

Economía aplicada

Ensayos de investigación económica 2013



Lucía Basombrio Ávila
Jorge Beltrán Puerta
César Augusto Brito Hidalgo
Carolina Paola Cárdenas Casaco
Giselle Chirinos Pérez
Micaela Chuquillín Mori
Antonio Ciudad Casafranca
Carlos Alberto Córdova Yupanqui
Alberto Jesús Cuba Cruz
Jessy Lucía Espinoza Sánchez
Katia Guadalupe Gallegos Torres
Giuliano Stefano Savilano Aguirre
Alexandra Graeda Baerti
Ian Kuslii Kishimoto Ramírez
Jimena Jesús Montoya Villavicencio
Milagros del Pilar O'Diana Rocca
Marina Yolanda de Lourdes Pando Estela
Fernando Carlos Ruiz Ponce
Alejandro Torres Cano
César Saturnino Salinas Depaz
Tamy Karina Suzuki Sakihara
Aldia Isabel Valdivia Valladares
Melissa Villanueva Agüero



UNIVERSIDAD
DEL PACÍFICO

Economía aplicada

Ensayos de investigación económica 2013

Lucía Basombrío Ávila
Jorge Beltrán Puerta
César Augusto Brito Hidalgo
Carolina Paola Cárdenas Casuso
Giselle Chirinos Pérez
Micaela Chuquilín Mori
Antonio Ciudad Casafranca
Carlos Alberto Córdova Yupanqui
Alberto Jesús Cuba Cruz
Jessy Lucía Espinoza Sánchez
Katia Guadalupe Gallegos Torres
Giuliano Stefano Gavilano Aguirre
Alexandra Granda Baertl
Ian Kuniji Kishimoto Ramírez
Jimena Jesús Montoya Villavicencio
Milagros del Pilar O'Diana Rocca
Marina Yolanda de Lourdes Pando Estela
Fernando Carlos Ruiz Ponce
César Saturnino Salinas Depaz
Tamy Karina Suzuki Sakihara
Alejandro Torres Cano
Alida Isabel Valdivia Valladares
Melissa Villanueva Agüero



UNIVERSIDAD
DEL PACÍFICO



¿Logra el modelo de Heston captar la dinámica de la volatilidad en los mercados de opciones sobre divisas mejor que el modelo de Garman y Kohlhagen? Un análisis para opciones sobre USD/EUR y PEN/USD¹

Marina Yolanda de Lourdes Pando Estela
Melissa Villanueva Agüero

1. Introducción

El mercado de derivados sobre divisas ha mostrado un aumento sostenido en los últimos años debido a las crecientes necesidades de manejar los riesgos cambiarios en una economía globalmente integrada. Después de los contratos de *forwards* y *swaps* de monedas, las opciones son los instrumentos derivados financieros más importantes en los mercados desarrollados, y según el Bank for International Settlements a diciembre de 2012 existían 10,2 billones de dólares en contratos vigentes en los mercados *over-the-counter*². Por lo tanto, la búsqueda del modelo de valorización óptimo de opciones sobre divisas merece considerable atención tanto para los creadores de mercado de opciones como para los agentes interesados en adquirir estos activos financieros.

El objetivo de los modelos de valorización de opciones es encontrar el precio justo que un inversionista debería pagar por el derecho de comprar o vender una divisa. La aproximación estándar es utilizar el modelo de Garman y Kohlhagen (1983), el cual representa la modificación del modelo de Black y Scholes (1973) aplicado a las opciones sobre divisas. Este es un modelo altamente utilizado en la práctica debido a su simplicidad y facilidad para entender la interrelación de variables que afectan la prima de la opción (Bollen y Rasiel 2003).

Sin embargo, uno de los problemas presentados en la valorización de opciones cuando se utiliza el modelo de Garman y Kohlhagen se deriva del hecho de

1. La presente investigación supone un resumen de la versión original, la cual se encuentra en la Biblioteca de la Universidad del Pacífico.

2. El monto corresponde a las opciones transadas en los países del G10, Suiza, Australia y España.



que este supone que el activo subyacente presenta volatilidad constante, y en la práctica esto no se suele observar debido a las distintas características de los mercados. No solo existen diferencias en los niveles de volatilidad en el tiempo sino que también se observa un hecho recurrente denominado el *smile* de volatilidad. Lo que se percibe es que en la misma fecha de pacto se les otorgan diferentes niveles de volatilidad a opciones con diferentes características tales como *moneyness*³ y tiempo al vencimiento.

A raíz de la persistencia del *smile* en las opciones sobre divisas es que han surgido métodos de valorización que no mantienen el supuesto de una volatilidad constante. Dentro de las alternativas, una de las corrientes más importantes ha sido asumir que la volatilidad sigue un proceso estocástico. El modelo de Heston (1993) es uno de los referentes más importantes dentro de este grupo pues logra ofrecer soluciones de forma cerrada y por lo tanto no requiere el uso de técnicas numéricas extensivas para resolver sus ecuaciones (Heston 1993: 328).

Pese a la presencia de esta nueva gama de modelos, aún hoy no existe un modelo que se considere superior a otro (Gómez 2010). Por este motivo, la literatura es extensa en la comparación de modelos de valorización de opciones. Por un lado, las investigaciones se centran en la comparación de modelos con diferentes supuestos, tales como volatilidad constante, estocástica o que logre captar los saltos que presente el activo subyacente (*jump-diffusion models*). Además, se incluyen análisis de distintas monedas pues la dinámica de la volatilidad de cada divisa es específica a las condiciones de cada mercado, por lo que *a priori* no se conoce el método de valorización que logre captar las singularidades del mercado en estudio.

Los tipos de cambio presentan comportamientos que no son uniformes debido a las diferencias en la liquidez de los mercados, niveles de dolarización, situación económica de los países y condiciones de los mercados de derivados. Por este motivo, algunos autores afirman que los modelos de valorización tienen una naturaleza de equilibrio parcial. Esto implica que el modelo de valorización asume un equilibrio en el mercado del subyacente, y no modela explícitamente las relaciones en ese mercado. En parte, los precios de las opciones se determinan por variables económicas y en parte por variables específicas a los contratos,

3. Moneyness describe la relación entre el precio strike de una opción y el precio actual de mercado del subyacente (The Options Guide 2009). En la práctica puede ser utilizado como una aproximación a la probabilidad de que la opción sea ejercida.



lo cual incluye elementos subjetivos como las expectativas de los agentes del mercado (Chalamandaris y Tsekrekos 2009).

En el Perú, las opciones de tipo de cambio son de especial importancia dado el nivel de dolarización de la economía y últimamente han cobrado mayor protagonismo debido a la creciente volatilidad cambiaria. Asimismo, dado que el mercado de opciones está en sus inicios en el Perú, existe aún mucha desinformación acerca de la mejor manera de valorizar las opciones, y a conocimiento de las autoras no se ha realizado un estudio de estas características para el mercado de opciones sobre PEN/USD.

El objetivo de la investigación consiste en evaluar el mejor modelo de valorización de opciones contrastando el modelo clásico de Garman y Kohlhagen con un modelo alternativo que utilice el supuesto de volatilidad estocástica como el de Heston. Para lograr esto se realizará un estudio tanto para las opciones de PEN/USD como para las de USD/EUR, con el propósito de evaluar las diferencias en las dinámicas de la volatilidad de las opciones en comunidades desarrolladas y países emergentes.

El presente trabajo se estructurará en cinco partes. En la primera parte se resalta el marco teórico de los modelos siguiendo una revisión de la literatura existente. Además se explicará el concepto del *smile* de volatilidad que contradice el supuesto de volatilidad constante. En la segunda parte del trabajo se revisarán los hechos estilizados que demuestran la existencia de *smiles* de volatilidad en los mercados, siguiendo un estudio de la literatura así como un análisis empírico de los mercados de divisas, lo que permite formular la hipótesis del trabajo. En la tercera parte se describen los pasos por seguir para obtener los resultados, lo que permitirá afirmar o no la hipótesis planteada. Luego se presentan los resultados y su respectiva interpretación. Finalmente, se establecerán las conclusiones y limitaciones del trabajo.

2. Marco teórico

El modelo clásico de valorización de opciones es el presentado por Fischer Black y Myron Scholes en 1973 en su estudio «The Pricing of Options and Corporate Liabilities». Este modelo se construyó como base para la valorización de opciones sobre acciones, por lo que en 1983 Mark Garman y Steven Kohlhagen extendieron este estudio para la valorización de opciones sobre divisas en «Foreign Currency Option Values». El modelo propuesto se detalla en el anexo 1.



Hasta 1987 los agentes utilizaban el supuesto de volatilidad constante para valorizar todo tipo de opciones financieras, incluyendo opciones sobre divisas. Sin embargo, ese año se produjo el *crash* del mercado de acciones en los Estados Unidos (Gómez 2010). Esto llevó a producir un cambio en la aversión al riesgo de los agentes, lo que derivó en un aumento en la prima por riesgo implícita en las opciones *out-of-the-money*, lo que llevó a que los mercados reflejen la dinámica del *smile* de volatilidad de manera más persistente.

Desde ese momento la volatilidad se convirtió en un factor de vital importancia en los modelos de valorización de opciones. El supuesto que utilice el agente para calcular la volatilidad tiene alta incidencia en el precio final de la opción. Si se asume el supuesto de volatilidad constante, esta se define como la desviación estándar de los retornos del activo subyacente (Sandilya y Bouquet 2010).

Como ya ha sido mencionado, una de las complicaciones para la valorización de opciones que se observa en el mercado es la presencia de un *volatility smile*, en donde la función de los precios *strike* de las opciones se asemeja a una *smile* pues a medida que el precio de la opción se aleja del precio *at-the-money* aumenta el nivel de volatilidad (Yekutieli 2004). Este *smile* se recoge de la volatilidad implícita, es decir, se busca cuál es el nivel de volatilidad que utilizando la fórmula de Garman y Kohlhagen refleje los precios de mercado, y muestre un mayor precio para las opciones *out-of-the-money* que lo que el modelo de Garman y Kohlhagen sugeriría. El *smile* de volatilidad típico se muestra en el anexo 2.

El mencionado *smile* de volatilidad cambia dinámicamente en el tiempo en respuesta a nueva información que afecta las expectativas de los inversionistas sobre el precio futuro del activo (Chalamandaris y Tsekrekos 2009). Los *shocks* pueden cambiar el grado de curvatura del *smile* (Tompkins 2001) pero el efecto de estos *shocks* varía de caso a caso, dependiendo del nivel de liquidez y *trading* del subyacente. Por estos motivos no se pueden generalizar los resultados de modelos de valorización en activos diferentes en momentos del tiempo diferentes.

A raíz de la presencia del *smile* en los mercados, han surgido modelos más sofisticados que consideran que la volatilidad sigue algún proceso estocástico, como el modelo de Heston (1993) que se muestra en el anexo 3. El autor de este modelo señala que utilizarlo incrementa los precios de las opciones *out-of-the-money* relativas al modelo de Garman y Kohlhagen, por lo tanto lograría captar el *smile* de volatilidad. Además, según Heston, ambos modelos producen



primas virtualmente idénticas para las opciones *at-the-money*. Señala también que dado que en el mercado gran parte de las transacciones se dan alrededor de las opciones *at-the-money* esto explicaría el apoyo empírico que tiene el modelo de Garman y Kohlhagen.

Asimismo, dado que los modelos en estudio presentan tanto ventajas como desventajas, se puede afirmar que no existe consenso acerca de si un modelo es superior a otro en todos los casos. Por ejemplo, el modelo de Garman y Kohlhagen tiene la ventaja de ser fácil de calcular y de modelar explícitamente la relación de las variables. Sin embargo, su principal desventaja es el uso de supuestos simplistas que lo alejan de la creciente complejidad de los mercados financieros. Uno de estos supuestos es que el activo subyacente sigue una distribución log-normal con volatilidad constante, lo cual no se observa en muchos mercados debido a asimetrías y a la presencia de cambios drásticos en las dinámicas que una distribución log-normal no logra capturar (Ucar y Kivila 2009).

Por otro lado, el modelo de Heston presenta ventajas y desventajas también. Permite distribuciones de probabilidad que no sean log-normales, a la vez que provee soluciones de forma cerrada. Sin embargo, se necesita mayor sofisticación en el *software* para poder estimarlo y la fórmula no es de fácil interpretación. Además, los precios son altamente sensibles a los parámetros, por lo que el uso del modelo depende de una adecuada calibración y esto puede llegar a ser un proceso bastante complejo (Ucar y Kivila 2009).

La literatura señala también que los resultados que ofrece el modelo de Heston no reflejan las dinámicas de los mercados en el corto plazo pues no logran capturar el *smile* tan pronunciado que se da en este tipo de opciones (Ucar y Kivila 2009). Por estos motivos, los estudios no son concluyentes en afirmar que la volatilidad estocástica sea el mejor modelo por utilizar, por lo cual esta investigación busca evaluar si las ganancias en precisión de utilizar el modelo de volatilidad estocástica son suficientes para perder en términos de simplicidad y claridad de las relaciones que ofrece el modelo de Garman y Kohlhagen.

3. Hechos estilizados

La presencia de un *smile* en los mercados de opciones llega a ser una constante en el *trading* del día a día pues la convención es que la formación de precios no se dé a través de primas sino por medio de volatilidades implícitas del modelo de



Garman y Kohlhagen, las que luego el agente puede traducir a primas utilizando la fórmula mencionada. Esto reduce la carga para los negociantes de cambiar los niveles de prima que ofrecen ante cambios en el nivel del subyacente (Carr y Wu 2004). Por ejemplo, en el anexo 4 se muestran las cotizaciones diarias de volatilidades implícitas para las opciones sobre USD/EUR de uno de los principales bancos del mercado. En este anexo se pueden observar las diferencias en volatilidades tanto dependiendo del plazo al vencimiento como del *moneyness* de la opción⁴.

La literatura es extensa en comprobar la presencia de *smiles* en opciones sobre divisas. Por ejemplo, Carr y Wu (2004) demostraron que en promedio la volatilidad implícita de las opciones *out-of-the-money* es mayor que la de las opciones *at-the-money* para USD/GBP y JPY/USD, y Bollen y Rasiel (2003) demuestran para estas mismas monedas la presencia de un *smile* simétrico. La simetría implicaría que en promedio existe la misma demanda para cubrir tanto depreciaciones como apreciaciones del tipo de cambio. De manera similar, Chalamandaris y Tsekrekos (2009) señalan que para el caso USD/EUR el *smile* presenta también simetría.

Además, la evidencia empírica señala que no solo existen diferencias en la volatilidad de la opción dependiendo del delta correspondiente sino también del plazo al vencimiento. Según Heston, existe una prima por riesgo asociada a mayor exposición a cambios en el nivel de volatilidad durante el plazo de la opción, lo que implica una relación directa entre el tiempo al vencimiento y la volatilidad implícita de la opción.

Sin embargo, algunos autores señalan que a medida que aumenta el tiempo al vencimiento de la opción se reduce la pendiente del *smile* con respecto al *moneyness*. Es decir, se presenta un fenómeno denominado *dying smile* que implica que para cada nivel de tiempo al vencimiento el *smile* es menos pronunciado con respecto al delta. Chalamandaris y Tsekrekos (2009) señalan que esto se debe a que existe mayor incertidumbre respecto de la dirección futura del tipo de cambio, por lo cual, por ejemplo, *strikes* que hoy son *at-the-money* tienen similar probabilidad de ocurrencia que opciones *out-of-the-money* si el tiempo al vencimiento es lo suficientemente largo. Por otro lado, Carr y Wu (2004) dan otra explicación a este fenómeno, aduciendo que se espera una reducción del *smile* en opciones de larga duración debido al teorema del límite central, que señala que la serie de retornos

4. Es la convención del mercado ofrecer niveles indicativos de las opciones ATM, Risk-Reversal de 25 delta y Butterfly de 10 delta, sobre los cuales a través de interpolaciones se crea la superficie de volatilidad completa.



del tipo de cambio tiende a la normalidad en el largo plazo. Esto apoyaría el uso de modelos con volatilidad constante para opciones de larga duración.

Por otro lado, la literatura ha buscado evaluar si es que el modelo de Heston logra captar el *smile* de volatilidad para las opciones de tipo de cambio. Es decir, busca probar si Heston logra predecir correctamente los precios que se dan en el mercado. Las investigaciones no son concluyentes al respecto. Por un lado, Winkler, Apel y Wystup (2001) señalan que Heston captura de manera eficiente el *smile* en los casos en los que las dos monedas son negociadas activamente. Por otro lado, Carr y Wu (2004) demuestran que Heston no captura completamente el *smile* para opciones de corta duración y en el caso de las opciones de largo plazo sobredimensiona el *smile*. Por ejemplo les daría a las opciones *out-of-the-money* de larga duración mayor precio de lo que efectivamente se da en los mercados.

Según Carr y Wu (2004), una volatilidad constante asume una distribución riesgo neutral, pero si en el mercado se da la presencia de un *smile* de volatilidad, esto implicaría que existe aversión al riesgo de parte de los inversionistas. Sin embargo, en muchos casos la aversión al riesgo no es equitativa con relación a ambas monedas de la opción, lo que lleva a *smiles* de volatilidad que no son simétricos. Por ejemplo, según Gómez (2010), en los mercados emergentes es usual que las opciones *call* (compra de divisa extranjera) sean relativamente más caras y por lo tanto se presente mayor pendiente en esta sección del *smile*. Esto se debe a la posibilidad de depreciaciones fuertes de la moneda local, ya que los agentes en el mercado suelen reaccionar de manera más abrupta ante información negativa y de manera más pausada ante información que fortalezca a la moneda local. En el anexo 5 se muestra cómo el nuevo sol presenta una apreciación sostenida y paulatina pero en los momentos en los que la moneda se deprecia los movimientos son mucho más abruptos, como sucedió en mayo de 2012 o abril de 2013.

Para el caso peruano no se han realizado estudios acerca del *smile* de volatilidad de las opciones del tipo de cambio, pero sí se han encontrado investigaciones al respecto para países de la región, como Chile y Colombia. Para el primer caso, Carrasco en el 2008 estimó mediante simulaciones de Monte Carlo el *smile* de volatilidad, y demuestra la existencia de un *smile* simétrico cuya curvatura no va decreciendo a medida que aumenta el plazo de la opción. Por el contrario, Gómez en el 2010 mediante un proceso similar encuentra cierta asimetría en el *smile* de volatilidad de las opciones COP/USD y que existe una estructura temporal de volatilidades decreciente.



Con el propósito de estudiar los hechos estilizados se calcularon los retornos de las series USD/EUR y PEN/USD para evaluar la variabilidad presente en estas monedas. Para el caso del euro, como se observa en el anexo 6, la variabilidad es relativamente constante y la distribución de la serie se aproxima a una normal. Por el contrario, para el caso peruano para una ventana de tiempo comparable, se encuentran divergencias en la volatilidad durante este período, y la distribución se aleja de la normal. Con esta información se resaltan las diferentes dinámicas de la volatilidad del tipo de cambio de ambas monedas contra el dólar.

Asimismo, se obtuvieron los *smiles* de volatilidad para ambas monedas de la plataforma de Bloomberg. Para estimar estos *smiles*, Bloomberg obtiene todos los días datos de los precios de las opciones a distintos plazos y niveles de *moneyness*. Esto lo proveen los bancos más activos en las respectivas opciones, como por ejemplo JP Morgan, BNP Paribas, Deutsche Bank, BBVA, entre otros. Con estos datos realiza interpolaciones para completar la superficie de volatilidad, las cuales se observan en el anexo 7.

En este anexo se muestra el *smile* para la primera fecha de pacto de las opciones según la muestra de datos por utilizar en este estudio. Para el caso USD/EUR se observa asimetría del *smile* con mayor pendiente para las opciones *put out-of-the-money*. Esto implica mayor precio a la opción de vender euros frente al dólar, lo que sugeriría mayor aversión al riesgo ante depreciaciones del euro, es decir, apreciaciones del dólar. Además, en el segundo gráfico de este anexo no se observa un patrón de *dying smile* y a medida que aumenta el plazo de la opción aumenta el nivel de volatilidad pero hasta opciones de un año, luego del cual la volatilidad disminuye y converge. Esto sugeriría cierto apoyo empírico al uso de modelos con volatilidad constante en opciones de larga duración.

Para el caso peruano, como se muestra en el anexo 7, la asimetría es inversa a la mostrada en el caso anterior, pues son las opciones *call out-of-the-money* las que cuentan con mayores niveles de volatilidad y por lo tanto mayor prima por riesgo. Esto concuerda con lo señalado por Gómez (2010) y sugiere mayor aversión a depreciaciones fuertes del nuevo sol. Además, no se nota claramente un patrón de *dying smile*. Al igual que el caso anterior, las opciones con mayor tiempo al vencimiento cuentan con niveles de volatilidad mayores, los cuales no disminuyen pero a partir del año y medio empieza un proceso de convergencia, el cual sin embargo no es tan claro como en el caso anterior.



Una inferencia que se rescata de los hechos estilizados es que los *smiles* de volatilidad varían en pronunciamiento de la pendiente, simetría y relación con el plazo al vencimiento, y todos estos factores pueden influir en el buen funcionamiento de los modelos de valorización de opciones. La hipótesis del presente trabajo es que, en términos generales, dado que la existencia del *smile* está probada, se espera que el modelo de Heston logre capturar la dinámica de los mercados y por lo tanto ofrezca mejores resultados que el modelo de Garman y Kohlhagen con volatilidad constante.

En términos específicos, se espera que la ganancia en precisión por utilizar el modelo de Heston sea mayor para las opciones *put* en el caso de USD/EUR y para las opciones *call* para el caso de PEN/USD. Además, se espera que esta ganancia en precisión relativa al modelo de volatilidad constante sea menor en los casos de opciones *at-the-money* y de mayor tiempo al vencimiento.

4. Metodología

La data por utilizar para las opciones sobre USD/EUR será proporcionada por la base de datos de Bloomberg, en donde se obtendrán los precios transados en la Chicago Board Options Exchange de las opciones europeas de este par de divisas para el período comprendido entre diciembre de 2011 y febrero de 2013. Cabe resaltar que este período ha sido seleccionado debido a las restricciones de data para períodos previos. Además, se obtendrá la información del tipo de cambio *spot* y las tasas de interés locales y extranjeras para el período en estudio. La tasa de interés local por utilizar se obtendrá de una interpolación de la curva *swap* libre de riesgo europea. La tasa de interés extranjera que se utilizará será también de la interpolación de las tasas de los bonos del Tesoro estadounidense, y se obtendrá de la base de datos histórica de la Reserva Federal Estadounidense.

Para el caso de las opciones sobre PEN/USD, la data fue proporcionada por una entidad financiera peruana, y contempla opciones pactadas durante el año 2012. Cabe resaltar que una limitación de la data es el poco número de observaciones disponibles dado que el mercado de opciones es aún incipiente en el Perú y no existe data pública al respecto. Más aún, la información disponible solo contempla opciones *put* pues son las únicas opciones vendidas por esta entidad a la fecha. Además, la información del tipo de cambio y tasas de interés será obtenida de la plataforma Bloomberg. La tasa de interés doméstica



por utilizar será la tasa de los Certificados de Depósito del BCRP y la tasa de interés extranjera es la misma que en el caso anterior.

Con esta información se procederá a estimar los precios teóricos con los dos modelos. Para esto se utilizarán programas informáticos especializados en el cálculo de las primas de las opciones, como por ejemplo la calculadora de opciones que ofrece el paquete de Bloomberg, donde los *inputs* del modelo son especificados por el usuario para cada opción calculada. Cabe resaltar que para el caso de Garman y Kohlhagen se estimará una volatilidad constante, la cual se calculará como la desviación estándar anualizada de los retornos de la serie del tipo de cambio.

A continuación se compararán los precios obtenidos con los precios del mercado y se evaluará el *mispricing*. Los métodos para comparar los modelos variarán dependiendo de la moneda en estudio por las restricciones de data. Para el caso del euro, se utilizará un indicador del *bid-ask spread* en el mercado, en donde si la diferencia entre el precio teórico y el observado supera este rango, se considera que existe *mispricing*, siguiendo la metodología de Chesney y Scott (1989) en su estudio. No es posible realizar esto para el caso peruano debido a la inexistencia de una bolsa en donde se transen las opciones y por lo tanto la información del *bid-ask spread* no está disponible.

Luego se calcularán estadísticos para medir el error de los modelos, buscando replicar las metodologías utilizadas en la bibliografía revisada. Se calcula el error del modelo, dado por la diferencia entre el precio observado y el de cada método. Con esta información se procederá a calcular el error cuadrático medio y la desviación absoluta promedio. De esta manera se podrá realizar un análisis comparativo de los errores presentados por cada modelo. Los resultados que arrojarán los dos métodos descritos líneas arriba serán presentados en un cuadro comparativo, en el que se podrá ver el porcentaje de *mispricing*, el error cuadrático medio y la desviación absoluta promedio de cada modelo.

Asimismo, se procederá a realizar un análisis gráfico comparativo con los siguientes factores: tiempo al vencimiento, *moneyness* y comparación de *puts vs. calls*. En cada uno de estos casos se utilizarán gráficos de dispersión en donde en el eje horizontal se muestre el factor en análisis y en el eje vertical, el error de estimación. Esta es la metodología utilizada tanto por Chesney y Scott (1989) como por Gençay y Salih (2003) para evaluar qué efecto tiene cada elemento



tiene sobre el *mispricing*. Además, en el caso del euro se complementará con un análisis de la desviación absoluta promedio diferenciado por los tres factores mencionados anteriormente.

Posteriormente, se realizará una regresión lineal para el caso USD/EUR en donde se compare el precio de mercado frente al precio estimado con la finalidad de medir el ajuste de los modelos. Esto se realizará comparando el indicador R² y los criterios de información.

Ecu. 1	Regresión lineal
$\text{Precio_Mercado} = C_1 + \beta_1 * \text{Precio_Modelo} + e$	

Para terminar el análisis, se realizarán pruebas de ajuste de los modelos a través del test de Wald, utilizando como criterio la prueba F en donde se busca probar que:

- $C_1 = 0$
- $\beta_1 = 1$

Finalmente, se compararán los correlogramas de los residuos y se espera que no exista autocorrelación de los residuos y por lo tanto el error de la regresión sea un ruido blanco. Estos dos últimos test se basan en la metodología de Christensen y Prabhala (1998).

5. Interpretación de resultados

Siguiendo la metodología indicada, se procedió a comparar los errores de las estimaciones entre los modelos en estudio. Los resultados se presentan a continuación:

Cuadro 1

Comparación entre modelos para opciones sobre USD/EUR

Modelo	% <i>mispricing</i> (pips)	Error cuadrático medio	Desviación absoluta promedio
Garman y Kohlhagen	46,25%	0,3771	0,0049
Heston	13,75%	0,1451	0,0026

Elaboración propia.



Cuadro 2

Comparación entre modelos para opciones sobre PEN/USD

Modelo	Error cuadrático medio	Desviación absoluta promedio
Garman y Kohlhagen	0,47%	0,0006
Heston	0,91%	0,0007

Elaboración propia.

En primer lugar, para el caso USD/EUR el modelo de Heston ofrece mejores resultados, ya que presenta menor porcentaje de observaciones cuya desviación del precio de mercado es mayor que el *bid-ask spread*, comparado con el modelo de Garman y Kohlhagen. Además, esto se refuerza con los indicadores de error cuadrático medio y desviación absoluta promedio, que muestran un nivel considerablemente mayor de error para Garman y Kohlhagen.

Por el contrario, para el caso de las opciones PEN/USD se observó un patrón inverso. Como ya se mencionó, debido a restricciones de data no se pudo calcular el porcentaje de *misppricing* pero sí se pudieron estimar los otros indicadores. Estos muestran un nivel de error mayor cuando se estiman las opciones a través del modelo de Heston.

A continuación se procedió a realizar el análisis gráfico y estadístico con relación al tiempo al vencimiento, como se muestra en el anexo 8.1. Para el caso de opciones sobre USD/EUR se observa una relación positiva, pues a mayor plazo, mayor nivel de error en ambos modelos. El análisis estadístico demuestra que el nivel de error es inferior utilizando el modelo de Heston para todos los plazos de vencimiento de las opciones.

Relativamente, la ganancia en precisión por utilizar el modelo de Heston es mayor para las opciones de corta duración, ya que en las de más largo plazo se presentan niveles de error más cercanos a los ofrecidos por el modelo de Garman y Kohlhagen. Esto implicaría una aceptación de la hipótesis de que a mayor tiempo al vencimiento menor es la ganancia por utilizar el modelo de volatilidad estocástica, lo que sugiere un apoyo a lo presentado por Carr y Wu (2004) quienes señalan que, debido al teorema del límite central, la serie de retornos del tipo de cambio tiende a la normalidad en el largo plazo. De esto se deduce que si bien para las monedas de países desarrollados utilizar modelos de



volatilidad estocástica es preferible, para opciones de larga duración modelos de volatilidad constante no necesariamente deberían ser descartados.

Por otro lado, cuando se realiza el análisis gráfico para el caso peruano, como se muestra en el anexo 8.1.2, se observa que el modelo de Garman y Kohlhagen sobreestima las opciones de corta y mediana duración, y para estas opciones Heston subestima las primas. Sin embargo, para opciones con plazo mayor de 200 días ambos modelos subestiman las primas. Esto sugiere la mayor prima por riesgo que exigen los agentes del mercado por ofrecer opciones a largo plazo, evidenciando altos niveles de aversión al riesgo en mercados emergentes como el peruano. Cabe resaltar que se observa alta precisión al utilizar el modelo de Heston para las opciones de muy corta duración.

Asimismo, se realizó una comparación sobre el *mispricing* de los modelos con relación al tipo de opción, que se muestra en el anexo 8.2. El modelo de Heston logra predecir correctamente las opciones *call* salvo en algunas excepciones en que tiende a subestimar las primas de las opciones. Por otro lado, denota una sobreestimación de las primas de las *put*. Esa sobreestimación de las *put* también se refleja en el modelo de Garman y Kohlhagen, pero en el caso de las *call* el patrón no es tan claro.

Según el análisis estadístico con respecto al tipo de opción, se concluye que la ganancia por utilizar el modelo de Heston es mayor en el caso de las *call* pues los niveles de error son relativamente similares para el caso de las *put* para ambos modelos. Esto rechaza la hipótesis de que la ganancia por precisión será mayor en el caso de las opciones *put* para divisas de monedas desarrolladas.

Este análisis solamente se pudo realizar para el caso de USD/EUR pues para el caso peruano solo se contaba con información de un tipo de opción. Se esperaba que la ganancia en precisión de utilizar el modelo de Heston sea menor para el caso de las opciones *put*, debido a la poca pendiente del *smile* de volatilidad para el lado de las opciones *put out-of-the-money*, y esto se corroboró cuando el modelo de volatilidad constante arrojó menores niveles de error para estas opciones.

Además, se realizó el mismo análisis para el delta de las opciones, que se muestra en el anexo 8.3.1 para el caso USD/EUR. Se observa que los niveles de error presentados por Garman y Kohlhagen son relativamente pequeños para las opciones *deep-out-of-the-money*, y esto mismo sucede para el caso



de Heston, en donde las opciones *out-of-the-money* también presentan niveles de error bajos.

Por su parte, del análisis estadístico se concluye que las ganancias por utilizar el modelo de volatilidad estocástica son menores para las opciones *deep-out-of-the-money* y *deep-in-the-money*, y son considerablemente más altas para las opciones *out-of-the-money* y *at-the-money*. Esto estaría rechazando la hipótesis de que la ganancia por utilizar el modelo de Heston será menor en las opciones *at-the-money*.

Para el caso peruano, se observa alta precisión al utilizar el modelo de Heston para las opciones *deep-out-of-the-money*, lo que sería un indicio de que para este tipo de opción el modelo de volatilidad estocástica logra capturar la dinámica de esta sección del *smile* para el caso peruano.

Finalmente, se realizó un estudio econométrico para evaluar el ajuste de los precios estimados por los modelos con relación al precio de mercado. Cabe resaltar que este análisis se realizó solo para el caso de USD/EUR, ya que se consideró que como solo se contaba con 16 observaciones para las opciones sobre el nuevo sol, un análisis econométrico no tendría robustez. En el anexo 9 se presentan los resultados de las regresiones lineales y se observa que para ambos modelos los precios estimados son significativos para explicar los precios de mercado, por lo tanto el precio estimado contiene información acerca del precio del mercado. Un análisis comparativo demuestra que el modelo de Heston presenta un mejor ajuste debido a que cuenta con un R^2 más alto y criterios de información inferiores, comparados con el ajuste del modelo de Garman y Kohlhagen.

Asimismo, con el objetivo de analizar si el precio de los modelos es un estimador insesgado del precio de mercado, se debería probar que la constante de la regresión es igual a cero y el beta de la regresión debería ser uno. Para probar esto se utilizó el test de Wald, cuyos resultados se observan en el anexo 10. Utilizando el indicador del estadístico F, se rechaza la hipótesis conjunta para ambos modelos. Esto indica que a pesar de que las regresiones presentan altos niveles de ajuste, ningún modelo logra recoger perfectamente el precio de mercado.

Para terminar, el análisis de los correlogramas de los residuos de las regresiones, presentados en el anexo 11, corrobora los resultados de la prueba de Wald. En



este caso se buscaba que los errores fueran ruido blanco y por lo tanto no exista autocorrelación, para así asegurar que el precio del modelo es un estimador eficiente. Sin embargo, como se observa, se rechaza esta hipótesis pues existe alta autocorrelación de los errores de ambas regresiones. Se podría concluir que los modelos llevan a una buena aproximación de los precios de mercado, pero el ajuste no es exacto, y dada la sofisticación en este mercado, no contar con los precios correctos de las opciones podría significar pérdidas financieras considerables.

6. Conclusiones y limitaciones

El análisis de hechos estilizados realizado para este estudio lleva a confirmar la presencia de *smiles* de volatilidad tanto en el caso de opciones sobre USD/EUR como sobre PEN/USD. Sin embargo, la forma del *smile* de volatilidad no es igual en ambos, ya que varía en términos de pendiente, asimetría y dinámica del tiempo al vencimiento.

Una de las principales conclusiones del trabajo es que según los estadísticos, para el caso de las opciones sobre USD/EUR, el modelo de Heston es claramente superior al modelo de Garman y Kohlhagen. Sin embargo, este patrón está invertido para el caso peruano, pues los estadísticos llevan a señalar al modelo de volatilidad constante como el que se ajusta más a la realidad. Esto llevaría a aceptar la hipótesis de que Heston logra capturar la dinámica de los mercados pero solo en el caso de divisas para países desarrollados. Esta aceptación no puede ser extendida para el caso de un mercado emergente como el peruano.

Además, en el caso del mercado desarrollado, la ganancia por utilizar el modelo de volatilidad estocástica es mayor para las opciones de corta duración, y para las opciones de largo plazo los precios estimados de ambos modelos muestran cierta convergencia. Esto llevaría a recomendar a los agentes utilizar exclusivamente el modelo de volatilidad estocástica para valorizar las opciones de corto plazo, pero si es que no cuentan con las herramientas para estimar este tipo de modelos, utilizar el supuesto de volatilidad constante podría ser una buena aproximación para el caso de las opciones de largo plazo.

Para el mercado peruano, se observa también alta precisión al utilizar el modelo de Heston para opciones de corta duración. Sin embargo, se resalta la alta prima por riesgo que exigen los agentes de mercado por ofrecer opciones de



largo plazo, ya que ambos modelos subestiman las primas de las opciones con estas características.

Por su parte, el estudio realizado no permite afirmar la hipótesis de que en los mercados desarrollados los modelos de volatilidad estocástica logren predecir de manera correcta las opciones *put*, como sugería la literatura. Cabe resaltar que para el caso peruano, se confirma que dada la menor pendiente del *smile* por el lado de las opciones *put out-of-the-money*, era de esperarse que el modelo de volatilidad constante logre recoger la información del mercado.

Asimismo, no se pudo aceptar la hipótesis de que para el caso de las opciones *at-the-money*, el modelo de Garman y Kohlhagen logre predecir los precios de mercado. El análisis mostró altas divergencias entre los precios sugeridos por ambos modelos, y era el modelo de Heston el que ofrecía mejores resultados.

Finalmente, el análisis econométrico que se realizó para el mercado de las opciones sobre el euro llevó a afirmar que los precios estimados por cada modelo se ajustan a los precios en el mercado pero en ningún caso la aproximación es exacta. Además, este análisis lleva a preferir al modelo de Heston por encima del modelo de Garman y Kohlhagen.

Por lo tanto, la principal recomendación de este estudio es que los agentes deberían utilizar el modelo de Heston para opciones sobre divisas de mercados desarrollados y limitarse a utilizar el modelo de volatilidad constante solo para los casos de opciones de larga duración. Sin embargo, para el caso de opciones sobre divisas de países emergentes no se puede, en principio, descartar el uso de modelos de volatilidad constante, por lo menos a la hora de valorizar las opciones *put out-of-the-money*.

Una de las principales limitaciones de este trabajo fue la restricción de data disponible. Para el caso del euro, no se contó con información de períodos pasados y podría resultar interesante realizar un análisis similar comparando un contexto de crisis económica mundial con períodos de expansión, para evaluar cómo responden los modelos a estas situaciones y a los cambios en la dinámica de la volatilidad.

Para el caso peruano, la limitación en cuanto a data se debió a la falta de información pública al respecto, lo que llevó a contar con muy pocas ob-



servaciones proporcionadas por un solo agente del mercado. Además, sería importante complementar este análisis con información de opciones *call* y de opciones *at-the-money* e *in-the-money* que no pudieron ser proporcionadas por la entidad financiera.

Además, según Rodríguez (2013), desde el 14 de septiembre de 2012 el Banco Central de Reserva del Perú anunció que cambiaría su modalidad de intervención en el mercado cambiario con el objetivo de crear mayor volatilidad al comprar dólares independientemente si el tipo de cambio presenta un proceso de apreciación o depreciación. En los últimos meses se ha visto un incremento considerable en el nivel de volatilidad de este mercado, por lo que sería interesante realizar un estudio del cambio de la dinámica de la volatilidad de las opciones para data del año 2013 y evaluar cómo los modelos logran capturar este cambio en la dinámica del activo subyacente.

Dado que para el caso peruano, durante el período de estudio el Banco Central intervenía activamente para evitar la volatilidad del tipo de cambio *spot*, y ha reducido su nivel de participación en el mercado en los últimos meses, sería importante incluir en el análisis opciones pactadas en este último período, pues las inferencias sobre la volatilidad constante que se recogen en este estudio podrían ya no ser válidas.

A su vez, este estudio se beneficiaría de constantes actualizaciones pues las expectativas y comportamientos de los agentes no son estáticos sino que varían en el tiempo, lo que puede afectar la dinámica de la volatilidad y por lo tanto qué tan bien se ajustan los modelos a los precios de mercado. Asimismo, este análisis está sujeto a los supuestos que se realicen con relación a las tasas libres de riesgo, así como el tipo de cambio *spot*. Para este trabajo se utilizó el tipo de cambio de cierre del mercado, pero si existió alta volatilidad durante el día, las opciones negociadas ese día podrían haber sido pactadas sobre un tipo de cambio *spot* distinto.

Finalmente, resultaría interesante incorporar en el análisis modelos que vayan más allá de la volatilidad estocástica e incluyan procesos de «saltos», que logran captar algunas dinámicas en el mercado de divisas que se producen a raíz de devaluaciones o movimientos abruptos en los mercados.



Referencias

ARREGUI, Gerardo

- 2004 «Los modelos implícitos de valoración de opciones». En: *Cuadernos de Gestión*, vol. 4, N.º 2, pp. 77-93. Universidad del País Vasco.

BANK FOR INTERNATIONAL SETTLEMENTS

- 2013 «Semiannual OTC Derivatives Statistics at End-December 2012». Fecha de consulta: 18 de mayo de 2013. <<http://www.bis.org/statistics/derstats.htm>>.

BATAILLE, Stephane

- 2013 «FX Options Vol Color». En: *Citi FX Wire*. Londres.

BLACK, Fischer y Myron SCHOLES

- 1973 «The Pricing of Options and Corporate Liabilities». En: *JSTOR. The Journal of Political Economy*, vol. 81, Chicago, pp. 637-54.

BOLLEN, Nicolas y Emma RASIEL

- 2003 «The Performance of Alternative Valuation Models in the OTC Currency Options Market». En: *Journal of International Money and Finance*, vol. 22, pp. 33-64.

CARR, Peter y Liuren WU

- 2004 *Stochastic Skew in Currency Options*. Center for Financial Econometrics. Nueva York: NYU Stern, Salomon Center for the Study of Financial Institutions.

CARRASCO, José Antonio

- 2008 «Smile de volatilidad como criterio predictor de futuros movimientos del subyacente en opciones de moneda: revisión del caso chileno y japonés». Tesis de grado de Magister en Economía. Pontificia Universidad Católica de Chile.

CHALAMANDARIS, Georgios y Andrianos TSEKREKOS

- 2009 «Common Factors and Casuality in the Dynamics of Implied Volatility Surfaces: Evidence from the FX OTC Market». En: *Journal of Economic Asymmetries*, vol. 6, Athens University of Economics and Business, pp. 49-74.

CHESNEY, Marc y Louis SCOTT

- 1989 «Pricing European Currency Options: A Comparison of the Modified Black-Scholes Model and a Random Variance Model». En: *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, vol. 24, Urbana-Champaign, pp. 267-84.

CHRISTENSEN, B. J. y N. R. PRABHALA

- 1998 «The Relation between Implied and Realized Volatility». En: *Journal of Financial Economics*, vol 50, pp. 125-50.

DAAL, Elton y Dilip MADAN

- 2005 «An Empirical Examination of the Variance-Gamma Model for Foreign Currency Options». En: *Journal of Business*, vol. 78, Chicago, pp. 2121-52.



FRANK, David y Daniele CAPORALETTI

2011 «Creating Volatility Surfaces» En: *Bloomberg Markets*, pp. 135-7.

GARMAN, Mark y Steven KOHLHAGEN

1983 «Foreign Currency Option Values». En: DEROSA, David (ed.). *Currency Derivatives*. Canadá: Financial Engineering, pp. 59-66.

GENÇAY, Ramazan y Aslihan SALIH

2003 «Degree of Mispricing with the Black-Scholes Model and Nonparametric Cures». En: *Analysis of Economics and Finance*, vol. 4. Pekin: Peking University Press, pp. 73-101.

GÓMEZ, Andrés

2010 «Estimación de una superficie de volatilidades para las opciones sobre la tasa de cambio USD/COP». En: *Análisis: Revista del Mercado de Valores*, vol. 1. Bogotá: Autorregulador del Mercado de Valores de Colombia (AMV), pp. 85-116.

HESTON, Steven

1993 «A Closed-Form Solution for Options with Stochastic Volatility with Applications to Bond and Currency Options». En: *JSTOR. The Review of Financial Studies*, vol. 6. New Haven: Oxford University Press.

HULL, John y Alan WHITE

1987 «The Pricing of Options on Assets with Stochastic Volatilities» En: *JSTOR. The Journal of Finance*, vol. 42, pp. 281-99.

QUANT FX / CREDIT / COMMODITY DERIVATIVES GROUP

2011 «FX Volatility Surface Construction». En: *Bloomberg*.

RODRÍGUEZ, Francisco

2013 «GEMs Paper #12». En: *BofA Merrill Lynch Global Research*, pp. 108-11.

SANDILYA, Arindam y Matthias BOUQUET

2010 «Introduction to Foreign Exchange Options». En: *Global FX Strategy*. J.P. Morgan Chase Bank.

THE OPTIONS GUIDE

2009 «Moneyness». Fecha de consulta: 23 de noviembre de 2012. <<http://www.theoptionsguide.com/moneyness.aspx>>.

TOMPKINS, Robert

2001 «Implied Volatility Surfaces: Uncovering Regularities for Options and Financial Futures». En: *The European Journal of Finance*, vol 7. pp. 198-230.

UCAR, Sibel y Liis KIVILA

2009 «Stochastic Volatility Models with Applications to Volatility Derivatives». University of Aarhus.

VILLAMIL, Jaime

2006 «Modelos de valorización de opciones europeas en tiempo continuo». En: *Cuadernos de Economía*, vol. 25, Bogotá, pp. 177-96.



¿Logra el modelo de Heston captar la dinámica de la volatilidad en los mercados de opciones sobre divisas mejor que el modelo de Garman y Kohlhagen? Un análisis para opciones sobre USD/EUR y PEN/USD

WINKLER, Gunter; Thomas APEL y Uwe WYSTUP

2001 «Valuation of Options in Heston's Stochastic Volatility Model Using Finite Element Methods». En: *Foreign Exchange Risk*. Londres: Risk Publications.

YEKUTIELI, Iddo

2004 «Implementation of the Heston Model for the Pricing of FX Option». En: *Bloomberg Financial Markets* (BFM).



Anexos

Anexo 1

Modelo de Garman y Kohlhagen

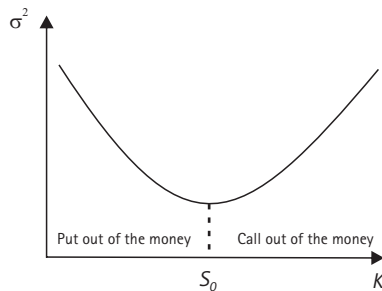
Ecu. 1	Fórmula de valorización para una opción <i>call</i> europea
	$C(S, T) = e^{-qT} SN(x + \sigma\sqrt{T}) - e^{-rT} KN(x)$ $X = \frac{\ln(\frac{S}{K}) + (r - q - (\frac{\sigma^2}{2}))T}{\sigma\sqrt{T}}$

Donde la notación es la siguiente:

- S: precio *spot* de la moneda (unidades domésticas por unidad de moneda extranjera).
 K: precio del ejercicio (*strike*) de la opción (unidades domésticas por unidad de moneda extranjera).
 T: tiempo al vencimiento de la opción.
 C(S,T): el precio de una opción *call* (unidades domésticas por unidad de moneda extranjera).
 r: tasa de interés doméstica (libre de riesgo).
 q: tasa de interés extranjera (libre de riesgo).
 σ : volatilidad del precio *spot* de la moneda.
 N(.): función de distribución acumulada normal.

Anexo 2

Smile de volatilidad



K corresponde al *strike price* de la opción y S_0 al valor *spot* del subyacente

Fuente: Carrasco (2008).



Anexo 3

Modelo de valorización de Heston

Ecu. 2	Fórmula de valorización para una opción europea de Heston
	$P = \phi \left(e^{-qt} S_0 \Pi_1 - e^{-rt} K \Pi_2 \right)$ $\Pi_1 = \frac{1}{2} + \frac{\phi}{\pi} \int_0^{\infty} R \left(\frac{e^{-iu \ln K H(u, T)}}{iu H(-i, T)} \right) du$ $\Pi_2 = \frac{1}{2} + \frac{\phi}{\pi} \int_0^{\infty} R \left(\frac{e^{-iu \ln K H(u, T)}}{iu} \right) du$

Siguiendo la notación a continuación:

H: función característica del modelo de Heston.

ϕ : parámetro que toma el valor de 1 para una opción *call* y -1 para una opción *put*.

i: raíz cuadrada de -1.

Anexo 4

Ejemplo de volatilidades implícitas

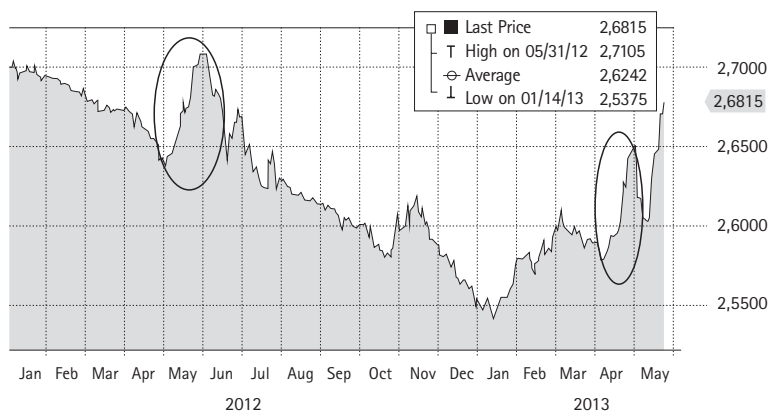
EURUSD		Hoy		Día previo				Porcentaje	
DNS/ATM	Live	LON	Open	NY	Close	LON	Open	6-month	5-year
IW	7,80	⇒	0,00	↑↑	0,40	↓↓	-0,70	28%	3%
IM	8,10	⇒	0,00	⇒	-0,20	⇒	0,40	68%	8%
3M	8,20	⇒	0,00	⇒	0,00	↓↓	-0,20	65%	7%
6M	8,40	⇒	0,00	⇒	0,00	↓↓	-0,20	60%	6%
1Y	8,80	⇒	0,00	⇒	0,00	↓↓	-0,20	39%	3%
2Y	9,40	⇒	0,00	⇒	0,00	↓↓	-0,10	28%	3%
5Y	10,30	⇒	0,00	⇒	0,00	⇒	0,00	31%	10%
25dRR									
1W	-0,60	⇒	0,00	⇒	0,10	⇒	0,20	5%	24%
1M	-0,90	⇒	0,00	⇒	0,10	⇒	0,10	24%	36%
3M	-1,20	⇒	0,00	⇒	0,10	⇒	0,10	17%	33%
6M	-1,50	⇒	0,00	⇒	0,00	⇒	0,00	8%	26%
1Y	-1,70	⇒	0,00	⇒	0,00	⇒	0,00	1%	25%
2Y	-1,70	⇒	0,00	⇒	0,00	⇒	0,00	0%	24%
10d Fly									
IM	0,50	⇒	0,00	⇒	-0,00	⇒	0,00	30%	15%
3M	0,70	⇒	0,00	⇒	0,00	⇒	0,00	59%	7%
6M	0,90	⇒	0,00	⇒	0,00	↓↓	0,00	55%	6%
1Y	1,10	⇒	0,00	⇒	0,00	⇒	0,00	32%	3%
2Y	1,10	⇒	0,00	⇒	0,00	⇒	0,00	14%	1%

Fuente: Bataille (2013).



Anexo 5

Evolución del tipo de cambio PEN/USD, entre enero de 2012 y mayo de 2013

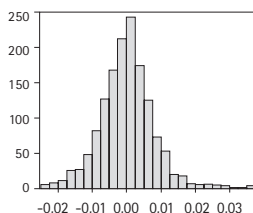
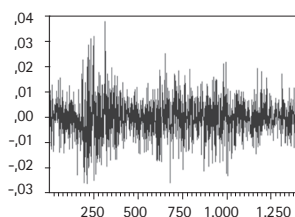


Fuente: Bloomberg. Fecha de consulta: 25 de mayo de 2013.

Anexo 6

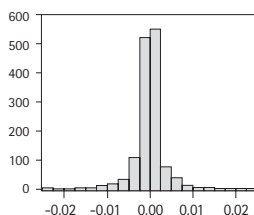
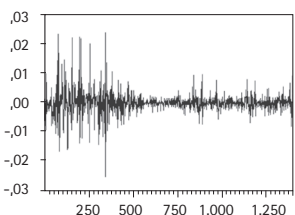
Retornos logarítmicos

Retornos de USD/EUR en un plazo de 5 años



Serie:	
Sample	1 1.403
Observations	1.403
Mean	-6,54e-05
Median	650e-05
Maximum	0,035262
Minimum	-0,024045
Std. Dev.	0,007191
Skewness	0,137012
Kurtosis	4,316169
Jarque-Bera	105,6570
Probability	0,000000

Retornos de PEN/USD en un plazo de 5 años



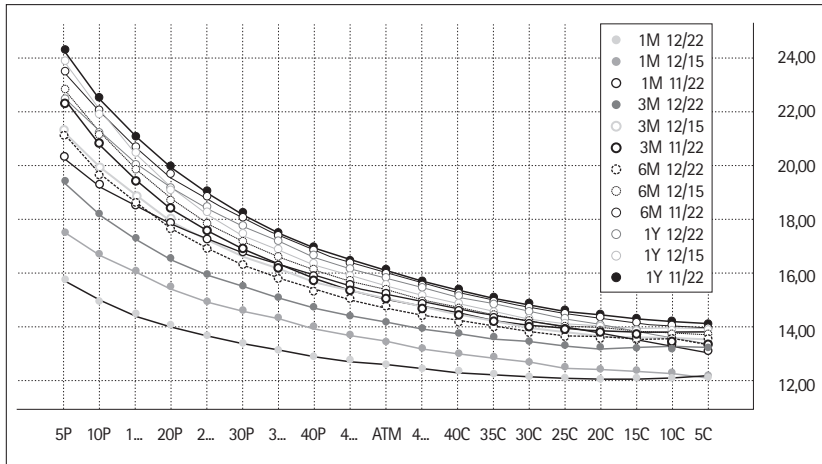
Serie:	
Sample	1 1.389
Observations	1.389
Mean	-8,16e-05
Median	0,000000
Maximum	0,023486
Minimum	-0,024848
Std. Dev.	0,003470
Skewness	0,725829
Kurtosis	14,61451
Jarque-Bera	7.929,09
Probability	0,000000



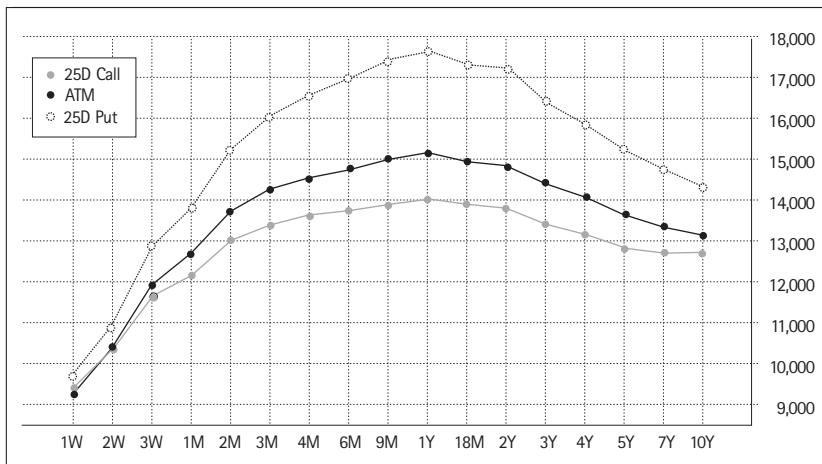
Anexo 7

Volatilidades implícitas

Volatilidad implícita de las opciones USD/EUR con relación al *moneyness*
(matriz del 22 de diciembre de 2011)

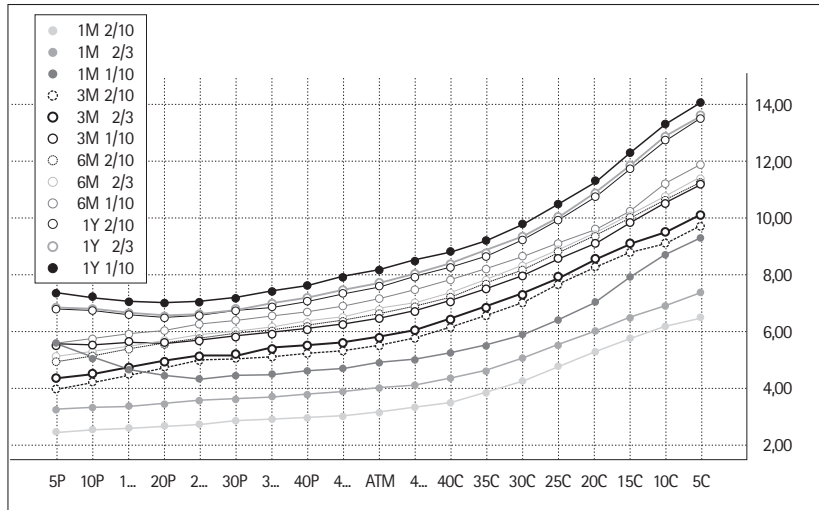


Volatilidad implícita de las opciones USD/EUR con relación al plazo
(matriz del 22 de diciembre de 2011)

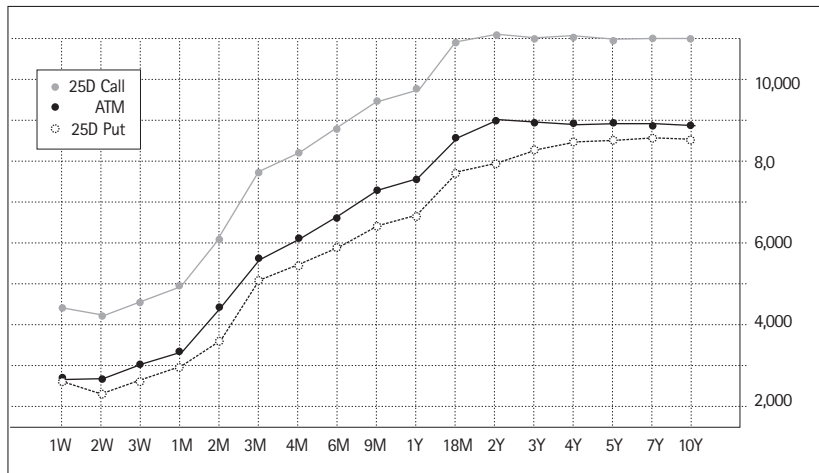




Volatilidad implícita de las opciones PEN/USD con relación al *moneyness*
(matriz del 10 de febrero de 2012)



Volatilidad implícita de las opciones PEN/USD con relación al plazo
(matriz del 10 de febrero de 2012)



Fuente: Bloomberg. Fecha de consulta: 25 de mayo de 2013.

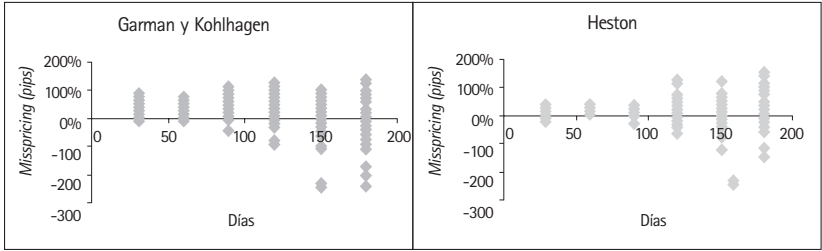


¿Logra el modelo de Heston captar la dinámica de la volatilidad en los mercados de opciones sobre divisas mejor que el modelo de Garman y Kohlhagen? Un análisis para opciones sobre USD/EUR y PEN/USD

Anexo 8
Análisis gráfico de factores

8.1 Tiempo al vencimiento

8.1.1 Opciones para USD/EUR

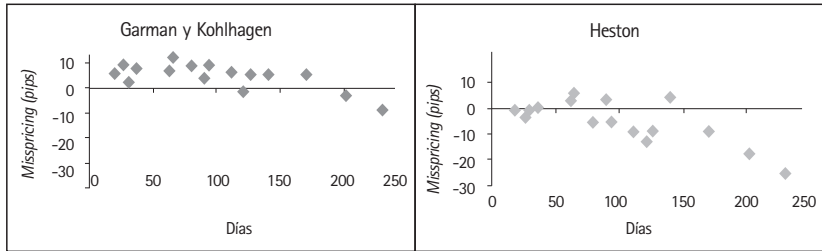


Elaboración propia.

Desviación absoluta promedio por plazo al vencimiento

Plazo al vencimiento	30	60	90	120	150	180
Garman y Kohlhagen	0,0040	0,0042	0,0044	0,0054	0,0047	0,0067
Heston	0,0016	0,0016	0,0016	0,0031	0,0033	0,0045

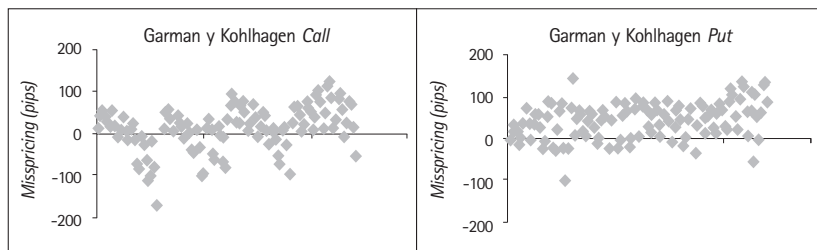
8.1.2 Opciones para USD/EUR



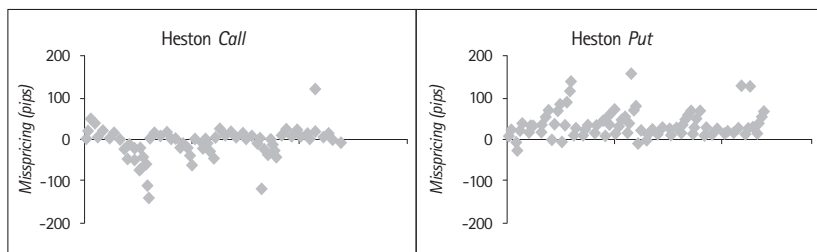
Elaboración propia.



8.2 Opciones *call* frente a opciones *put* (opciones para USD/EUR)



Elaboración propia.



Elaboración propia.

Desviación absoluta promedio comparativa

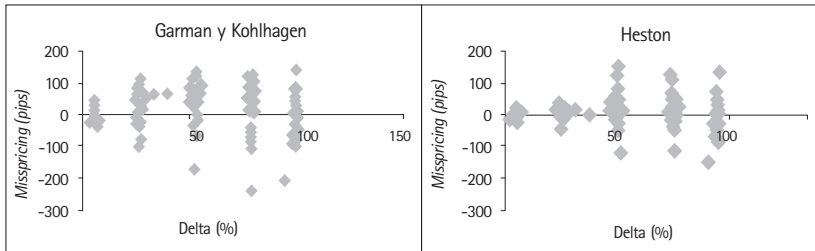
Desviación absoluta promedio	<i>Call</i>	<i>Put</i>
Garman y Kohlhagen	0,0046	0,0044
Heston	0,0018	0,0035



¿Logra el modelo de Heston captar la dinámica de la volatilidad en los mercados de opciones sobre divisas mejor que el modelo de Garman y Kohlhagen? Un análisis para opciones sobre USD/EUR y PEN/USD

8.3 Moneyness

8.3.1 Opciones para USD/EUR

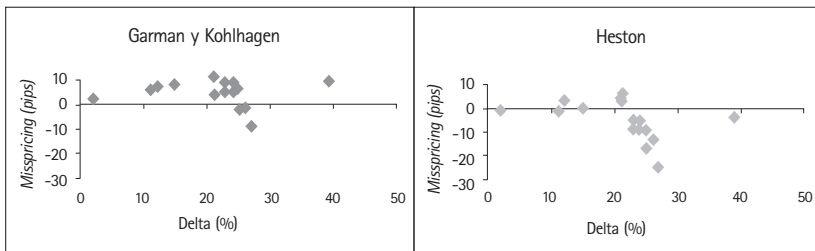


Elaboración propia.

Desviación absoluta promedio con relación al delta de la opción

Moneyness	DOTM	OTM	ATM	ITM	DITM
Garman y Kohlhagen	0,0016	0,0046	0,0046	0,0070	0,0050
Heston	0,0008	0,0008	0,0020	0,0034	0,0037

8.3.2 Opciones para PEN/USD



Elaboración propia.



Anexo 9

Regresión del precio de mercado con relación al precio estimado de Garman y Kohlhaugen y de Heston

Dependent Variable: MERCADO				
Method: Least Squares				
Date: 05/19/13 Time: 11:38				
Sample: 1.240				
Included observations: 240				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-33,29520	4,824270	-6,901604	0,0000
ESTIMADO_CONS	1,014169	0,007083	143,1808	0,0000
R-squared	0,988524	Mean dependet var		433,9958
Adjusted R-squared	0,988476	S.D. dependent var		512,7028
S.E. of regression	55,03937	Akaike info criterion		10,86227
Sum squared resid	720981,0	Schwarz criterion		10,89128
Log likelihood	-1301,473	Hannan-Quinn criter.		10,87396
F-statistic	20500,74	Durbin-Watson stat		0,704310
Prob (F-statistic)	0,000000			

Dependent Variable: MERCADO				
Method: Least Squares				
Date: 05/19/13 Time: 11:48				
Sample: 1.240				
Included observations: 240				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-14,60787	3,013163	-4,848018	0,0000
ESTIMADO_CONS	0,998691	0,004428	225,5288	0,0000
R-squared	0,995343	Mean dependet var		433,9958
Adjusted R-squared	0,995323	S.D. dependent var		512,7028
S.E. of regression	35,06299	Akaike info criterion		9,960468
Sum squared resid	292600,4	Schwarz criterion		9,989473
Log likelihood	-1193,256	Hannan-Quinn criter.		9,972155
F-statistic	50863,23	Durbin-Watson stat		0,782665
Prob (F-statistic)	0,000000			



Anexo 10

Test de Wald para el precio estimado por Garman y Kohlhagen y Heston

Wald Test: Equation: EQ_CONS			
Test Statistic	Value	df	Probability
F-statistic	30,38146	-2,238	0,0000
Chi-square	60,76291	2	0,0000
Null Hypothesis: $C(1)=0$, $C(2)=1$ Null Hypothesis Summary:			
Normalized Restriction ($=0$)		Value	Std. Err.
C(1)		-33,29520	4,824270
-1 + C(2)		0,014169	0,007083
Restrictions are linear in coefficients.			

Wald Test: Equation: EQ_HEST			
Test Statistic	Value	df	Probability
F-statistic	22,58257	-2,238	0,0000
Chi-square	45,16514	2	0,0000
Null Hypothesis: $C(1)=0$, $C(2)=1$ Null Hypothesis Summary:			
Normalized Restriction ($=0$)		Value	Std. Err.
C(1)		-14,607870	3,01316
-1 + C(2)		-0,001309	0,00442
Restrictions are linear in coefficients.			



Anexo 11

Correlograma de residuos para el estimado por Garman y Kohlhagen y Heston

Date: 05/25/13		Time: 10:31				
Sample: 1.240						
Included observations: 240						
Autocorrelation	Partial Correlation		AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1	0,644	0,644	100,64	0,000
		2	0,165	-0,425	107,30	0,000
		3	0,063	0,385	108,28	0,000
		4	0,369	0,443	141,77	0,000
		5	0,630	0,158	239,78	0,000
		6	0,396	-0,400	278,64	0,000
		7	0,061	0,267	279,55	0,000
		8	-0,009	-0,041	279,58	0,000
		9	0,213	-0,070	290,97	0,000
		10	0,420	0,126	335,41	0,000
		11	0,243	-0,167	350,41	0,000
		12	-0,017	0,038	350,48	0,000
		13	-0,076	0,018	351,96	0,000
		14	0,097	-0,046	354,38	0,000
		15	0,256	-0,037	371,27	0,000
		16	0,119	0,001	374,94	0,000
		17	-0,076	0,007	376,44	0,000
		18	-0,085	0,087	378,33	0,000
		19	0,107	0,107	381,35	0,000
		20	0,273	0,025	401,06	0,000
		21	0,129	-0,139	405,48	0,000
		22	-0,067	0,133	406,68	0,000
		23	-0,075	0,001	408,20	0,000
		24	0,131	0,047	412,82	0,000
		25	0,306	0,051	438,05	0,000
		26	0,16	-0,097	445,01	0,000
		27	-0,043	0,061	445,52	0,000
		28	-0,034	0,150	445,82	0,000
		29	0,216	0,086	458,70	0,000
		30	0,426	0,044	508,96	0,000
		31	0,256	-0,109	527,15	0,000
		32	-0,001	0,056	527,15	0,000
		33	-0,071	-0,156	528,55	0,000
		34	0,112	-0,058	532,07	0,000
		35	0,307	0,064	558,78	0,000
		36	0,206	0,035	570,84	0,000



¿Logra el modelo de Heston captar la dinámica de la volatilidad en los mercados de opciones sobre divisas mejor que el modelo de Garman y Kohlhagen? Un análisis para opciones sobre USD/EUR y PEN/USD

Date: 05/25/13		Time: 10:39					
Sample: 1.240							
Included observations: 240							
Autocorrelation	Partial Correlation		AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	0,605	0,605	88,806	0,000	
		2	0,426	0,095	133,02	0,000	
		3	0,327	0,058	159,22	0,000	
		4	0,410	0,273	200,58	0,000	
		5	0,494	0,235	260,81	0,000	
		6	0,376	-0,095	295,89	0,000	
		7	0,294	0,009	317,40	0,000	
		8	0,263	0,051	334,70	0,000	
		9	0,270	-0,027	353,02	0,000	
		10	0,333	0,100	380,97	0,000	
		11	0,261	-0,040	398,19	0,000	
		12	0,210	-0,023	409,44	0,000	
		13	0,188	0,027	418,49	0,000	
		14	0,167	-0,052	425,62	0,000	
		15	0,196	0,012	435,51	0,000	
		16	0,170	0,016	442,99	0,000	
		17	0,188	0,067	452,18	0,000	
		18	0,183	0,025	460,95	0,000	
		19	0,201	0,079	471,61	0,000	
		20	0,254	0,112	488,70	0,000	
		21	0,214	-0,034	500,81	0,000	
		22	0,189	-0,012	510,29	0,000	
		23	0,211	0,086	522,17	0,000	
		24	0,221	-0,002	535,31	0,000	
		25	0,266	0,048	554,49	0,000	
		26	0,178	-0,085	563,11	0,000	
		27	0,202	0,073	574,22	0,000	
		28	0,298	0,188	598,53	0,000	
		29	0,360	0,090	634,14	0,000	
		30	0,454	0,210	691,04	0,000	
		31	0,322	-0,053	719,91	0,000	
		32	0,205	-0,174	731,62	0,000	
		33	0,212	-0,011	744,25	0,000	
		34	0,250	-0,036	761,91	0,000	
		35	0,325	0,007	791,91	0,000	
		36	0,253	0,019	810,08	0,000	