia de la estrategia (P <sub>D</sub> )
45,000.00	-86,340.55	48,872.94	-37,467.61
90,000.00	-86,025.32	48,872.94	-37,152.38
135,000.00	-41,025.32	48,457.41	7,432.08
180,000.00	3,974.68	3,457.41	7,432.08
225,000.00	48,974.68	-41,542.59	7,432.08
270,000.00	93,974.68	-86,542.59	7,432.08
<b>151,873.96</b>	<b>-24,151.36</b>	<b>31,583.44</b>	<b>7,432.08</b>
número de opciones de la nota (F)	<b>12</b>	ganancia en opciones	<b>89,185.02</b>
P <sub>B</sub>	9,551,576.15		
I <sub>0</sub>	<b>448,423.85</b>	ganancia total	<b>537,608.87</b>
P <sub>E</sub>	<b>10,089,185.02</b>		

Fuente: Elaboración propia utilizando EXCEL.

### 3. Conclusiones

La ingeniería financiera ha tenido avances notables en el desarrollo de metodologías para la resolución y modelación. Uno de estos avances ha sido la creación de nuevos productos como las notas estructuradas, las cuales ofrecen una relación eficiente entre rendimiento y riesgo, lo cual coadyuva a una toma de decisión en portafolios de inversión.

En este trabajo se ha presentado la valuación de una nota estructurada con base en los precios históricos diarios de los componentes del IPC. Esta nota estructurada integra los tres mercados financieros existentes. Mediante simulación Monte Carlo se determinó el precio del bono cupón cero y las primas de las opciones financieras para así conformar la nota estructurada. Los resultados obtenidos conducen a que si el inversionista tiene un perfil de riesgo conservador en su portafolio de inversión (acciones seleccionadas AC, ASURB, CHDRAUIB, GAPB, SORIANAB) no le es conveniente invertir en la nota estructurada *call spread* que vincula el rendimiento del bono cupón cero con la opción sobre dicho portafolio, es decir, la mejor decisión de inversión será invertir en el bono cupón cero. No obstante, cuando el inversionista tiene un perfil de riesgo agresivo en su portafolio de acciones: ALFAA, CEMEXCPO, ELEKTRA, GMEXICOB, MEXCHEM, le es conveniente invertir en la nota estructurada *call spread*, que vincula el rendimiento del bono cupón cero con la opción sobre dicho portafolio, ya que se observaron ganancias superiores con la opción con y sin barreras a las obtenidas con el bono cupón cero. Es posible obtener un mayor rendimiento en el corto plazo cuando se invierte en notas estructuradas *call spread* que consideran opciones doble barrera, lo anterior debido a que las primas de las opciones doble barrera son más baratas que las opciones *plain vanilla*.

Por último, una limitación de este trabajo es que se supone normalidad en los rendimientos de los componentes del IPC, por lo que queda en futuras líneas de investigación relajar tal supuesto. También queda pendiente utilizar notas estructuradas con expectativa de alta volatilidad en el rendimiento del portafolio de inversión. Por último, sería importante incorporar posibles saltos en los precios de las acciones como en Venegas-Martínez (2001).

## Apéndice A. Cálculo de los portafolios de inversión

A continuación se muestra la matriz de varianzas y covarianzas bajo perfil de riesgo conservador:

Cuadro A.1. Matriz de varianzas y covarianzas bajo perfil de riesgo conservador

Varianzas y covarianzas	AC	ASURB	CHDRAUIB	GAPB	GRUMAB
AC	0.028840739	0.00773969	0.01059636	0.005499312	0.01346852
ASURB	0.007739685	0.05689398	0.00589622	0.012328202	0.01126916
CHDRAUIB	0.010596363	0.00589622	0.04683289	0.007070692	0.0133366
GAPB	0.005499312	0.0123282	0.00707069	0.030892144	0.00844714
GRUMAB	0.013468522	0.01126916	0.0133366	0.00844714	0.09922233

Fuente: Elaboración propia utilizando Excel.

Cuadro A.2. Matriz de varianzas y covarianzas bajo perfil de riesgo agresivo

Varianzas y covarianzas	ALFAA	CEMEXCPO	ELEKTRA	GMEXICOB	MEXCHEM
ALFAA	0.093777155	0.08072169	0.03916937	0.043900654	0.03491977
CEMEXCPO	0.080721692	0.35580719	0.08927392	0.097805801	0.07931928
ELEKTRA	0.039169374	0.08927392	0.29681658	0.040236047	0.03333994
GMEXICOB	0.043900654	0.0978058	0.04023605	0.085402802	0.04333317
MEXCHEM	0.034919765	0.07931928	0.03333994	0.043333175	0.07222867

Fuente: Elaboración propia utilizando Excel.

Cuadro A.3. Construcción de la línea de mercado de capitales bajo perfil de riesgo conservador

<b>Línea de mercado de capitales (CML)</b>			
<b>Portafolio de Sharpe</b>	<b>TLR</b>	<b>Rend CML</b>	<b>Desv. CML</b>
0.00%	100.00%	4.45%	0
10.00%	90.00%	8.34%	0.0147034
20.00%	80.00%	12.22%	0.0294067
30.00%	70.00%	16.11%	0.0441101
40.00%	60.00%	20.00%	0.0588134
50.00%	50.00%	23.88%	0.0735168
60.00%	40.00%	27.77%	0.0882201
70.00%	30.00%	31.65%	0.1029235
80.00%	20.00%	35.54%	0.1176268
90.00%	10.00%	39.43%	0.1323302
100.00%	0.00%	43.31%	0.1470335
110.00%	-10.00%	47.20%	0.1617369
120.00%	-20.00%	51.09%	0.1764402
130.00%	-30.00%	54.97%	0.1911436
140.00%	-40.00%	58.86%	0.2058469
150.00%	-50.00%	62.75%	0.2205503
160.00%	-60.00%	66.63%	0.2352536
170.00%	-70.00%	70.52%	0.249957
180.00%	-80.00%	74.40%	0.2646603

Fuente: Elaboración propia utilizando Excel.



Cuadro A.4. Construcción de la línea de mercado de capitales bajo perfil de riesgo agresivo.

<b>Línea de mercado de capitales (CML)</b>			
Portafolio de Sharpe	TLR	Rend. CML	Desv. CML
0.00%	100.00%	4.45%	0
10.00%	90.00%	8.12%	0.02781
20.00%	80.00%	11.79%	0.05563
30.00%	70.00%	15.46%	0.08344
40.00%	60.00%	19.12%	0.11125
50.00%	50.00%	22.79%	0.13907
60.00%	40.00%	26.46%	0.16688
70.00%	30.00%	30.13%	0.19469
80.00%	20.00%	33.80%	0.22251
90.00%	10.00%	37.47%	0.25032
100.00%	0.00%	41.14%	0.27813
110.00%	-10.00%	44.80%	0.30595
120.00%	-20.00%	48.47%	0.33376
130.00%	-30.00%	52.14%	0.36157
140.00%	-40.00%	55.81%	0.38939
150.00%	-50.00%	59.48%	0.4172
160.00%	-60.00%	63.15%	0.44501
170.00%	-70.00%	66.82%	0.47283
180.00%	-80.00%	70.48%	0.50064

Fuente: Elaboración propia utilizando Excel.

## Referencias bibliográficas

- Aguilar-Juárez, I. P. y F. Venegas-Martínez (2015). "Una estrategia de inversión y cobertura mediante la combinación de notas estructuradas", *Panorama Económico*, vol. 10, núm. 20, pp. 7-46.
- Ángeles-Castro, G. y F. Venegas-Martínez (2010). "Valuación de opciones sobre índices bursátiles y determinación de la estructura de plazos de la tasa de interés en un modelo de equilibrio general". *Investigación Económica*, vol. 69, núm. 271, pp. 43-80.
- Black, F. y M. Scholes (1973). "The Pricing of Options and Corporate Liabilities". *The Journal of Political Economy*, vol. 81, núm. 3, pp. 637-654.
- Carlin, B. (2009). "Strategic Price Complexity in Retail Financial Markets". *Journal of Financial Economics*, vol. 91, núm. 3, pp. 278-287.
- Cox, J. C., J. E. Ingersoll, y S. A. Ross (1985). "A Theory of the Term Structure of Interest Rates". *Econometrica*, vol. 53, núm. 2, pp. 385-407.
- Das, S. (1996). "Structured Notes and Derivative Embedded Securities". *Euromoney Publications*.
- Henderson, B. J. y N. Pearson (2007). "Patterns in the Payoffs of Structured Equity Derivatives". *Working paper*, AFA 2008, New Orleans Meetings.
- López-Herrera, F; F. Venegas-Martínez y A. Sánchez-Daza (2009). "Memoria larga de la volatilidad de los rendimientos del mercado mexicano de capitales". *Análisis Económico*, vol. 24, núm. 56, pp. 129-146.
- Macaulay, F. (1938). "Some Theoretical Problems Suggested by the Movements of Interest Rates, bond Yields and Stock Prices since 1856". New York: National Bureau of Economic Research.
- Markowitz, H. M. (1952). "Portfolio Selection". *Journal of Finance*, vol. 7, núm. 1, pp. 77-91.
- Merton, C. R. (1973). "Theory of Rational Option Pricing", *Bell Journal of Economics and Management Science*, vol. 4, núm. 1, pp. 141-183.
- Ortiz-Ramírez, A., F. Venegas-Martínez, y F. López-Herrera (2011). "Valuación de una nota estructurada que liga el rendimiento de un índice bursátil con los pagos de un bono y un derivado", *Estocástica: Finanzas y Riesgo*, año 1, núm. 2, pp. 49-62.
- Overbeck, L. y T. Rydn (1997). "Estimation in the Cox-Ingersoll-Ross model". *Econometric Theory*, vol. 13, núm. 3, pp. 430-461.
- Palmer, B. (2006). "Equity-Indexed Annuities: Fundamental Concepts and Issues", *Working Paper*, 45.

- Rubinstein, M. y E. Reiner (1991). "Breaking down the barriers". *Risk*, vol. 4, núm. 8, pp. 28-35.
- Sharpe, W. F. (1963). "A Simplified Model for Portfolio Analysis". *Management Science*, vol. 9, núm. 2, pp. 277-293.
- Sharpe, W. F. (1970). *Portfolio Theory and Capital Markets*. New York: McGraw Hill.
- Tobin, J. (1958). "Liquidity Preference as Behavior Towards Risk. *Management Science*", vol. 25, núm. 2, pp. 65-86.
- Shefrin, H. y M. Statman (1993). "Behavioural Aspects of the Design and Marketing of Financial Products". *Financial Management*, vol. 22, núm. 2, pp.123-134.
- Stoimenov, P. A. y S. Wilkens (2005). "Are Structured Products 'Fairly' Priced? An Analysis of the German Market for Equity-Linked Instruments". *Journal of Banking and Finance*, vol. 29, núm. 12, pp. 2971-2993.
- Venegas-Martínez, F. y A. Islas Camargo (2005). "Volatilidad en los mercados de América Latina. Efectos de Largo plazo". *Comercio Exterior*, vol. 55, núm. 11, pp. 936-947.
- Venegas-Martínez, F. (2001). "Opciones, cobertura y procesos de difusión con saltos: una aplicación a los títulos de GCARSO". *Estudios Económicos*, vol. 16, núm. 32, pp. 203-226.
- Venegas-Martínez, F. (2005). "Bayesian Inference, Prior Information on Volatility, and Option Pricing: A Maximum Entropy Approach". *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, vol. 8, núm. 1, pp. 1-12.
- Venegas-Martínez, F. (2007). "Mercados de notas estructuradas: un análisis descriptivo y métodos de valuación". *El Trimestre Económico*, vol. LXXIV (3), núm. 295, pp. 615-661.
- Venegas-Martínez, F. (2008). *Riesgos financieros y económicos. Productos derivados y decisiones económicas bajo incertidumbre*. 2da. Edición. Cengage Learning. México.
- Von Neumann, J. y O. Morgenstern (1944). *The Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, NJ: Princeton University Press.