

Banco de México
Documentos de Investigación

Banco de México
Working Papers

N° 2004-01

**Expectativas del Mercado Implícitas en los Precios de
Instrumentos Derivados: Aplicaciones al Mercado
Cambiario y Petrolero**

Alejandro Díaz de León
Banco de México

Martha Elena Casanova
Banco de México

Julio de 2004

La serie de Documentos de Investigación del Banco de México divulga resultados preliminares de trabajos de investigación económica realizados en el Banco de México con la finalidad de propiciar el intercambio y debate de ideas. El contenido de los Documentos de Investigación, así como las conclusiones que de ellos se derivan, son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente las del Banco de México.

The Working Papers series of Banco de México disseminates preliminary results of economic research conducted at Banco de México in order to promote the exchange and debate of ideas. The views and conclusions presented in the Working Papers are exclusively the responsibility of the authors and do not necessarily reflect those of Banco de México.

Expectativas del Mercado Implícitas en los Precios de Instrumentos Derivados: Aplicaciones al Mercado Cambiario y Petrolero¹

Alejandro Díaz de León ²
Banco de México

Martha Elena Casanova ³
Banco de México

Abstract

The paper's objective is to identify the balance of risks that economic agents incorporate in oil and exchange rate markets (peso/US dollar). For that purpose, two methodologies that are normally used to estimate the expected risk-neutral probability functions for a determinate underlying asset, from option market price quotations, are used: a) the lognormal mix parametric method, to analyze the balance of risks for the oil market during the first quarter of 2003 (period in which the oil price was affected by the Iraq conflict); and, b) the non-parametric method, interpolation of the smile curve, to obtain the risk-neutral probability function for the peso/US dollar exchange rate. The latter methodology is also used to propose a definition of exchange rate risk premium, which compensates investors for the peso-depreciation bias and the higher probability of extreme variations that is observed in the estimated risk-neutral probability functions.

Keywords: risk-neutral densities, options, exchange rate, oil price.

JEL Classification: F31, G13, G15.

Resumen

En este trabajo se identifica el balance de riesgos que los agentes económicos incorporan en los mercados de petróleo y cambiario (peso/dólar). Para este propósito se estimaron las distribuciones de probabilidad esperadas neutras al riesgo para un determinado activo subyacente a partir de las cotizaciones del mercado de opciones. El método paramétrico de mezcla de lognormales se utiliza para analizar el mercado petrolero durante el primer trimestre del 2003, periodo en el que el precio del crudo estuvo influenciado por las perspectivas del conflicto armado en Irak. Por otra parte, el método no paramétrico de interpolación de la curva *smile* se utiliza para obtener la distribución de probabilidad esperada neutral al riesgo para la cotización del peso respecto al dólar. Adicionalmente, se propone una definición de prima de riesgo cambiario que compensa al inversionista por el sesgo a la depreciación del peso y la mayor probabilidad de tener variaciones extremas.

Palabras Clave: Densidades de riesgo-neutral, opciones, tipo de cambio, precio del petróleo.

¹La primera versión fue elaborada en mayo de 2003. Se agradecen los comentarios y sugerencias de Javier Alvarado, Alberto Torres, Gabriela Pérez Septién, Lorenza Martínez, Daniel Chiquiar, Sara Castellanos y Julio Santaella.

²Dirección General de Investigación Económica. Email: adiazl@banxico.org.mx.

³Dirección General de Investigación Económica. Email: marcasanova@yahoo.com.

ÍNDICE

1. Introducción

2. Importancia de la Estimación de Distribuciones de Probabilidad para Diferentes Activos

2.1. Información estadística que se puede extraer de las distribuciones de probabilidad.

2.2. Experiencia internacional.

3. Metodologías para la Estimación de las Distribuciones de Probabilidad Implícitas en las Cotizaciones de Instrumentos Derivados

3.1. Método de mezcla de lognormales.

3.2. Método de interpolación de la curva *smile*.

3.3. Reflexiones en cuanto la conveniencia de utilizar la mezcla de lognormales o la interpolación de la curva *smile*.

4. Análisis del Balance de Riesgos Implícito en las Distribuciones de Probabilidad que se Construyen a partir de las Cotizaciones de los Instrumentos Derivados

4.1. Estimación de las distribuciones de probabilidad implícitas en las opciones sobre los futuros del precio del petróleo.

4.2. Estimación de las distribuciones de probabilidad implícitas en las opciones sobre el tipo de cambio (peso/dólar).

4.3. Una estimación de la prima de riesgo cambiario a través de las distribuciones de probabilidad implícitas en las opciones sobre el tipo de cambio (peso/dólar).

5. Conclusiones

6. Bibliografía

1. Introducción

En los últimos años ha proliferado el uso de instrumentos derivados, los cuales han probado ser una eficaz herramienta en la administración de riesgos. Así, son utilizados por corporaciones, emisores o inversionistas para cubrir las posiciones o riesgos que no desean. Estos instrumentos ofrecen un beneficio a su tenedor cuando cierto activo o índice de referencia toma valores estipulados. En particular, las opciones que se intercambian con diferentes precios de ejercicio ofrecen un rendimiento que depende de los valores específicos que registre su activo subyacente en una fecha determinada. Por tanto, el valor presente de estos instrumentos depende de la distribución de probabilidad esperada por los participantes en dicho mercado. De manera análoga, al conocer los precios pactados en el mercado para las opciones, se pueden hacer inferencias sobre las distribuciones de probabilidad esperadas para los activos subyacentes. Este tema ha dado lugar a un amplio desarrollo de la literatura económica y financiera, en la cual se ha buscado construir distribuciones de probabilidad esperadas para los activos subyacentes que sean congruentes con los precios de sus instrumentos derivados. Esto es de gran utilidad, ya que permite conocer con precisión los riesgos que el mercado percibe para el precio de un activo subyacente determinado.

En este trabajo se presenta el balance de riesgos que se puede obtener para el mercado petrolero y para la cotización del peso respecto al dólar a través de sus distribuciones de probabilidad esperadas. Al respecto, se utilizan dos metodologías, la mezcla de lognormales para los precios de la mezcla de crudo West Texas Intermediate (WTI) y la interpolación de la curva *smile*¹ para la cotización del peso respecto al dólar. Adicionalmente, se utiliza esta última metodología para proponer una definición de prima de riesgo cambiario, la cual compensa a los inversionistas por mantener un activo en pesos, cuya cotización tiene un sesgo a la depreciación y mayor probabilidad de tener variaciones extremas.² Esta

¹ La curva *smile* relaciona al precio de ejercicio con la volatilidad implícita en los precios de las opciones. También se utiliza dicho nombre para relacionar la volatilidad implícita y la delta de la opción (primera parcial del precio de la opción respecto al activo subyacente) (ver sección 3.2 y Gráfica 8).

² Este fenómeno es conocido en la literatura económica como “peso problem”, ver Blanco, H. (1986).

información es útil para analizar los riesgos que avizoran los agentes que participan en dichos mercados.

El uso de las metodologías presentadas responde a las diferencias en cuanto al tipo de información del mercado de derivados que se tenga. La información de mercados bursátiles³, en particular opciones con múltiples precios de ejercicio, permite utilizar un método paramétrico que utiliza una mezcla de lognormales para aproximar la distribución de probabilidad esperada (Bahara (1997)). Por su parte, las opciones sobre tipos de cambio en los mercados de mayoreo o interbancarios se caracterizan por tener muy pocos precios de ejercicio. Por ello, se necesita otra metodología para construir las funciones de densidad implícitas en los precios de los derivados que se observan en el mercado. En particular, se utiliza un método no paramétrico conocido como interpolación de la curva *smile* (Malz (1997)), el cual satisface las restricciones de información presentes en el mercado cambiario.

Es importante destacar que debido a que no se conocen explícitamente las diferentes primas de riesgo que están incorporadas en los precios de las opciones, ni la aversión al riesgo de los inversionistas, los supuestos que se tienen que realizar para poder construir las funciones de densidad implican que sólo se pueden estimar distribuciones de probabilidad esperadas neutrales al riesgo. No obstante, cabe señalar que si la prima de riesgo que está presente en los precios es baja o estable, las variaciones en las funciones estimadas reflejarán principalmente los cambios en las expectativas de los agentes que participan en dicho mercado. Este tipo de información es de gran utilidad, tanto para los participantes en el mercado como para las autoridades financieras, en particular los bancos centrales, ya que de esta manera pueden seguir el pulso de los mercados. Por ello, los bancos centrales de Inglaterra, Canadá, Estados Unidos, así como el Fondo Monetario Internacional y el Banco de Pagos Internacionales (BIS), entre otros, han desarrollado y publicado estudios en la materia.

³ Ejemplos de estas bolsas son el Chicago Mercantile Exchange y el Chicago Board of Trade, etc.

La siguiente sección explica brevemente el uso que diferentes bancos centrales y organismos internacionales hacen de las distribuciones de probabilidad esperadas neutrales al riesgo para tipos de cambio, índices accionarios y los precios del petróleo. La tercera sección describe los métodos de mezcla de lognormales y de interpolación de la curva *smile* para estimar las funciones de densidad esperadas. La cuarta sección incluye la aplicación del método de mezcla de lognormales para el precio del petróleo (WTI) y el de la curva *smile* para el tipo de cambio (peso/dólar), así como la propuesta de definición para la prima de riesgo cambiario asociada al sesgo y mayor riesgo de depreciación del peso. Finalmente, en la última sección se concluye y se discuten algunas extensiones del presente trabajo.

2. Importancia de la Estimación de Distribuciones de Probabilidad para Diferentes Activos

Los instrumentos financieros contienen gran cantidad de información acerca de las expectativas que tienen los agentes económicos sobre diversos activos o variables financieras. Esto se ve claramente en las cotizaciones de los futuros y opciones, los cuales por su naturaleza contingente, dependen del valor que toman los activos subyacentes en el futuro. Así, a partir de ellos, se pueden inferir las expectativas del mercado respecto a los activos o bienes subyacentes.

En particular, los Bancos Centrales, se han interesado en usar estas funciones de probabilidad para analizar las expectativas del mercado en cuanto a cambios futuros en las tasas de interés, tipos de cambio y precios de otros activos.⁴ Debido a que estos métodos requieren los precios de diversos activos financieros, la información que a partir de ellos se obtiene refleja las expectativas del mercado, respaldada por decisiones de inversión y no sólo por la percepción de algunos analistas (encuestas de opinión, etc.).

⁴ Algunas instituciones que han utilizado estas técnicas son: Banco de Inglaterra, BIS, Banco de Canadá, Banco Europeo, Banco de Japón, Banco de Francia, Banco de España y el Banco de México. En la sección 2.2 se presentan ejemplos concretos.

2.1 Información estadística que se puede extraer de las distribuciones de probabilidad

A partir de los precios de las opciones es posible obtener no sólo la media y varianza esperada de algún activo, sino además la función de densidad para ese bien subyacente⁵. Esta función refleja, para un día en particular, la frecuencia correspondiente a cada uno de los precios esperados para ese activo subyacente al vencimiento de las opciones. Es por ello que a través de la misma, es posible obtener información de las expectativas del mercado para dicho activo. Las principales estadísticas que se pueden obtener de las funciones de densidad corresponden a los cuatro momentos alrededor de la media (media, varianza, sesgo y kurtosis).

Cabe señalar que el sesgo o coeficiente de asimetría refleja la ubicación de valores extremos de la distribución respecto a una normal, la cual tiene una asimetría de cero. Así, cuando una distribución de probabilidad tiene asimetría positiva (negativa) indica que en ésta se incluyen valores positivos extremos (negativos). Por su parte la kurtosis mide la elevación o achatamiento de la distribución con respecto a una normal. Es una medida del grado en que las observaciones están agrupadas en las colas o extremos de la distribución. Una kurtosis mayor a 3 implica que dicha distribución es relativamente elevada y con colas gordas respecto a una distribución normal y lo contrario si ésta es menor a 3.

2.2 Experiencia Internacional

Existen varias instituciones que se han avocado a la tarea de investigar y poner en práctica algunas técnicas para extraer las funciones de probabilidad esperada de diversos activos, entre las cuales se encuentran: el Banco Central de Inglaterra, el Banco Internacional de Pagos, la Reserva Federal de Estados Unidos y el Banco de México.

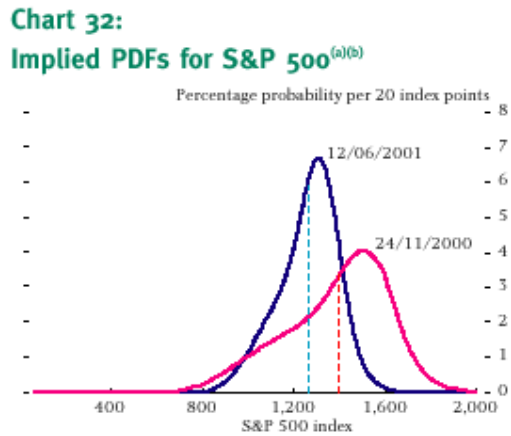
⁵ Una distribución de probabilidad puede caracterizarse por completo con la derivación de sus momentos.

A manera de ejemplo, es útil mencionar que el Comité de Política Monetaria del Banco de Inglaterra ha utilizado la información de los mercados de derivados para cuantificar la incertidumbre asociada a los precios futuros de diversos activos. Esto permite: 1) anticipar eventos exógenos, 2) analizar la fortaleza o debilidad de una moneda y 3) conocer la expectativa del mercado sobre el futuro de la política monetaria.

Al respecto, considérese lo expuesto por el Banco de Inglaterra en el “Financial Stability Review” publicado en junio de 2001 respecto a los movimientos de los mercados accionarios en Estados Unidos (Bank of England (2001)). En dicha publicación se señalaba que la distribución de probabilidad esperada para el futuro del índice S&P 500 mostraba que entre noviembre de 2000 y junio de 2001 se había presentado una reducción considerable en sus precios (media), misma que fue seguida por una disminución en la dispersión de los datos (Gráfica 1). Asimismo se anticipaban menores correcciones a la baja (un menor sesgo). Esto indica que para noviembre de 2000 los agentes asignaban una mayor probabilidad a reducciones cuantiosas en los precios de las acciones incluidas en el índice S&P 500 en relación a junio de 2001 (aunque en noviembre de 2000 la media era mayor).

Gráfica 1

Distribución de probabilidad esperada para el índice accionario S&P 500



Sources: Chicago Mercantile Exchange and Bank calculations.

(a) Probability density functions calculated from three-month futures contracts.

(b) Dashed lines show the mean.

Fuente: Financial Stability Review, junio de 2001, pp.31.

El Banco de Inglaterra también utilizó estas metodologías para analizar el mercado petrolero (Bank of England (2000)). Así, la Gráfica 2 presenta la probabilidad de que el precio del petróleo hubiera aumentado por arriba de 45 dólares en los próximos 6 meses para el año 2000. En ella se observa como los incrementos en los precios del petróleo hacia finales del 2000 y la mayor incertidumbre que prevaleció en el mercado petrolero habían dado lugar a un incremento en la probabilidad de que se presentasen elevados precios del crudo en fechas futuras.

Gráfica 2

Probabilidad neutral al riesgo de que los precios del petróleo superen los 45 dólares por barril

Chart 8o:
Risk neutral probability of oil prices greater than US\$45 per barrel implied from six-month options

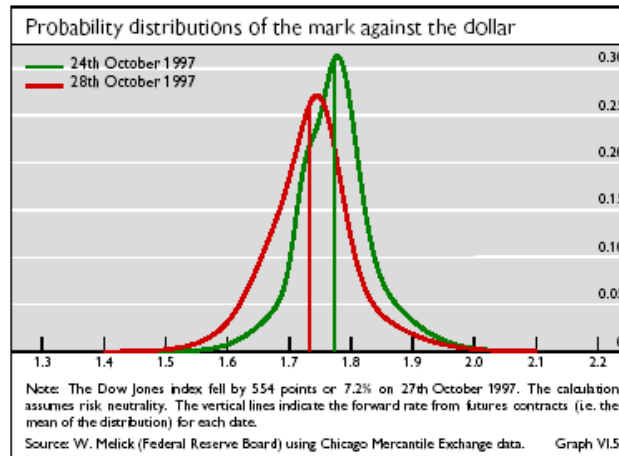


Source: Bank of England.

Otra institución que utiliza con frecuencia las funciones de probabilidad implícitas en los mercados de derivados es el Banco Internacional de Pagos (BIS), en particular, ha analizado las expectativas del mercado de diversos tipos de cambio. Por ejemplo, en su Reporte Anual #68 (BIS (1998)) presentó las expectativas del marco alemán frente al dólar ante la crisis asiática de finales de 1997 (Gráfica 3). En lo argumentado por el BIS respecto a la Gráfica 3 destaca la disminución de la media del marco/dólar. Es decir, el mercado esperaba en promedio una depreciación del dólar respecto al marco, lo cual se asociaba a la posibilidad de que la crisis asiática tuviera una mayor repercusión económica en Estados Unidos que en Europa. Asimismo, el desplazamiento de la cola izquierda de la distribución (sesgo negativo) confirma que los agentes le daban una mayor probabilidad a que se presentaran depreciaciones del dólar.

Gráfica 3

Distribución de probabilidad para el marco respecto al dólar

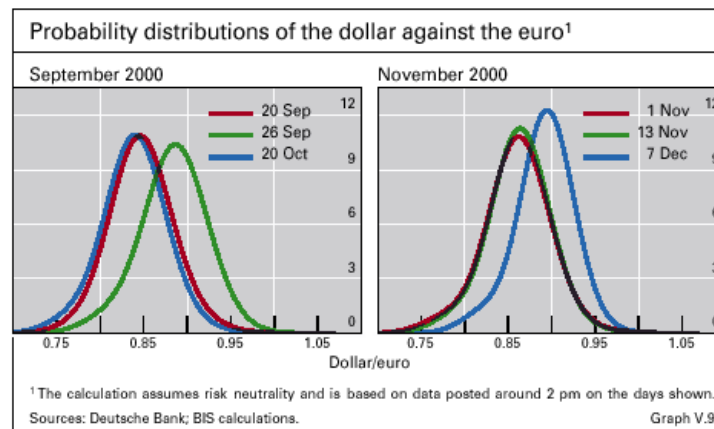


Fuente: BIS, Anual Report # 68 , pp. 102.

En otro ejemplo obtenido de las publicaciones del BIS (2001) se aprecia como las distribuciones de probabilidad permitieron concluir que la intervención cambiaria concertada por los países del G7 el 22 de septiembre de 2000 sólo tuvo un efecto transitorio sobre las distribuciones de probabilidad esperadas para el euro, frente al dólar (Gráfica 4). Lo anterior se aprecia por el desplazamiento temporal de las funciones de densidad.

Gráfica 4

Distribución de probabilidad del dólar respecto al euro



Fuente: BIS, Anual Report # 71 , pp. 90.

Finalmente, se presenta el sesgo de la distribución de probabilidad esperada para el dólar respecto al euro que publicó el Banco de Inglaterra en el Financial Stability Review de junio de 2002 (Bank of England (2002)). Así, la Gráfica 5 muestra como los precios de las opciones para la cotización dólar/euro en el segundo trimestre de 2002 tuvieron un importante incremento en la probabilidad de depreciación del dólar, en comparación con una apreciación de igual magnitud (sesgo).

Gráfica 5
Sesgo de la distribución de probabilidad esperada del dólar respecto al euro



Sources: Natwest Markets Exchange and Bank calculations.

(a) Skewness is derived from option prices and provides an indication of whether markets believe a large upward move (positive skew) is more likely than a large downward move (negative skew). A neutral skewness is zero.

(b) Dec. 2001 *Review*.

3. Metodologías para la Estimación de las Distribuciones de Probabilidad Implícitas en las Cotizaciones de Instrumentos Derivados

En general, la teoría de opciones ha buscado poder valuar el precio de diferentes instrumentos derivados a partir de los precios de los activos subyacentes y de ciertos supuestos sobre el proceso estocástico y la distribución de probabilidad seguida por éstos.

En este trabajo se pretende ir en dirección contraria, es decir, pasar de los precios observados de las opciones intercambiadas en el mercado a la distribución de probabilidad implícita para los precios de los activos subyacentes.

Existen diversas metodologías para estimar las funciones de densidad de los activos subyacentes a través de los precios de sus instrumentos financieros derivados. En particular, existen dos alternativas: a) la paramétrica, la cual requiere predefinir el tipo de distribución de probabilidad que sigue el precio del activo subyacente (lognormal, mezcla de lognormales, etc.) y posteriormente encontrar los parámetros correspondientes a dichas distribuciones que reflejen de la mejor manera posible los precios observados; o bien b) la no paramétrica, la cual a partir de los precios de los derivados construye la distribución de probabilidad para el activo subyacente sin suponer que ésta tiene una forma predefinida.

La presente sección tiene dos partes, en la primera se describe el método de mezcla de lognormales, el cual corresponde a la estimación paramétrica más utilizada. En la segunda sección se describe la interpolación de la curva *smile*, la cual es un método no paramétrico que ha sido empleado y recomendado en fechas recientes (ver Clews, Panigirtzoglou y Proudman, (2000)).

3.1 Método de mezcla de lognormales

Como ya se mencionó, el método de mezcla de lognormales se basa en la estimación paramétrica de la distribución de probabilidad que se presume corresponde a la variable en cuestión. La presente metodología ha sido utilizada por los bancos centrales de Inglaterra y de Canadá y se considera de gran utilidad para mercados o bolsas de derivados que intercambian opciones con una amplia gama de precios de ejercicio (Bahra (1996), (1997) y Mc Manus (1999)). Esta metodología considera que la distribución del precio de un activo subyacente se puede caracterizar como el resultado de mezclar dos distribuciones

lognormales⁶. Esto otorga gran flexibilidad a la estimación, ya que se pueden capturar una amplia gama de particularidades en los datos, como pueden ser marcados sesgos y kurtosis, así como una distribución bimodal (ver Melick y Thomas (1997) y Bahra (1997)). Por lo anterior, se utiliza como forma predeterminada de la función de probabilidad para el precio del activo subyacente, $q(S_T)$, a una combinación de lognormales:

$$q(S_T) = \theta L(S_T|\alpha_1, \beta_1) + (1 - \theta)L(S_T|\alpha_2, \beta_2) \quad (1)$$

$$\alpha_i = \ln S_i + \left(\mu_i - \frac{1}{2}\sigma_i^2\right)\tau$$

$$\beta_i = \sigma_i\sqrt{\tau}$$

donde $q(S_T)$ es la función de probabilidad del precio del activo subyacente S para una fecha futura T ; θ es el ponderador de las funciones, el cual se encuentra entre cero y uno; $L(S_i|\alpha_i, \beta_i)$ es la función de densidad lognormal para S_i con media y desviación estándar determinada por los parámetros α_i y β_i , respectivamente (i se refiere a la distribución lognormal correspondiente, ya sea ésta la 1 ó la 2); μ_i la media de la variación del precio del activo S_i (para la distribución lognormal i); σ_i la desviación estándar de la variación del precio del activo S_i (para la distribución lognormal i); y τ el tiempo por vencer de la opción, el cual coincide con el tiempo por transcurrir para llegar a la fecha para la cual se estima la distribución de probabilidad (T).

Así, la metodología consiste en encontrar los parámetros α_1 , α_2 , β_1 , β_2 y θ , que mejor se ajusten a los precios de las opciones referenciadas al activo subyacente (S_i). Para lograr lo anterior se necesita de una ecuación que permita relacionar los precios de las opciones con los parámetros de las funciones de densidad. Para ello es necesario suponer una función que permita valorar las opciones (calls y puts) y que a su vez contenga los parámetros buscados (α_1 , α_2 , β_1 , β_2 y θ ,). Esto se ilustra a partir de la fórmula para opciones

⁶ En la fórmula Black-Scholes para valorar opciones se asume que un proceso estocástico Browniano describe de manera adecuada el precio del activo subyacente, el cual se distribuye lognormalmente. Este supuesto no siempre es realista y puede ser inadecuado para describir los precios de algunos activos. En este sentido, las metodologías que se presentan en este documento son más flexibles, ya que las distribuciones de probabilidad que se obtienen pueden ser distintas a la lognormal.

propuesta por Cox - Ross (1976), en la que su precio debe ser igual al valor esperado de sus pagos⁷:

$$C(X, \tau) = e^{-r\tau} \int_x^{\infty} (S_T - X)q(S_T)dS_T \quad (2)$$

$$P(X, \tau) = e^{-r\tau} \int_{-\infty}^x (X - S_T)q(S_T)dS_T \quad (3)$$

donde X es el precio de ejercicio de la opción; S_T es el precio del activo subyacente en la fecha de vencimiento T ; τ es el tiempo en años que falta para el vencimiento de la opción; r es la tasa de interés libre de riesgo (compuesta de manera continua); y, $C(X, \tau)$ y $P(X, \tau)$ corresponden a los precios de los calls y de los puts para cada precio de ejercicio, X_i .

Las ecuaciones (2) y (3) son resueltas utilizando la fórmula de valuación de opciones propuesta por Black-Scholes (1973). Al combinarse con la ecuación (1), en donde $q(S_T)$ corresponde a una mezcla de lognormales se obtiene lo siguiente (Bahra (1997)):

$$C(X, \tau) = e^{-r\tau} \left\{ \theta \left[e^{\alpha_1 + \frac{1}{2}\beta_1^2} N(d1) - XN(d2) \right] + (1 - \theta) \left[e^{\alpha_2 + \frac{1}{2}\beta_2^2} N(d3) - XN(d4) \right] \right\} \quad (4)$$

$$P(X, \tau) = e^{-r\tau} \left\{ \theta \left[XN(-d2) - e^{\alpha_1 + \frac{1}{2}\beta_1^2} N(-d1) \right] + (1 - \theta) \left[XN(-d4) - e^{\alpha_2 + \frac{1}{2}\beta_2^2} N(-d3) \right] \right\} \quad (5)$$

$$d_1 = \frac{-\ln(X) + \alpha_1 + \beta_1^2}{\beta_1} \quad d_3 = \frac{-\ln(X) + \alpha_2 + \beta_2^2}{\beta_2}$$

$$d_2 = d_1 - \beta_1 \quad d_4 = d_2 - \beta_2$$

donde $N(\)$ corresponde a la función de probabilidad acumulada para la normal estándar.

⁷ Utilizando la tasa libre de riesgo para obtener el valor presente de los flujos. Esto se debe a que dicha fórmula puede ser utilizada para diferentes aversiones al riesgo, siendo la más sencilla de ellas la neutral al riesgo.

Una vez que se ha definido una forma funcional que permite valuar las opciones en función de los parámetros que se necesitan para construir la mezcla de lognormales, se procede a encontrar aquellos parámetros que minimicen las diferencias entre los precios determinados por las ecuaciones (4) y (5) respecto a los observados en el mercado (\hat{C}_i y \hat{P}_i). Esto se realiza respecto a cada opción con precio de ejercicio X_i . Adicionalmente, si se desea que la media de las distribuciones de probabilidad coincida con la implícita en las cotizaciones a futuro, se incluye un término que permite minimizar la diferencia al cuadrado entre la media de la distribución que se construye y la de los precios del futuro o forward⁸. Con base en lo anterior, la ecuación a partir de la cual se pretenden encontrar los parámetros α_1 , α_2 , β_1 , β_2 y θ , que permiten minimizar la diferencia entre los precios observados y los que se desprenderían de la función de densidad construida, es la siguiente:

$$\text{Min}_{\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \theta} \sum_{i=1}^n [C(X_i, \tau) - \hat{C}_i]^2 + \sum_{i=1}^n [P(X_i, \tau) - \hat{P}_i]^2 + \left[\theta e^{\alpha_1 + \frac{1}{2}\beta_1^2} + (1 - \theta) e^{\alpha_2 + \frac{1}{2}\beta_2^2} - F \right]^2 \quad (6)$$

donde F es el valor del futuro o forward del precio del activo subyacente.

Finalmente, al contar con los parámetros α_1 , α_2 , β_1 , β_2 y θ , se puede obtener la función de probabilidad del precio del activo subyacente a través de la ecuación (1). Esta metodología ofrecerá mejores resultados en la medida en que se cuente con precios de una amplia gama de opciones (call o put) con distintos precios de ejercicio.

3.2 Método de interpolación de la curva *smile*

El método de interpolación de la curva *smile* es una estimación no paramétrica de la distribución de probabilidad del precio del activo subyacente, el cual ha sido utilizado, entre otros, por el Banco Central de Inglaterra y el Fondo Monetario Internacional (ver

⁸ Al incluir este término la distribución de probabilidad obtenida es congruente con los precios de los futuros o forwards, con lo cual se evitan condiciones de arbitraje. No obstante, se puede perder información de utilidad, ya que la diferencia entre las medias puede contener información respecto al balance de riesgos que perciben los participantes en el mercado (ver sección 4.3).

Clews, Panigirtzoglou y Proudman, (2000) e IMF(2002)). Se recomienda utilizar esta metodología cuando no se tienen precios de opciones para una amplia gama de precios de ejercicio con el mismo plazo por vencer. Es común estar en este caso, ya que en los mercados de derivados de mayoreo, conocidos como “over the counter (OTC)”, sólo se cuenta con información para unos cuantos precios de ejercicio, por lo cual para construir las funciones de densidad para los activos subyacentes se necesitan métodos que permitan interpolar todo el rango de precios a partir de unos cuantos datos observados.

A diferencia del método de mezcla de lognormales, donde a partir de los precios de las opciones se encuentran los parámetros de la distribución de probabilidad que se supone para el precio del activo subyacente, en esta metodología la función de probabilidad $q(S_T)$, se encuentra a partir de la propiedad encontrada por Breeden y Litzenberger (1978) en la cual dicha función de probabilidad depende de la segunda derivada parcial de la función del precio del call, $C(X, \tau)$, con respecto a los diferentes precios de ejercicio (X):

$$\frac{\partial^2 C(X, \tau)}{\partial X^2} = e^{-r\tau} q(S_T) \quad (7)$$

Así, de la ecuación (7) se puede despejar $q(S_T)$:

$$q(S_T) = \frac{\partial^2 C(X, \tau)}{\partial X^2} e^{r\tau} \quad (8)$$

Sin embargo, debido a que la función de precios del call es continua para el rango de precios de ejercicio, en principio se necesitarían precios de opciones para un rango prácticamente continuo de precios de ejercicio para poder construir la función de densidad. Estos precios no están disponibles, por lo que a partir de unos cuantos precios observados, se requiere interpolar una combinación casi continua de precios de las opciones y de precios de ejercicio. El método utilizado en el presente trabajo para la interpolación de los precios será el propuesto por Malz (1997), el cual desarrolla una idea propuesta inicialmente por Shmiko (1993).

Es importante señalar que los precios de las opciones en los mercados de mayoreo (OTC) suelen cotizarse en términos de la volatilidad implícita⁹, la cual puede ser diferente dependiendo de los precios de ejercicio. Por ejemplo, en opciones de tipo de cambio la volatilidad implícita a la cual se venden opciones con precios de ejercicio cercanos a la cotización forward (conocidas como opciones con precio de ejercicio “at the money forward (atm)”) suelen ser inferiores a las volatilidades de aquellas opciones con precios de ejercicio muy superiores o inferiores. Este fenómeno da lugar a la conocida curva *smile* que relaciona las volatilidades implícitas en las opciones para diferentes rangos de precios de ejercicio. Cabe destacar que es común que las cotizaciones de los precios de las opciones se hagan en términos de la delta de la opción, la cual corresponde a la primera parcial del precio de la opción respecto al precio del activo subyacente. Esta última tiene una relación monótonica inversa respecto al precio de ejercicio. Utilizando la fórmula Black-Scholes para el caso de una opción de compra (call) sobre tipos de cambio, la delta está expresada por la siguiente ecuación:

$$\delta = e^{-r^*\tau} * N\left(\frac{\ln\left(\frac{F_t}{X}\right) + \left(\frac{\sigma^2}{2}\right)\tau}{\sigma\sqrt{\tau}}\right) \quad (9)$$

donde X es el precio de ejercicio de la opción; F_t es el valor del futuro o forward del subyacente en la fecha t ; τ es el número de años para el vencimiento de la opción; r^* es la tasa de interés externa libre de riesgo compuesta de manera continua; y, σ es la volatilidad del precio del activo subyacente.

La metodología propuesta por Malz (1997) tiene dos pasos: a) se necesita contar con una función que combine las volatilidades implícitas respecto a las deltas (algunas observaciones se obtienen directamente de las cotizaciones de opciones) y a partir de ésta obtener una función que relacione las volatilidades implícitas en términos de los precios de ejercicio; y b) se debe pasar de esta última función a una que asocie los precios de las

⁹ La volatilidad implícita se despeja de la fórmula Black-Scholes manteniendo todas las variables que se utilizan para la valuación de opciones constantes, incluyendo el precio de dicha opción.

opciones respecto a los precios de ejercicio, ya que a partir de esta última función se puede aplicar lo encontrado por Breeden y Litzenberger (1978) para obtener la función de densidad (ver ecuación (7)). A continuación estos pasos son explicados con mayor detalle.

Algunos de los instrumentos con opciones con precios de ejercicio distintos al precio forward que se intercambian con mayor frecuencia en los mercados de mayoreo (OTC) son:

1.- *Strangle (str)*: es el resultado de combinar una posición en un call con un precio de ejercicio superior a la cotización forward y en un put con un precio de ejercicio inferior a dicha cotización, ambas opciones con una misma delta. Esto implica que el precio de ejercicio de ambas opciones tiene una distancia similar al forward. Este instrumento se cotiza como la volatilidad promedio de dichas opciones menos la volatilidad de la opción con precio de ejercicio igual al forward (atm). Así, por ejemplo, un “strangle 25delta” corresponde a la volatilidad implícita promedio de un call .25 delta y un put .25 delta, menos la volatilidad implícita de opciones con precio de ejercicio igual al forward. Este portafolio de opciones registra pagos cuando al vencimiento el precio del activo subyacente muestra un alza importante, o bien cuando dicho precio disminuye sustancialmente. Por ello, estos precios dan mucha información sobre las colas de la distribución de probabilidad que los agentes esperan para determinado activo subyacente (kurtosis).

2.- *Risk reversal (rr)*: es la combinación de una posición larga en una opción call con precio de ejercicio superior al forward y una posición corta en un put con un precio de ejercicio inferior, ambas opciones con la misma delta. Se cotiza como la resta de la volatilidad implícita en el call menos la correspondiente al put. Este portafolio de opciones reportará ingresos significativos cuando el precio del activo subyacente tenga alzas considerables. Así, el patrón de pagos tendrá beneficios dependiendo del sesgo de la distribución de probabilidad que tenga el activo subyacente. Por tanto, su comportamiento es determinante para conocer el sesgo que anticipa el mercado para determinado activo subyacente.

Es importante señalar que el strangle y el risk reversal suelen cotizarse para deltas de .25 ó .15 por lo cual pueden involucrar opciones con precios de ejercicio lejanos a la cotización

forward. Esto permite que a partir de sus precios, se obtenga mucha información sobre la curva *smile*.

La interpolación de la curva *smile* se escoge de tal forma que pase lo más cerca posible a las cotizaciones observadas para las opciones (en el plano volatilidad implícita y delta - ello se ilustra en la Gráfica 8a -). Estas cotizaciones se realizan en términos de las volatilidades implícitas determinadas por el mercado: volatilidad respecto al forward (*atm*), risk reversal (*rr*) y strangle (*str*). Al incorporar dichas volatilidades directamente y aplicarlas a una función cuadrática, se obtiene la siguiente curva de volatilidades *smile* (ver Malz (1997)):

$$\sigma(\delta) = atm - 2rr(\delta - 0.5) + 16str(\delta - 0.5)^2 \quad (10)$$

donde *atm* corresponde a la volatilidad implícita de las opciones con precio de ejercicio igual al forward; *rr* es la cotización del risk-reversal en términos de volatilidad implícita; y *str* es el precio de un strangle en términos de volatilidad.

Una vez que se tienen las volatilidades implícitas del mercado en función de las deltas $\sigma(\delta)$, se tiene que encontrar la volatilidad implícita que le corresponde a cada precio de ejercicio. Es decir, se tiene que hacer una transformación en donde la volatilidad implícita esté expresada en términos del precio de ejercicio (X) y no en términos de delta (δ). Sin embargo, como la delta está determinada en términos de la volatilidad implícita (ver ecuación (9)), se sustituye la ecuación (9) en la (10) y se resuelve numéricamente para la volatilidad implícita σ como función del precio de ejercicio X de la siguiente ecuación:

$$atm - 2rr \left[\left(e^{-r*\tau} * N \left(\frac{\ln\left(\frac{F}{X}\right) + \left(\frac{\sigma^2}{2}\right)\tau}{\sigma\sqrt{\tau}} \right) \right) - 0.5 \right] + 16str \left[\left(e^{-r*\tau} * N \left(\frac{\ln\left(\frac{F}{X}\right) + \left(\frac{\sigma^2}{2}\right)\tau}{\sigma\sqrt{\tau}} \right) \right) - 0.5 \right]^2 - \sigma = 0 \quad (11)$$

Una vez que se obtiene la curva *smile* en función de los precios de ejercicio (ver Gráfica 8b), la etapa final consiste en calcular la función de precios para el call, sustituyendo las volatilidades encontradas en la ecuación (11), y que dependen del precio de ejercicio (X).

Esto da por resultado una fórmula Black-Scholes general en la que la volatilidad depende del precio de ejercicio. Para calcular la función de densidad para el activo subyacente se utiliza el resultado encontrado por Breeden y Litzenberger (ecuación (8)), el cual relaciona dicha función de densidad con la segunda derivada respecto al precio de ejercicio de la mencionada función general para valorar opciones tipo call. Al realizar dicha parcial se tiene:

$$\frac{\partial^2 C(X, \tau)}{\partial X^2} = F\left(\frac{n(d_1)}{X^2 v \sqrt{\tau}}\right) + n(d_1) d_1 \left(\frac{1}{X v \sqrt{\tau}}\right)^2 - x \left(\frac{n(d_2)}{X^2 v \sqrt{\tau}}\right) + n(d_2) d_2 \left(\frac{1}{X v \sqrt{\tau}}\right)^2 \quad (12)$$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{F}{X}\right) + (\sigma^2/2)\tau}{v\sqrt{\tau}}$$

$$d_2 = \frac{\ln\left(\frac{F}{X}\right) - (\sigma^2/2)\tau}{v\sqrt{\tau}}$$

donde v es la volatilidad implícita que corresponde a cada precio de ejercicio X ; y, $n(\cdot)$ es la función de densidad normal y el resto de las variables ya han sido definidas.

Finalmente, sustituyendo el resultado de la ecuación (12) en la (8), se obtiene la función de probabilidad del precio del activo subyacente:

$$q(S_T) = e^{r\tau} \left[F\left(\frac{n(d_1)}{X^2 v \sqrt{\tau}}\right) + n(d_1) d_1 \left(\frac{1}{X v \sqrt{\tau}}\right)^2 - X \left(\frac{n(d_2)}{X^2 v \sqrt{\tau}}\right) + n(d_2) d_2 \left(\frac{1}{X v \sqrt{\tau}}\right)^2 \right] \quad (13)$$

donde X es el precio de ejercicio del activo subyacente, al utilizar diferentes valores de X se obtiene la función de densidad.

Es importante destacar que cuando el risk reversal y el strangle son cero, en las ecuaciones (10) y (11) se tiene que la curva *smile* es una línea horizontal, con lo cual a partir de la ecuación (13) se obtiene que el precio del activo subyacente tiene una distribución lognormal con media igual al precio forward. Esto muestra que a diferencia del método

paramétrico, en la interpolación de la curva *smile* la media de la distribución que se estima no necesariamente coincide con la cotización forward. Es en este sentido en el que no se puede asegurar que la distribución de probabilidad obtenida excluya oportunidades de arbitraje. Lo anterior refleja que la media de la distribución de probabilidad estimada no debe ser considerada como el verdadero valor esperado del precio del activo subyacente, sino más bien como un resultado que refleja las desviaciones que el mercado anticipa respecto a los supuestos de lognormalidad implícitos en la fórmula Black-Scholes. No obstante esto puede ser de gran utilidad para conocer una aproximación a la prima de riesgo implícita en los risk reversals y strangles (sobre este tema se profundizará en la sección 4.3.).

3.3 Reflexiones en cuanto la conveniencia de utilizar la mezcla de lognormales o la interpolación de la curva *smile*

En cuanto a qué método proporciona un mejor ajuste, la evidencia es inconclusa. Por un lado Bliss y Panigirtzoglou (2000) elaboraron distribuciones de probabilidad para la cotización de la libra esterlina y el índice accionario FTSE 100 y concluyen que el método de interpolación de la curva *smile* propuesto por Malz (1997) es el más adecuado para las pruebas que realizaron. Por otro lado, McManus (1999) comparó diversos métodos paramétricos y no paramétricos; y concluye que el más recomendable es la mezcla de lognormales. Cabe señalar que el presente trabajo no pretende encontrar o concluir que método es más adecuado, ya que en ocasiones, por la escasez de información no se pueden aplicar ambas metodologías.

4. Análisis del Balance de Riesgos Implícito en las Distribuciones de Probabilidad que se Construyen a partir de las Cotizaciones de los Instrumentos Derivados

En esta sección se presentan diferentes aplicaciones de las metodologías descritas para estimar la función de probabilidad esperada neutral al riesgo para un determinado activo,

mercancía, moneda o índice accionario a partir de las cotizaciones de sus instrumentos derivados, especialmente opciones.

4.1 Estimación de las distribuciones de probabilidad implícitas en las opciones sobre los futuros del precio del petróleo.

En la presente sección se utiliza el método de la mezcla de lognormales (sección 3.1) para analizar el balance de riesgos incorporado en los precios de las opciones sobre futuros referidos a la mezcla de petróleo West Texas Intermediate (WTI).¹⁰ Es importante señalar que, si bien los precios de las opciones utilizadas son americanas, en las estimaciones realizadas se supone que son europeas, lo cual podría inducir una ligera sobrestimación de la volatilidad de la distribución de probabilidad estimada. Esto se debe a que las opciones americanas ofrecen la posibilidad de ser ejercidas antes del vencimiento. Esto suele incrementar el valor de dicha opción, lo cual da lugar a una mayor volatilidad implícita. Adicionalmente, para hacer congruentes las distribuciones de probabilidad estimadas con la curva de futuros, se incluyó en la minimización el término que penaliza la diferencia entre la media de la distribución y los futuros correspondientes (ecuación 6).

A continuación se presentan las distribuciones de probabilidad esperadas obtenidas para los meses cercanos al conflicto armado en Irak (primer semestre de 2003). Para poder evaluar como fue cambiando el balance de riesgos en el mercado petrolero, se realizaron diversos ejercicios. Así, la Gráfica 6a presenta las distribuciones de probabilidad esperadas para la mezcla WTI a mediados de enero, a partir de las cuales se pueden obtener los diferentes precios que alcanzaría el petróleo bajo diferentes niveles de confianza, por ejemplo, con un +/- 20 por ciento alrededor de la media. Esto último se presenta en la Gráfica 6b, la cual también incluye la curva de futuros para los siguientes 10 meses, así como la mediana

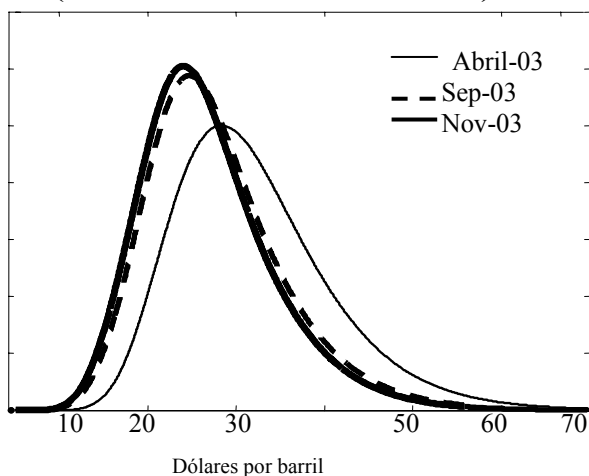
¹⁰ Se utilizan los futuros y opciones sobre futuros para la mezcla WTI cotizada en el New York Mercantile Exchange. Para esta estimación se necesitan utilizar las fórmulas para valorar opciones sobre futuros y ajustar algunos plazos, ya que al vencimiento de la opción se tiene derecho a comprar o vender, según sea el caso, un futuro que mantiene un plazo por vencer de aproximadamente un mes. Así, los plazos incluidos en las ecuaciones 4, 5 y 6 son ajustados para que las distribuciones de probabilidad calculadas reflejen la expectativa del precio de contado de la mezcla WTI al vencimiento de la opción.

correspondiente a cada función de probabilidad. Los estadísticos correspondientes se incluyen en el Cuadro 1.

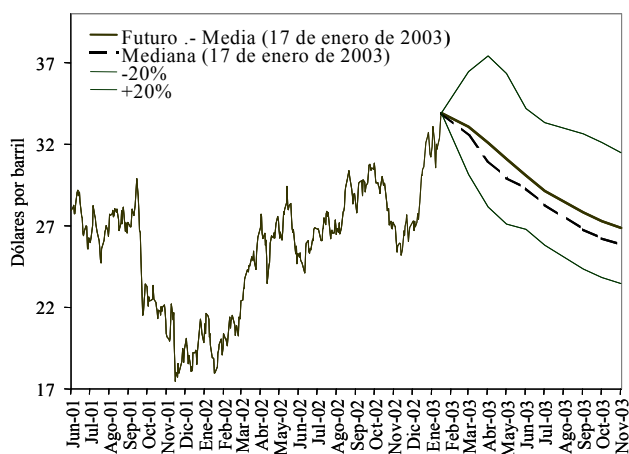
De noviembre de 2002 a principios de 2003 se presentó un incremento sustancial en los precios del petróleo (Gráfica 6b). No obstante, a mediados de enero el mercado no anticipaba que dichos precios se mantuvieran en los meses siguientes, ya que la curva de futuros tenía una marcada pendiente negativa. En adición a lo anterior, al contar con las distribuciones de probabilidad estimadas se puede apreciar la incertidumbre y sesgo que en esas fechas se asociaba a los precios futuros del petróleo ante un posible ataque de los Estados Unidos a Irak. Así, en enero se anticipaba una elevada probabilidad de que los precios del crudo registraran aumentos considerables en marzo, abril y mayo, lo cual se observa por el ensanchamiento del intervalo de confianza en esas fechas, especialmente al alza. Esto también se aprecia en el Cuadro 2, ya que las funciones de densidad esperadas para marzo, abril y mayo incorporaban precios para la mezcla de petróleo WTI superiores a los 40 dólares por barril con una probabilidad de 12.6, 17.2 y 14.9 por ciento. Adicionalmente, para la segunda mitad del año los escenarios de precios del crudo superiores a 40 dólares por barril tenían una menor probabilidad (7.7, 7.6, 6.9, y 6 por ciento respectivamente para julio, septiembre, octubre y noviembre). Esto se debe, fundamentalmente, a que se anticipaban menores precios a futuro y volatilidad implícita.

Gráfica 6

6.a) Distribución de probabilidad esperada para el precio de petróleo WTI (valuada al 17 de enero de 2003)



6.b) Precio observado y esperado del petróleo (WTI) al 17 de enero de 2003



Cuadro 1

Resumen estadístico de las distribuciones de probabilidad esperadas para el precio del petróleo WTI al 17 de enero de 2003

	30-Mar-03	30-Abr-03	30-May-03	30-Jun-03	30-Jul-03	30-Sep-03	05-Ene-00	30-Nov-03
Precio Spot (dpb)	33.910	33.910	33.910	33.910	33.910	33.910	5.100	33.910
Media* (dpb)	33.058	32.091	31.099	30.065	29.131	27.822	5.150	26.869
Mediana (dpb)	32.52	30.97	29.93	29.28	28.30	26.77	5.20	25.84
Volatilidad Implícita	49.02%	46.45%	41.73%	38.20%	34.87%	32.65%	525.00%	30.19%
Coefficiente Variación	18.248%	27.554%	28.302%	23.496%	24.710%	28.452%	530.000%	28.504%
Sesgo	0.5561	0.8112	0.8077	0.7440	0.7931	0.9355	5.3500	0.9252
Kurtosis	3.5443	3.8206	3.8607	3.9443	4.0780	4.4317	5.4000	4.4595

Cuadro 2

Probabilidad de que el precio del petróleo WTI sea igual o mayor a la cantidad determinada (evaluada al 17 de enero de 2003)

Dólares por barril	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Septiembre	Octubre	Noviembre
10	1.000000	0.999989	0.999964	0.999998	0.999991	0.999727	0.999559	0.999563
15	0.999991	0.996809	0.993611	0.998137	0.995840	0.981265	0.975716	0.973907
20	0.996434	0.948026	0.925406	0.951316	0.924836	0.858748	0.837932	0.826919
25	0.927085	0.780916	0.737280	0.752230	0.693328	0.594308	0.563748	0.545002
30	0.672004	0.537398	0.492174	0.454810	0.400827	0.330759	0.306629	0.288246
35	0.342143	0.319556	0.284897	0.218294	0.188630	0.163983	0.150516	0.136550
40	0.126358	0.171834	0.149280	0.089078	0.077425	0.076339	0.069777	0.060554
45	0.036479	0.086444	0.073309	0.032648	0.029227	0.033961	0.030982	0.025584
50	0.008820	0.041595	0.034590	0.011152	0.010510	0.014630	0.013354	0.010474
55	0.001884	0.019424	0.015950	0.003639	0.003680	0.006179	0.005657	0.004213
60	0.000370	0.008892	0.007269	0.001153	0.001272	0.002584	0.002378	0.001682

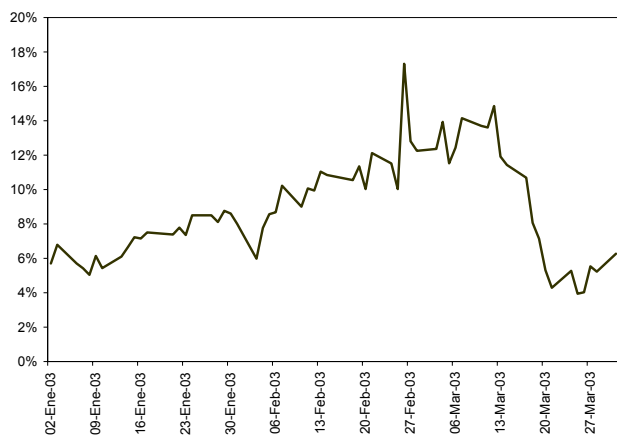
La Gráfica 6 y los Cuadros 1 y 2 permiten conocer el balance de riesgos que el mercado esperaba a mediados de enero del 2003 para los precios del petróleo en el corto y mediano plazo, el cual, como ya se mencionó, estaba afectado por los eventos relacionados con el conflicto entre Estados Unidos e Irak. Al repetir este ejercicio a lo largo del primer trimestre del 2003 se puede apreciar la percepción del mercado petrolero antes y durante el conflicto bélico en el Golfo Pérsico. Esto se puede ilustrar a través de la probabilidad de que la mezcla de crudo WTI superase los 40 dólares por barril en los próximos 6 meses (Gráfica 7a).

Adicionalmente la Gráfica 7b presenta, para diferentes fechas, la probabilidad de que la mezcla WTI supere los 40 dólares de marzo a diciembre de 2003. De ella se aprecia que a mediados de enero se anticipaba que los precios del petróleo podrían tener un alza considerable pero de corta duración (durante marzo, abril y mayo). Para mediados de febrero y principios de marzo predominaba la incertidumbre asociada a la posición que la Organización de Naciones Unidas (ONU) asumiría respecto a la incursión bélica en Irak planteada por los Estados Unidos y el Reino Unido, lo cual dio lugar a que el mercado asignara un sesgo al alza en los precios del crudo más pronunciado y duradero. No obstante, la decisión de los Estados Unidos y el Reino Unido de continuar con su ofensiva militar sin contar con una segunda resolución de la ONU y ante el ultimátum impuesto a Saddam Hussein, el precio del crudo cayó sensiblemente, así como la probabilidad de que se registraran alzas considerables a lo largo de dicho año. Esto se aprecia en los datos del mercado petrolero recabados el 18 de marzo (Gráfica 7b). Lo anterior se debe a la percepción de que la campaña militar sería corta, lo cual se reforzó hacia finales de marzo, cuando los principales pozos petroleros de Irak pasaron a manos del ejército estadounidense y británico.

Gráfica 7

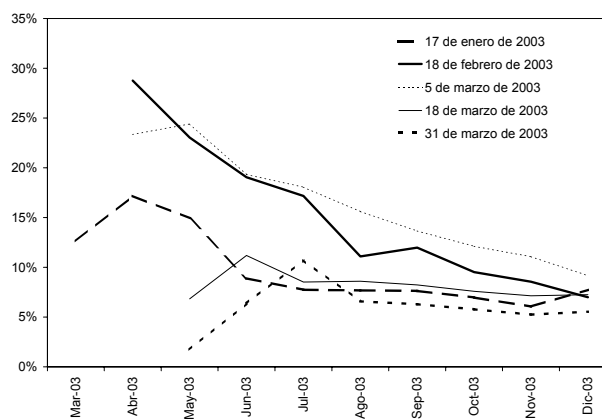
Probabilidad de que el precio de petróleo WTI rebase los 40 dólares por barril

7.a) En los próximos 6 meses



* / Determinados con base en los precios de las opciones sobre los futuros de la mezcla WTI y las distribuciones de probabilidad esperada neutrales al riesgo a seis meses que a partir de ellas se pueda estimar.

7.b) Para cada fecha correspondiente



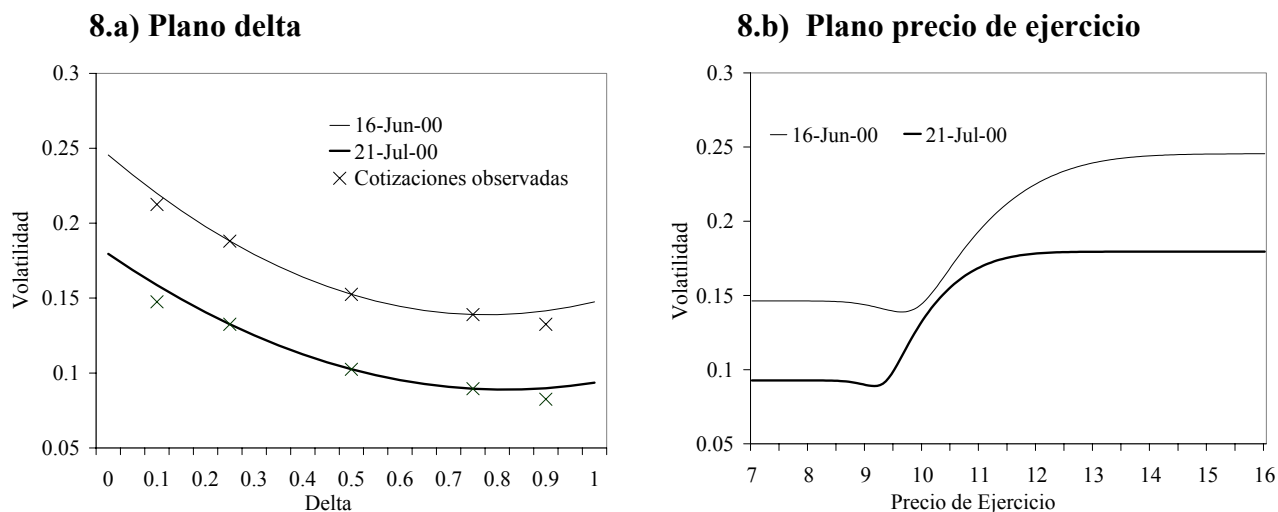
* / Determinados con base en los precios de las opciones sobre los futuros de la mezcla WTI y las distribuciones de probabilidad esperada neutrales al riesgo que a partir de ellas se pueda estimar.

4.2 Estimación de las distribuciones de probabilidad implícitas en las opciones sobre el tipo de cambio (peso / dólar).

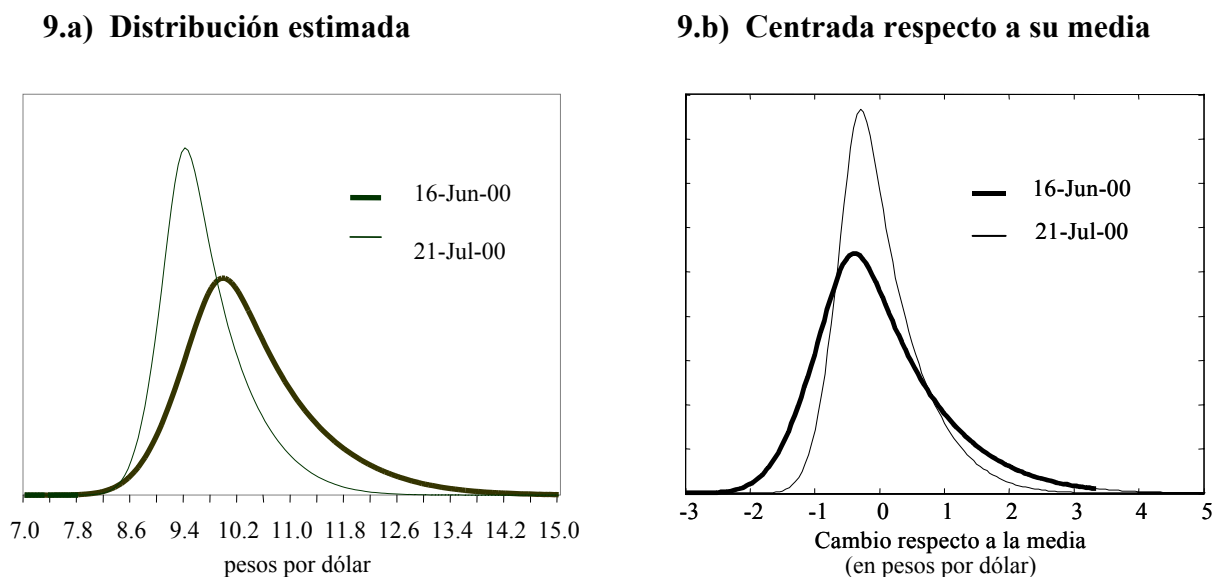
Es esta sección se estima la distribución de probabilidad esperada neutral al riesgo para la cotización del tipo de cambio (peso/dólar) a partir de los contratos de opciones intercambiados en mercados de mayoreo (OTC) a través de la interpolación de la función *smile*, de acuerdo a lo descrito en la sección 3.2. Para evaluar la utilidad de estos ejercicios como herramienta para identificar el balance de riesgos que los participantes del mercado anticipan se escogieron tres episodios: a) las elecciones presidenciales del 2000 en México; b) los ataques terroristas del 11 de septiembre de 2001; y, c) del 2 de abril al 3 de julio de 2002, periodo de tres meses en el que se registró una depreciación superior al 10 por ciento. Este último periodo sólo pretende ilustrar el comportamiento de las distribuciones de probabilidad en un episodio en el cual el tipo de cambio experimentó una depreciación no asociada a un evento particular (como los correspondientes a los periodos a y b).

En la Gráfica 8a se presentan las cotizaciones observadas de las opciones sobre el tipo de cambio (peso/dólar) a tres meses, para una fecha anterior y otra posterior a las elecciones presidenciales del 2000 (16 de junio y 21 de julio), así como sus correspondientes funciones cuadráticas en el plano delta (aplicación de la ecuación 10). Lo siguiente es pasar del plano que combina volatilidades y deltas a uno de volatilidades y precios de ejercicio (Gráfica 8b), para lo cual se utiliza la ecuación (11). A partir de este resultado se puede obtener la función de probabilidad esperada para el tipo de cambio (ecuación 13, ver Gráfica 9 y Cuadro 3).

Gráfica 8
Curva “smile”



Gráfica 9
Distribución de probabilidad esperada del tipo de cambio a 3 meses



Antes de las elecciones presidenciales del 2 de julio de 2000 el tipo de cambio se mantenía depreciado y su cotización a futuro era incierta. La conducción de las elecciones y las reacciones de los candidatos dieron lugar a que se disipara la incertidumbre respecto al desempeño de los mercados. Esto se reflejó en una apreciación del tipo de cambio y una menor volatilidad en su distribución de probabilidad esperada para los siguientes 3 meses,

con lo cual se reducía sensiblemente la probabilidad de que el peso registrara depreciaciones significativas (Gráfica 9 y Cuadro 3).

Cuadro 3

Resumen estadístico de las distribuciones de probabilidad esperadas del tipo de cambio a 3 meses (pesos/dólar)

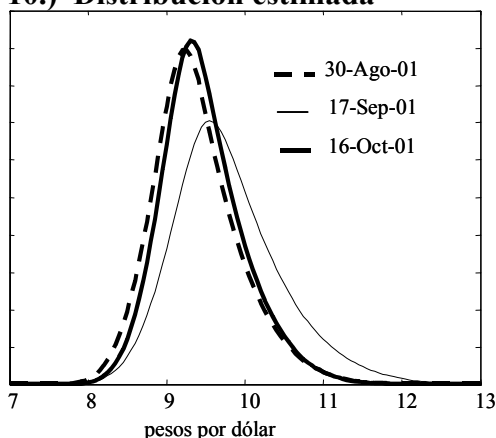
	16-Jun-00	21-Jul-00
Precio Spot	9.92	9.35
Forward	10.16	9.53
Volatilidad ATM	15.25%	10.25%
Risk Reversal	4.90%	4.30%
Strangle	1.10%	0.85%
Media	10.36	9.70
Mediana	10.07	9.46
Coefficiente de Variación	9.53%	6.62%
Sesgo	0.93	0.99
Kurtosis	4.47	4.49

A continuación se presenta el cambio de las expectativas del mercado cambiario ante los ataques terroristas del 11 de septiembre de 2001. La Gráfica 10 presenta la distribución de probabilidad esperada en los siguientes tres meses para el tipo de cambio (peso/dólar) en una fecha anterior, cercana y posterior a los referidos ataques terroristas. Cabe señalar que unos días después del 11 de septiembre, el peso se depreció sensiblemente, su cotización a futuro se tornó más incierta y se anticipaba un mayor sesgo a la depreciación, sin embargo, hacia mediados de octubre las expectativas fueron más favorables, reflejándose en una apreciación del tipo de cambio y una menor volatilidad y sesgo a la depreciación (Gráfica 10 y Cuadro 4). Así, para el 16 de octubre las condiciones en el mercado cambiario ya eran muy similares a las prevalecientes antes de los referidos ataques (ver: Banco de México, Informe Anual 2001, páginas 112 y 113).

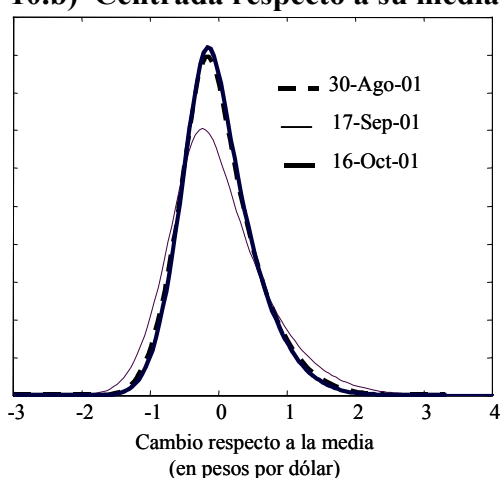
Gráfica 10

Distribución de probabilidad esperada del tipo de cambio a 3 meses

10.) Distribución estimada



10.b) Centrada respecto a su media



Cuadro 4

Resumen estadístico de las distribuciones de probabilidad esperadas del tipo de cambio (pesos/dólar)

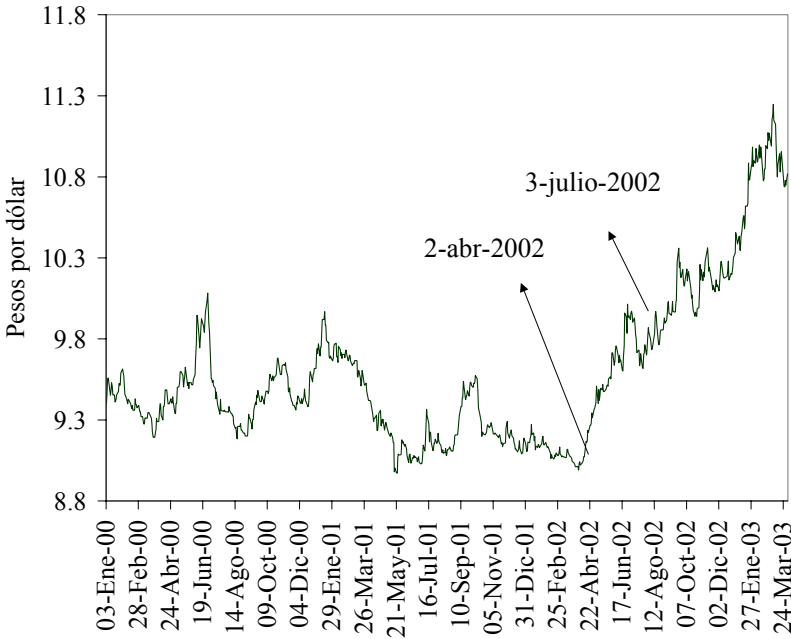
	30-Ago-01			17-Sep-01			16-Oct-01		
	3 meses	6 meses	12 meses	3 meses	6 meses	12 meses	3 meses	6 meses	12 meses
Precio Spot	9.17	9.17	9.17	9.45	9.45	9.45	9.24	9.24	9.24
Forward	9.31	9.46	9.88	9.67	9.91	10.40	9.39	9.61	10.05
Volatilidad ATM	9.45%	10.40%	11.50%	12.08%	12.48%	12.75%	9.45%	10.33%	11.45%
Risk Reversal	2.01%	2.58%	3.15%	2.83%	3.18%	3.60%	2.00%	2.55%	3.15%
Strangle	0.60%	0.61%	0.62%	0.61%	0.64%	0.65%	0.58%	0.60%	0.63%
Media	9.38	9.60	10.06	9.78	10.09	10.69	9.46	9.75	10.30
Mediana	9.28	9.39	9.77	9.63	9.76	10.34	9.36	9.53	9.99
Coefficiente de Variación	6.00%	9.32%	14.43%	7.07%	10.41%	14.99%	5.66%	8.74%	13.69%
Sesgo	0.62	0.77	0.96	0.69	0.84	0.95	0.60	0.77	0.97
Kurtosis	3.81	4.15	4.59	3.86	4.24	4.28	3.73	4.08	4.50

Finalmente, el tercer periodo de estudio corresponde a un episodio en el que se presentó una depreciación significativa del tipo de cambio, pasando de niveles de 9 pesos por dólar a principios de abril de 2002 a una cotización cercana a los 10 pesos a principios de julio del mismo año (Gráfica 11). Cabe señalar que la función de densidad esperada para el tipo de cambio el 2 de abril descontaba con tan sólo el 5 por ciento de probabilidad que se presentaran cotizaciones del tipo de cambio iguales o superiores a 10 pesos por dólar para principios de julio. No obstante, para el 3 de julio el tipo de cambio había alcanzado los 9.97 pesos por dólar. Esto refleja que las depreciaciones del peso pueden ser imprevisibles y de una cuantía importante, por ello, no sorprende que los mercados de opciones

usualmente incorporen un sesgo positivo en la distribución de probabilidad esperada para el peso. Adicionalmente, las distribuciones de probabilidad correspondientes al 2 de abril y 3 de julio del 2002 muestran que a pesar de que en tres meses el tipo de cambio se había depreciado más de 10 por ciento, su cotización esperada para los siguientes 3 meses aún mantenía una elevada incertidumbre y un mercado sesgo a registrar subsecuentes depreciaciones (Gráfica 12 y Cuadro 5).

Esta información también complementa el análisis del mercado de dinero, ya que los riesgos que enfrenta la cotización de la moneda nacional se reflejan de manera inmediata en las tasas de interés internas. En el último renglón de los Cuadros 3, 4 y 5 se presenta una aproximación de la prima de riesgo que descuentan los inversionistas por mantener inversiones denominadas en pesos, ya que su cotización está expuesta a sesgos a la depreciación, es decir, mayor probabilidad de eventos extremos. En la siguiente sección se abordará en detalle la metodología utilizada para estimar dichas primas de riesgo.

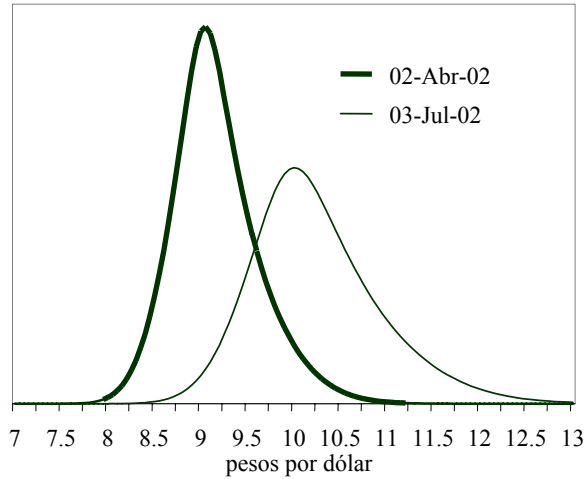
Gráfica 11
Cotización del tipo de cambio spot 48 hrs.



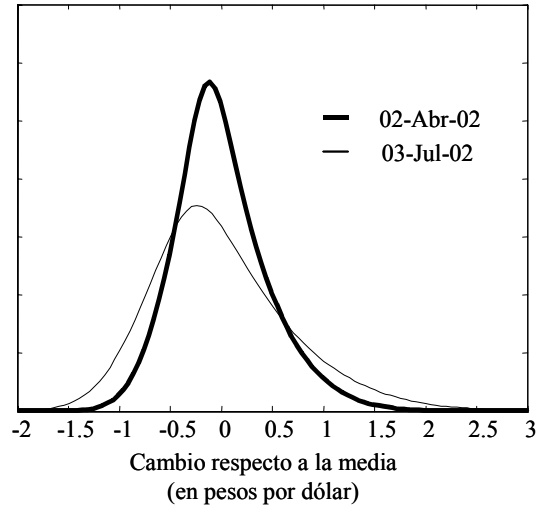
Gráfica 12

Distribución de probabilidad esperada del tipo de cambio a 3 meses

12.a) Distribución estimada



12.b) Centrada respecto a su media



Cuadro 5

Resumen estadístico de las distribuciones de probabilidad esperadas del tipo de cambio (pesos/dólar)

	02-Abr-02	03-Jul-02
Precio Spot	9.00	9.97
Forward	9.10	10.13
Volatilidad ATM	7.90%	11.50%
Risk Reversal	2.55%	3.29%
Strangle	0.87%	0.75%
Media	9.16	10.24
Mediana	9.08	10.08
Coefficiente de Variación	5.06%	6.76%
Sesgo	0.59	0.70
Kurtosis	3.81	3.87

4.3 Una estimación de la prima de riesgo cambiario a través de las distribuciones de probabilidad implícitas en las opciones sobre el tipo de cambio (peso/dólar).

Uno de los temas que mayor atención ha recibido en la literatura económica y financiera ha sido el análisis de los tipos de cambios y la posible presencia de una prima de riesgo. Al respecto, es común asumir que existe perfecta movilidad de capitales, lo cual implica que los portafolios con instrumentos de deuda denominados en moneda doméstica y externa son ajustados de manera instantánea. Si adicionalmente se supone que no existe riesgo de crédito, ni posibilidad de que se impongan controles de capital, se tiene lo que se conoce como paridad cubierta de tasas de interés. En este caso, la tasa de interés en moneda doméstica es igual a la tasa externa más una prima forward sobre el tipo de cambio (que incluye la expectativa de depreciación y una posible prima de riesgo cambiario). A su vez, si se asume que existe perfecta sustitución entre los instrumentos de deuda domésticos y externos¹¹, se tiene el caso de la paridad descubierta de tasas de interés. En este caso, la tasa de interés doméstica es igual a la tasa de interés externa más la expectativa de depreciación (ver Frenkel (1995)).

Con base en la discusión anterior, para esta sección se asume perfecta movilidad de capitales, mercados completos, ausencia de riesgo de crédito y que los instrumentos internos no son perfectos sustitutos de los externos. Por tanto, las tasas de interés internas o en moneda nacional (pesos) deben ofrecer un rendimiento similar al que se podría esperar en moneda extranjera más una prima que compense al inversionista por el mayor riesgo al que está expuesto por mantener activos denominados en pesos. Ello debido a que la cotización del peso tiene mayor volatilidad y enfrenta el riesgo de un mayor sesgo a la depreciación. Así, el rendimiento que debe ofrecer una inversión en pesos se puede expresar de la siguiente manera:

¹¹ Esto implica que los inversionistas están indiferentes en cuanto a la composición de sus portafolios si el rendimiento esperado entre los instrumentos domésticos y externos es igual (en términos de cualquiera de ambas monedas).

$$i_{t,T} = i_{t,T}^* + E_t(dep_{t,T}) + \varphi_{t,T} \quad (14)$$

donde $i_{t,T}$ es la tasa de interés interna (pesos) compuesta de manera continua determinada en t y efectiva para el periodo comprendido entre t y T ; $i_{t,T}^*$ la tasa de interés externa (dólares) compuesta de manera continua determinada en t y efectiva para el periodo comprendido entre t y T ; $E_t(dep_{t,T})$ la expectativa de depreciación (del peso) determinada en t y efectiva para el periodo comprendido entre t y T ; $\varphi_{t,T}$ la prima de riesgo cambiario determinada en t y efectiva para el periodo comprendido entre t y T .

Cabe recordar la determinación de los tipos de cambio forward (ver Hull (1997)):

$$F_{t,T} = S_t e^{(i^* - i)T-t} \quad (15)$$

donde $F_{t,T}$ es el tipo de cambio forward para el periodo T , siendo éste determinado en t ; S_t es el tipo de cambio spot en t .

De la ecuación (14) y (15) tenemos:

$$i_{t,T} - i_{t,T}^* = \ln\left(\frac{F_{t,T}}{S_t}\right) = E_t(dep_{t,T}) + \varphi_{t,T} \quad (16)$$

De la ecuación (16) se puede apreciar que la depreciación implícita en los contratos adelantados o forwards, que está determinada por el diferencial entre las tasas internas y externas, no corresponde a la depreciación esperada del tipo de cambio debido a la presencia de la prima de riesgo cambiario. Esto ilustra porque las funciones de probabilidad que se han estimado en las secciones precedentes se les conoce como distribuciones de probabilidad “neutrales al riesgo”, ya que sólo reflejarían la verdadera función de probabilidad esperada en ausencia de primas de riesgo ($\varphi = 0$). En la medida en que éstas

sean pequeñas o estables, las variaciones en las distribuciones de probabilidad neutrales al riesgo reflejarían las variaciones en la verdadera función de densidad (no observada).¹²

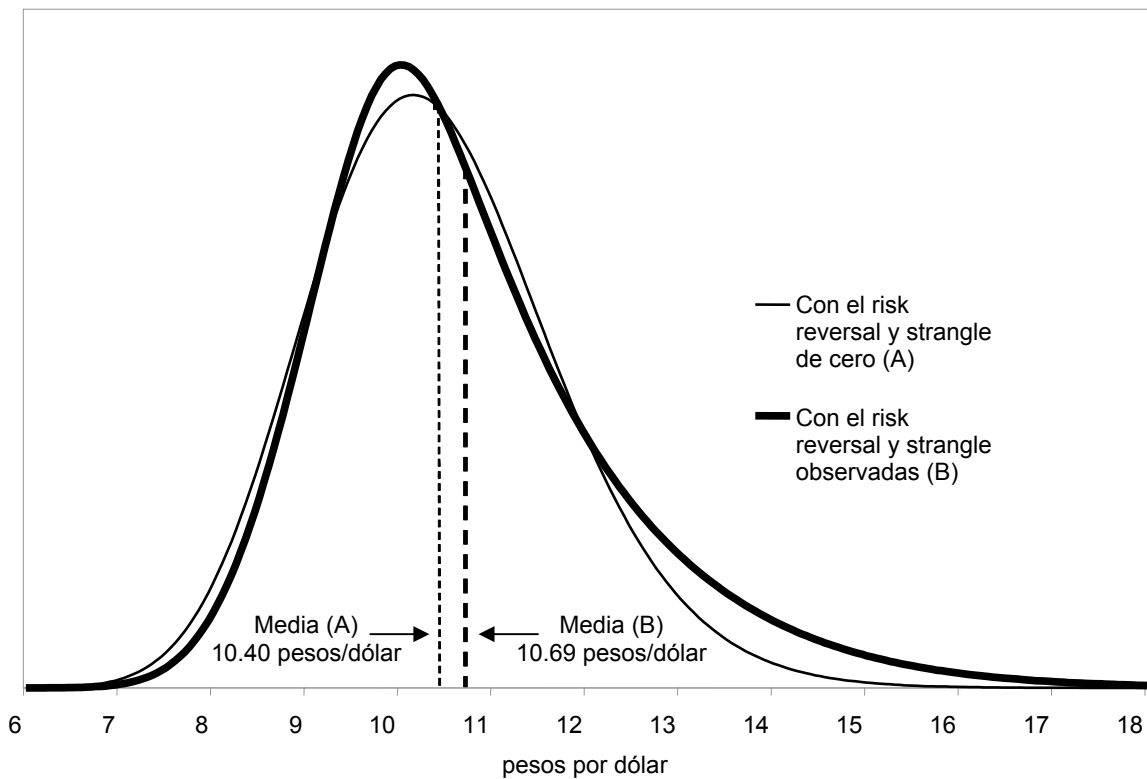
No obstante lo anterior, las distribuciones de probabilidad esperadas neutrales al riesgo pueden ser utilizadas para hacer algunas inferencias sobre el comportamiento de las primas de riesgo. A continuación se presenta una aplicación al método de la curva *smile* (sección 3.2) asociada al tipo de cambio que permite construir una aproximación a la prima de riesgo cambiario. Como se ha podido apreciar en la Gráficas 9, 10 y 12, la cotización del peso está sujeta a una mayor probabilidad de enfrentar variaciones extremas, las cuales son superiores a las correspondientes a una distribución lognormal, especialmente respecto a los movimientos de depreciación. Ello se refleja en los marcados sesgos positivos de las estadísticas de las distribuciones de probabilidad estimadas a partir de los precios de las opciones del tipo de cambio (Cuadro 3, 4 y 5). Lo anterior, y en particular el sesgo positivo de la distribución, tiene como resultado que la media sea superior a la mediana de la función de densidad.

Al utilizar el método de interpolación de la curva *smile* con risk reversals y strangles de cero se obtiene una distribución de probabilidad lognormal donde la media de dicha distribución corresponde al tipo de cambio forward (ver sección 3.2). Esto se ilustra en la Gráfica 13a y el Cuadro 6, donde se presentan las distribuciones de probabilidad para el tipo de cambio (peso/dólar) que se anticipaban el 17 de septiembre de 2001 para los próximos 12 meses. Se eligió esta fecha ya que tras los ataques terroristas del 11 de septiembre de 2001 se incrementó significativamente el sesgo a la depreciación del peso, con lo cual se puede apreciar con claridad la metodología que se propone para estimar la prima de riesgo.

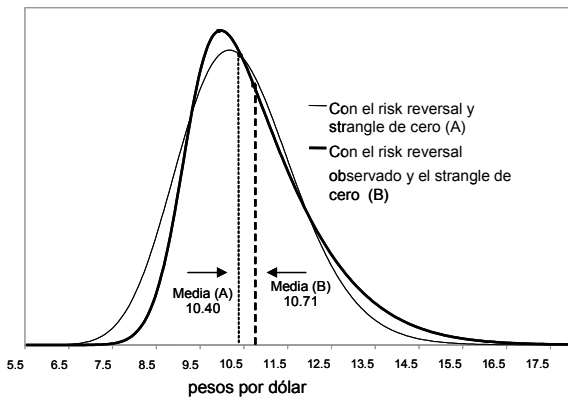
¹² Cabe destacar que en la medida en la que la prima de riesgo estuviera correlacionada con alguno de los momentos de la distribución de probabilidad, la distribución neutral al riesgo que se estima podría tener un sesgo respecto a la verdadera distribución.

Gráfica 13a

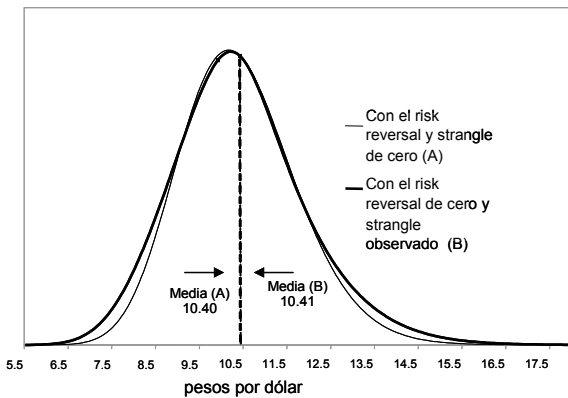
Distribución de probabilidad esperada del tipo de cambio (peso/dólar) a 12 meses al 17 de septiembre de 2001



Gráfica 13b



Gráfica 13c



Adicionalmente, en las Gráficas 13b y 13c se ilustra el efecto que tienen por separado, tanto el risk reversal como el strangle sobre la distribución de probabilidad estimada. Así, la Gráfica 13b muestra como el efecto del risk reversal, con un strangle igual a cero, hace que la función de densidad incremente significativamente su sesgo a la depreciación, lo cual

incide directamente sobre la media de la distribución (que pasa de 10.40 a 10.71 pesos por dólar). Por su parte, la Gráfica 13c presenta el impacto del strangle sobre la función de densidad, eliminando el efecto del risk reversal. En este último caso se aprecia que la distribución de probabilidad incrementa sensiblemente sus colas y tiene una media prácticamente igual a la de la distribución lognormal.

Cuadro 6

Resumen estadístico de las distribuciones de probabilidad esperadas para el tipo de cambio (peso/dólar) para los próximos 12 meses al 17 de septiembre de 2002

	Con el risk reversal y strangle de cero	Con el risk reversal y strangle observadas
	(A)	(B)
Precio Spot	9.45	9.45
Forward	10.40	10.40
Volatilidad ATM	12.75%	12.75%
Risk Reversal	0.00%	3.60%
Strangle	0.00%	0.65%
Media	10.40	10.69
Mediana	10.40	10.34
Coefficiente de Variación	12.80%	14.99%
Sesgo	0.39	0.95
Kurtosis	3.26	4.28
Prima de Riesgo	0.00%	2.8%

Cabe señalar que la media de la función de densidad estimada, utilizando los risk reversals y strangles cotizados en el mercado, es mayor al forward (para el caso del tipo de cambio peso/dólar), ello implica que dicha función no es enteramente congruente con los precios de los instrumentos derivados observados.¹³ Esto muestra que la media de la distribución de probabilidad estimada no debe ser considerada como el verdadero valor esperado del precios del activo subyacente, sino un reflejo de las desviaciones que el mercado anticipa respecto a una distribución lognormal. Por ello, la diferencia entre la media de la distribución estimada y el forward contiene información sobre la prima por riesgo cambiario que demanda el mercado sobre las opciones, la cual debe estar incorporada en las tasas de interés internas, y por ende, en los tipos de cambio forward.

¹³ Una manera sencilla de resolver este inconveniente es desplazar la función de densidad estimada por el método de interpolación de la curva smile a fin de que su media coincida con la cotización del tipo de cambio forward.

Como se puede apreciar en la Gráfica 13a, al eliminar el efecto de los risk reversals y strangles en la función de densidad, las colas de la distribución se reducen, especialmente la que marca el sesgo a la depreciación. El objetivo es obtener una medición de la prima de riesgo que capture el rendimiento adicional que requiere un inversionista para mantener un activo con una distribución de probabilidad con mayor sesgo a la depreciación (en el activo B y no en el A de la Gráfica 13a). Así, la prima de riesgo cambiario se estima como la diferencia porcentual entre las medias de la distribución de probabilidad con base en los datos observados y la de su correspondiente distribución lognormal (con risk reversals y strangles de cero). Ello implica que la prima propuesta corresponde al rendimiento adicional que debe recibir un inversionista neutral al riesgo por mantener un activo denominado en una moneda (pesos) con un sesgo a la depreciación (que ofrece un menor rendimiento esperado en moneda extranjera – dólares).¹⁴ Esto se aprecia por el hecho de que la media de la distribución de probabilidad B de la Gráfica 13a y el Cuadro 6 es 2.8 por ciento superior a la correspondiente a la función de densidad A. Adicionalmente, al contar con la prima de riesgo cambiario se puede estimar la depreciación esperada por el mercado, definida esta última como el diferencial de tasas de interés internas y externas menos la prima de riesgo estimada.

Cabe señalar que la prima de riesgo propuesta sólo considera el rendimiento adicional que un inversionista neutral al riesgo demandaría por mantener activos denominados en una moneda sujeta a una distribución de probabilidad con sesgo cambiario a la depreciación. Por ello, esta definición representa una subestimación de la prima de riesgo total que se incluye en las tasas de interés y se refleja en las cotizaciones forward del tipo de cambio. En dicho caso aún en ausencia de sesgo a la depreciación del tipo de cambio puede existir prima de riesgo. Un ejemplo de este caso se presenta cuando los inversionistas son adversos al riesgo y las depreciaciones de la moneda débil están asociadas a escenarios desfavorables para el consumo, como usualmente sucede. Así, comprar dólares forward a cambio de

¹⁴ Se hace referencia a un inversionista neutral al riesgo debido a que sólo necesita ser compensado por la diferencia entre las medias de las distribuciones de probabilidad, y no por momentos superiores de la distribución de probabilidad (desviación, sesgo y kurtosis).

entregar una cantidad predeterminada de pesos podría ser una alternativa de inversión que ofreciera una pérdida esperada¹⁵, pero otorgaría un rendimiento positivo en escenarios de la naturaleza en los que el consumo es bajo (depreciaciones del peso superiores a las implícitas por el forward), por lo que la pérdida esperada puede interpretarse como la prima que el inversionista está dispuesto a pagar por asegurar su consumo (ver Mark (2001)).

Para que la diferencia entre las medias de las distribuciones antes descritas pueda ser fácilmente interpretada como una prima de riesgo por el sesgo a la depreciación del tipo de cambio se recomienda utilizar un año calendario como el plazo de referencia de las distribuciones de probabilidad estimadas, aunque el plazo original de las opciones sea menor.¹⁶ Este proceso de anualización permite que las diferencias entre las medias sean directamente comparables con las tasas de interés, que también se expresan en términos anuales aunque sus rendimientos correspondan a plazos menores.¹⁷ Las primas de riesgo para las distribuciones de probabilidad a tres meses de los casos descritos en la sección 4.2, que se obtienen con base en dicha metodología se presentan en el Cuadro 7. Como se puede apreciar, hay una estrecha relación entre el sesgo de la distribución y la referida prima de riesgo.

¹⁵ Esto implica que la expectativa del tipo de cambio sea inferior a la cotización del tipo de cambio forward.

¹⁶ El primer paso es estimar la función de densidad a su plazo original, posteriormente, se conservan todos sus parámetros pero se sustituye el plazo original por un año, así la diferencia entre las medias ya está en una unidad de tiempo anual. En este caso el tipo de cambio forward que se utiliza para estimar la prima de riesgo se lleva a un año a partir del diferencial de tasas de interés del plazo correspondiente (1, 3, 6 ó 9 meses), por lo cual puede no coincidir con el forward cotizado a 12 meses.

¹⁷ Se necesita realizar este procedimiento porque el sesgo de la distribución de probabilidad no tiene una relación lineal con el tiempo (como sucede con la varianza). Es importante recordar que en la fórmula Black-Scholes se asume que el precio del activo subyacente se distribuye lognormalmente, por lo que la media y la varianza son suficientes para modelar el proceso estocástico de dicho activo. En dicho proceso (geométrico browniano) el tiempo tiene una relación lineal con la varianza y no se contempla una correspondencia entre el sesgo y el tiempo.

Cuadro 7

Primas de Riesgo derivadas de las distribuciones de probabilidad esperadas para el tipo de cambio (pesos/dólar) para los próximos 3 meses a diferentes fechas

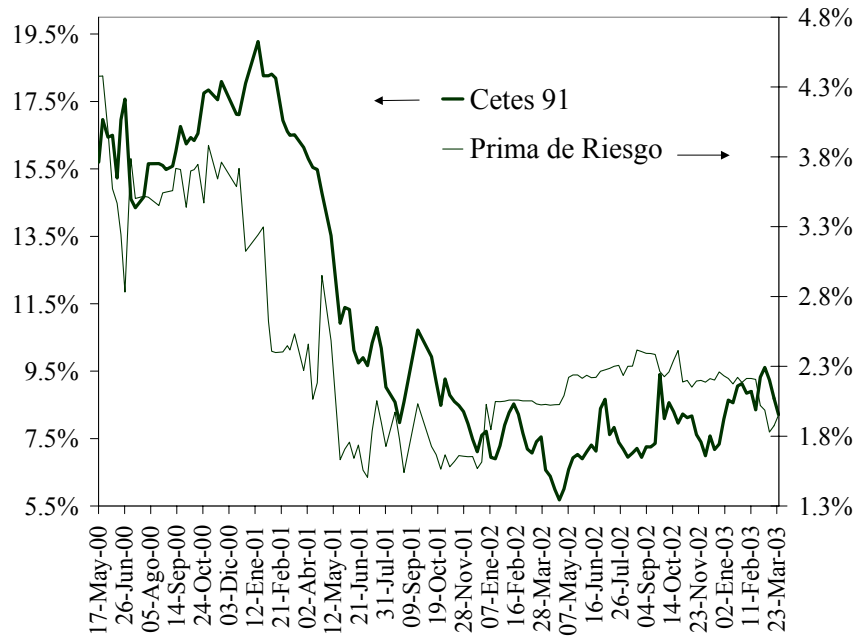
Fecha	Prima de Riesgo (Anualizada)	Sesgo
16-Jun-00	2.98%	0.93
21-Jul-00	3.47%	0.99
30-Ago-01	1.76%	0.62
17-Sep-01	2.26%	0.69
16-Oct-01	1.62%	0.60
02-Abr-02	1.39%	0.59
03-Jul-02	2.24%	0.70

Adicionalmente, se puede construir una serie de tiempo de la prima de riesgo y la expectativa de depreciación, definida esta última como el diferencial de tasas de interés internas y externas menos la prima de riesgo (ecuación 14). Para ello se utilizó información del mercado de derivados sobre opciones y forwards con tres meses por vencer, ya que a este plazo las opciones cuentan con amplia liquidez. La muestra es semanal del 17 de mayo de 2000 al 31 de marzo de 2003¹⁸. La prima de riesgo muestra una estrecha relación con las tasas de interés de los Cetes a 91 días colocados en la subasta primaria (Gráfica 14). Esto no es de sorprender, ya que como fue definida la prima de riesgo ésta representa la compensación o rendimiento que debe recibir un inversionista neutral al riesgo por mantener una inversión en pesos, moneda que está sujeta a un sesgo a la depreciación. Por otro lado, la Gráfica 15 presenta el tipo de cambio y la expectativa de depreciación compatible con la prima de riesgo estimada (diferencial de tasas de interés internas y externas menos la prima de riesgo), las cuales parecen estar relacionadas, aunque no de manera estrecha.

¹⁸ Se utilizó información de los días martes, la tasa de interés de los Cetes a 91 días de la subasta primaria y las cotizaciones de opciones proporcionada por Banamex-Citigroup y UBS.

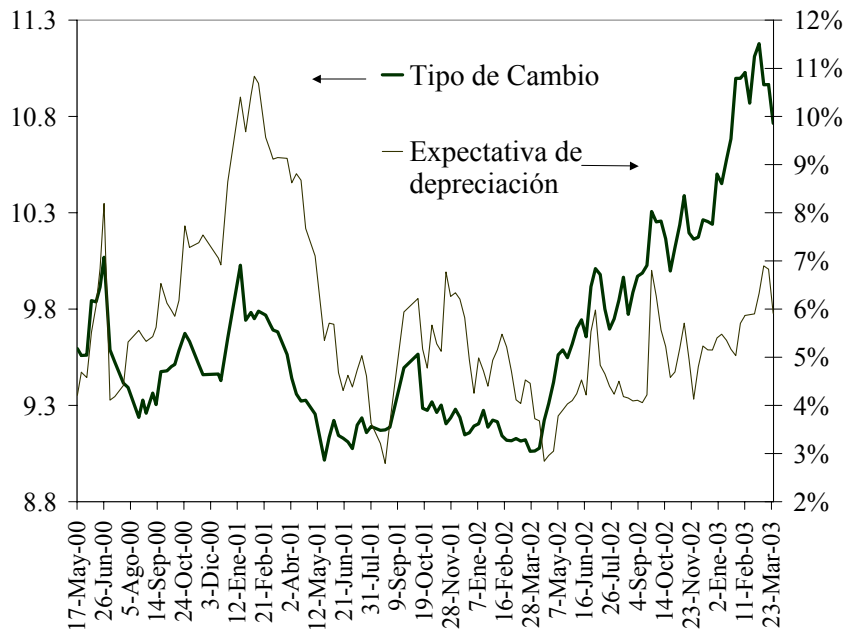
Gráfica 14

Cetes a 91 días y prima por riesgo cambiario



Gráfica 15

Tipo de cambio spot y expectativa de depreciación



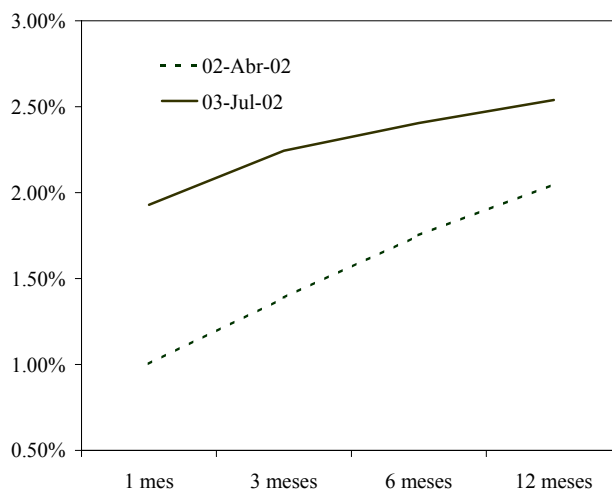
Para estudiar con mayor cuidado la relación que guarda la prima de riesgo y la expectativa de depreciación estimadas con las tasas de interés y el tipo de cambio, se realizaron pruebas de causalidad con la estimación de vectores autorregresivos (VAR), a partir de los cuales se evalúa si los rezagos de la variable en cuestión (prima de riesgo o expectativa de depreciación) son significativos para explicar a la variable dependiente (tasas de interés o tipo de cambio). En dichas estimaciones se controló por el riesgo país (rendimiento neto del índice EMBI para México), el tipo de cambio y las tasas de interés¹⁹. En estos ejercicios no se encontró evidencia de que la prima de riesgo ni la expectativa de depreciación antecedieran a las tasas de interés o al tipo de cambio²⁰. Esto no debe de sorprender, ya que es de esperarse que la información que se incorpora al mercado cambiario de derivados incida simultáneamente en el tipo de cambio (spot) y las tasas de interés.

La información disponible en el mercado de derivados permite estimar primas de riesgo a 1, 3, 6 y 12 meses, con lo cual se puede obtener una estructura de la prima de riesgo y descomponer a las tasas de interés internas en: tasa de interés externa, expectativa de depreciación y prima de riesgo (ecuación 14). Esto a su vez permite hacer inferencias sobre los riesgos que percibe el mercado, ya sean éstos internos, externos, o de corto o mediano plazo. Para ilustrar lo anterior la Gráfica 16 presenta la estructura de la prima de riesgo para el 2 de abril y el 3 de julio de 2002, periodo en el cual se registró una depreciación cercana al 10 por ciento en un periodo de tres meses. A principios de abril de 2002 la prima de riesgo presentaba una marcada pendiente positiva, reflejando un bajo riesgo cambiario de corto plazo. No obstante, el tipo de cambio se depreció sensiblemente, lo cual dio lugar a un incremento generalizado en las primas de riesgo, aunque especialmente el esperado para los plazos más cortos. Esto refleja que al 3 de julio de 2002, a pesar de que el tipo de cambio ya había presentado una cuantiosa depreciación, los participantes del mercado descontaban un marcado sesgo al alza en la cotización del peso (peso/dólar).

¹⁹ Todas las variables incluidas en el VAR (prima de riesgo, expectativa de depreciación, tipo de cambio, tasa de interés y rendimiento neto del EMBI México) son estacionarias (unas en niveles y otras en primeras diferencias). Las estimaciones se realizaron para datos semanales de mayo de 2000 a marzo de 2003 y con datos diarios de enero a marzo de 2003.

²⁰ Estimaciones no incluidas en el documento.

Gráfica 16
Estructura de la prima de riesgo

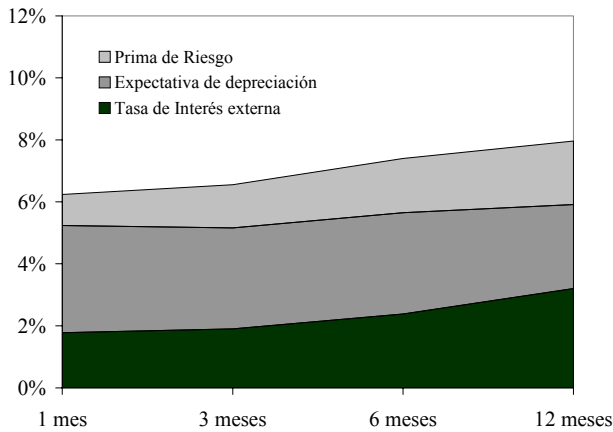


Adicionalmente, la Gráfica 17 presenta la descomposición de las tasas de interés internas para el 2 de abril y el 3 de julio de 2002. Como se puede apreciar, en dicho periodo de tres meses las tasas de interés internas se incrementaron aproximadamente 200 puntos base en promedio (Cetes a 28, 91, 182 y 364 días), lo cual se explica por una mayor expectativa de depreciación y prima de riesgo cambiario. Cabe señalar que en las Gráficas 16 y 17 se puede apreciar como la prima de riesgo se incrementa conforme aumenta el vencimiento de los instrumentos emitidos en moneda nacional. Así, una parte importante del premio que debe de pagarse por emitir a mayor plazo se debe a la presencia del riesgo de que se presenten depreciaciones abruptas del peso. Este sesgo positivo en la distribución de probabilidad esperada del peso se refleja en los mercados de opciones del tipo de cambio y es capturado a través de la definición de prima de riesgo propuesta. Esto permite conocer los principales componentes de las tasas de interés internas, lo cual es de gran utilidad para analizar con precisión el balance de riesgos que los participantes en los mercados asumen respecto a la cotización del peso.

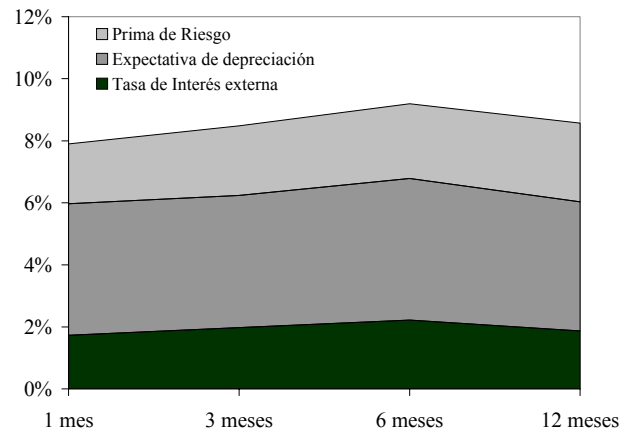
Gráfica 17

Estructura de tasas de interés en valores gubernamentales y prima de riesgo

18.a) 2 de abril de 2002



18.b) 3 de julio de 2002



5. Conclusiones

En este trabajo se construyen funciones de probabilidad esperadas neutrales al riesgo implícitas en los precios de los instrumentos derivados para analizar las expectativas de los agentes económicos implícitas en los mercados del petróleo y en la cotización del peso. Este tipo de información es de gran utilidad, tanto para los participantes en el mercado como para las autoridades financieras, en particular los bancos centrales, ya que de esta manera pueden seguir el pulso de los mercados. Al respecto, considérese la utilidad que representa contar con un balance de riesgos detallado del mercado petrolero y cambiario para ser incorporado en los diferentes modelos macroeconómicos y pruebas de estrés que frecuentemente llevan a cabo dichas instituciones.

De la estimación de la distribución de probabilidad esperada para la mezcla de petróleo WTI se encontró que en los meses previos a los ataques de los Estados Unidos y el Reino Unido a Irak los precios de las opciones sobre futuros del petróleo anticipaban un mercado sesgo al alza para las cotizaciones del crudo. No obstante, ante la decisión de los Estados Unidos y el Reino Unido de continuar con su ofensiva militar sin contar con una segunda

resolución de la ONU, el precio del crudo cayó sensiblemente, así como la probabilidad de que se registraran alzas considerables a lo largo del año. Ello debido a la percepción de que la campaña militar sería corta, lo cual se reforzó hacia finales de marzo, cuando los principales pozos petroleros de Irak pasaron a manos del ejército estadounidense y británico. Este tipo de estimaciones permite apreciar con claridad las fechas y las magnitudes en las que el mercado considera que el precio del crudo se verá afectado por diversos acontecimientos, en este caso el ataque de los Estados Unidos y el Reino Unido a Irak.

Para el tipo de cambio, los ejercicios realizados en este trabajo permiten apreciar como los sesgos a la depreciación que exhibe la función de densidad del peso cambian en respuesta al entorno esperado (elecciones presidenciales, ataques terroristas, etc.). En adición a los ejercicios anteriores, que son similares a los encontrados en la literatura económica y financiera, este trabajo presenta una definición de prima de riesgo cambiario que se construye a partir de las distribuciones de probabilidad neutrales al riesgo implícitas en los precios de los instrumentos derivados respecto a un activo subyacente. El objetivo es determinar la prima de riesgo cambiario de una moneda en función de su sesgo y mayor riesgo de registrar depreciaciones (en este caso del peso respecto al dólar). Esta definición aprovecha que las cotizaciones de las opciones de tipo de cambio (a través de los risk reversals y strangles) reflejan que las funciones de densidad esperadas para el precio de un activo subyacente pueden tener un sesgo y kurtosis distintos a los de una distribución lognormal (supuesto en la fórmula Black-Scholes). Así, la prima de riesgo cambiario se define como la diferencia porcentual entre las medias de la distribución de probabilidad estimada (con base en los datos observados) y la de su correspondiente distribución lognormal (con risk reversals y strangles de cero y que corresponde al tipo de cambio forward). Ello implica que la prima propuesta corresponde al rendimiento adicional que debe recibir un inversionista neutral al riesgo por mantener un activo denominado en una moneda (pesos) con un sesgo a la depreciación (que ofrece un menor rendimiento esperado en moneda extranjera – dólares). Adicionalmente, al contar con la prima de riesgo cambiario se puede estimar la depreciación esperada por el mercado, definida esta última

como el diferencial de tasas de interés internas y externas menos la prima de riesgo estimada.

Este trabajo pone de manifiesto la utilidad de emplear la información de los mercados de derivados para poder conocer con precisión el balance de riesgos que sus participantes asumen respecto a los diferentes activos subyacentes. No obstante, la agenda para extender esta línea de investigación es muy amplia. En particular, en materia cambiaria destaca el hecho de que ante depreciaciones importantes del peso el sesgo a la depreciación se incrementa, lo cual se puede deber a cierta inestabilidad de las expectativas del tipo de cambio, falta de liquidez en esos mercados o bien a un incremento en las primas de riesgo incorporadas en las cotizaciones de los instrumentos derivados. El estudio de este fenómeno, como muchos otros que se desprenden del análisis de las distribuciones de probabilidad esperadas neutrales al riesgo, permitirán conocer con mayor claridad las expectativas que los agentes económicos incorporan en sus transacciones financieras.

6. Bibliografía

Bahra, Bhupinder (1996); “*Some Issues in extracting Information From Option Prices*”; Monetary Instruments and Markets Division; Doc. 16545; Bank of England.

Bahra, Bhupinder (1997); “*Implied risk-neutral probability density functions from option prices: theory and application*”; Working Paper 66; Bank of England.

Banco de México (2001); Informe Anual, pp. 112-113.

Bank of International Settlements (1998); Annual Report #68; pp.98-103.

Bank of International Settlements (2001); Annual Report #71; pp.89-90.

Bank of England (2000); Financial Stability Review; diciembre 2000; pp. 58.

Bank of England (2001); Financial Stability Review; junio 2001; pp. 31.

Bank of England (2002); Financial Stability Review; junio 2002; pp. 27.

Black, F. y M. Scholes (1973); “*The Pricing of Options and Corporate Liabilities*”; Journal of Political Economy; 81.

Blanco, H. y Peter M. Garber (1986); “*Recurrent Devaluation and Speculative Attacks on the Mexican Peso*”; Journal of Political Economy; 94-1; pp. 148-166.

Bliss, Robert R. y Nikolaos Panigirtzoglou (2000); “*Testing the stability of implied probability density functions*”; Working Paper; Bank of England.

Breeden, D. y R. Litzenberger (1978); “*Prices of State-Contingent Claims Implicit in Options Prices*”; The Journal of Business; 51; pp.621-651.

Clews, Roger, Nikolaos Parigirtzoglou y James Proudman (2000); “*Recent developments in extracting information from option markets*”; Monetary Instruments and Markets Division; Bank of England Quarterly Bulletin; pp.68-77.

Cooper, Niel y James Talbot (1999); “*The yen/dollar exchange rate in 1998: views from options markets*”; Monetary Instruments and Markets Division; Bank of England Quarterly Bulletin; .pp.51-60.

Cox, J.C. y S.A. Ross (1976); “*The Valuation of Options for Alternative Stochastic Processes*”; Journal of Financial Economics; 3; pp.145-166.

Frankel, Jeffrey A. (1995); “*On Exchange Rates*”; MIT press, Cambridge, Massachussets, London, England, second print; pp.95-115.

Hull, John C. (1997); “*Options, Futures, and other Derivatives*”; Third Edition, Prentice Hall; pp. 63.

International Monetary Fund (2002); “World Economic Outlook”; September 2002; pp. 14-15.

Malz, Allan.M. (1997); “*Estimating the Probability Distribution of the Future Exchange Rate From Option Prices*”; Journal Of Derivatives; Vol. 5; pp.18-36.

Mark, Nelson C. (2001); “*International Macroeconomics and Finance*”; Blackwell Publishers; pp.136-138.

Mc Manus, Des (1999); “*The Information Content of Interest Rate Futures Options*”; Working Paper 99-15; Bank of Canada.

Melick, William R. y Charles P. Thomas (1997); “*Using options prices to infer PDF's for asset prices: an application to oil prices during the Gulf Crisis*”; International Finance Discussion Paper 541; Board of Governors of the Federal Reserve System.

Smiko, D. (1993); “*Bounds of Probability.*”, RISK; Vol. 6; No. 4.