

É Possível Replicar a Volatilidade da Taxa de Câmbio com Instrumentos Transacionados no Mercado?

Ronny Kim Woo*

José Valentim Machado Vicente**

Claudio Henrique Barbedo***

Resumo

A volatilidade implícita é uma variável de forte interesse dos participantes do mercado, pois ela reflete expectativas dos agentes a respeito dos retornos futuros. No caso dos mercados de balcão de opções de dólar, cuja negociação é orientada pela volatilidade, é a variável mais importante. O trabalho verifica se as informações contidas no mercado de volatilidade implícita embutida nestas opções são explicadas por outras variáveis negociadas no mercado. Os resultados indicam que existem fontes de risco não negociáveis que afetam a volatilidade implícita. Dessa maneira, uma posição em volatilidade implícita da taxa de câmbio poderia ser uma forma indireta de olhar para expectativas do dólar no futuro não ponderadas pelas variáveis que diretamente são dependentes ou influenciam o preço desta moeda.

Palavras-chave: volatilidade implícita; opção de dólar; componentes principais.

Códigos JEL: G12; G13.

Abstract

The implied volatility is certainly an interesting indicator to help get a sense of the market, because it represents the amount of expected volatility the market is pricing. In over-the-counter exchange rate option, whose trading is volatility oriented, it is the most important variable. This work investigates whether information embedded in this implied volatility market are explained by other traded variables in the Brazilian market. The results show that there are sources of non-negotiable risk that influence this implied volatility. Therefore, exchange rate implied volatility can assist to understand the behavior of the derivatives indexed to dollar.

Keywords: implied volatility; exchange rate option; principal components.

Submetido em Março de 2009. Aceito em Julho de 2009. O artigo foi avaliado segundo o processo de duplo anonimato além de ser avaliado pelo editor. Editor responsável: Eduardo Facó Lemgruber. Este artigo é parte da dissertação de mestrado do primeiro autor.

*Mestre em Economia pelo IBMEC. E-mail: rwoo@modal.com.br

**Professor do IBMEC. E-mail: jvalent@terra.com.br

***Professor do IBMEC. E-mail: cbarbedo@ibmecrj.br

1. Introdução

Desde o trabalho seminal de Markowitz (1952), a volatilidade é uma variável importante no processo de tomada de decisões financeiras. Nesse sentido, Bollerslev et alii (1992) afirmam que a volatilidade é uma chave que permeia a maioria dos instrumentos financeiros, exercendo um papel central em diversas áreas econômicas. Nos últimos anos, diversos estudos têm mostrado que a volatilidade implícita contém maior conteúdo informativo que as volatilidades históricas.¹ Neste artigo, analisamos as fontes de risco negociáveis presentes na volatilidade implícita da taxa de câmbio da moeda americana.

A volatilidade implícita é uma variável de forte interesse dos participantes do mercado. Investidores, especuladores e órgãos reguladores podem obter informações importantes a partir da observação dessas volatilidades, pois elas refletem expectativas dos agentes a respeito dos retornos futuros. Exemplo deste interesse pela volatilidade implícita é a criação de índices tais como o VIX (calculado pela Chicago Mercantile Exchange – CME, e que reflete a volatilidade implícita dos ativos do S&P 500), VIMEX (calculado no Mercado Mexicano de Derivativos, e que representa a volatilidade implícita das ações da Bolsa do México) e o VXN (calculado também pela CME, e que reflete a volatilidade implícita dos papéis do NASDAQ 100). Garcia e Fernandes (2007) mostram uma importante aplicação decorrente destes instrumentos. Segundo os autores, a estratégia de *carry-trade*, na qual investidores tomam recursos emprestados em moeda com baixa taxa de juros para aplicá-los no mercado brasileiro, depende, não só do diferencial de juros, mas essencialmente da volatilidade cambial. Malz (2000) constata que as informações implícitas nos preços das opções podem funcionar como sinalizadores de eventos de stress para estes tipos de operações.

Apesar da longa existência de contratos de opção de dólar, há pouca pesquisa sobre a eficácia da aderência dos modelos de avaliação de opções aos preços de negociação da Bolsa de Mercadorias e Futuros (BM&F). Ohanian (2002) verifica a possibilidade do uso das volatilidades implícitas das opções de dólar da BM&F para gerenciamento de risco de carteiras. Entretanto, os resultados foram satisfatórios apenas para replicar os preços de algumas séries. Cunha Jr. e Lemgruber (2002) usam o modelo de taxas de juro e cupom estocásticos para apreçar opções de dólar no período de Janeiro de 1998 a Dezembro de 2001. No caso dos mercados de balcão, cuja negociação é orientada pela volatilidade, ou seja, o preço da opção tem importância acessória, não há pesquisas sobre as volatilidades implícitas negociadas.

No presente artigo, preenchemos uma lacuna na literatura de finanças no Brasil. Partindo de uma base de dados mais rica que a disponível na BM&F², verifi-

¹Ver, por exemplo, Xu e Taylor (1995), Jorion (1995), Amin e Ng (1997), Andersen e Bollerslev (1998), Campa et alii (1997), Christensen e Prabhala (1998), Bertucci (1999), Gwilym (2001), Andrade e Tabak (2001).

²Nossa base de dados consiste de opções de dólar negociadas no mercado de balcão e foram cedidas pela corretora Flow que é uma instituição centralizadora desse tipo de negócio. Essa base é

camos se as informações contidas no mercado de volatilidade implícita embutida nas opções de dólar são explicadas por outras variáveis negociadas no mercado. Esse procedimento tem por base a metodologia utilizada no modelo APT (Arbitrage Pricing Theory), originalmente formulado por Ross (1976).³ Os fatores observáveis usados são o câmbio spot (que pode ser substituído pelo mercado futuro de câmbio, para fins operacionais), o Ibovespa (uma carteira a vista de ações que também pode ser substituída pelo mercado futuro de índice) e a expectativa de juros para os próximos 12 meses (mercado de swap ou mercado futuro de taxa de juros – DI). Esse conjunto de variáveis forma o que se chama, no jargão do mercado financeiro, o “Kit Brasil”. Os resultados indicam que existem fontes de risco não negociáveis que afetam a volatilidade implícita. Em outras palavras, existem fontes de risco que influenciam a volatilidade implícita e que não estão presentes no “Kit Brasil”. Dessa maneira, uma posição em volatilidade implícita da taxa de câmbio poderia ser uma forma indireta de olhar para expectativas do dólar no futuro não ponderadas por outras variáveis negociadas no mercado. Como corolário desse resultado, temos que a idéia de que o “Kit Brasil” completa o mercado brasileiro é falsa. Embora o cupom cambial (mercado de FRA) não apresente mais a atratividade de outrora, em um segundo exercício, o incluímos no conjunto das variáveis explicativas do APT. Os resultados, apesar de revelarem uma melhora na capacidade de explicar a volatilidade implícita, ainda nos permitem afirmar que existem fontes de risco influenciando a volatilidade implícita e que não estão presentes em outros instrumentos financeiros transacionáveis.

Adicionalmente, através da análise de componentes principais (ACP) na estrutura a termo da volatilidade implícita das opções de dólar “at-the-money” (ATM), verificamos que apenas dois fatores explicam a quase totalidade da variação da volatilidade das opções negociadas. Esse resultado é bem próximo em espírito ao obtido por Litterman e Scheinkman (1991) para a estrutura a termo de taxas de juros. Isso indica que ferramentas de *hedge* e previsão já desenvolvidos para curva de juros, podem ser facilmente adaptadas para a estrutura de volatilidades.

O presente artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta as características da amostra. A Seção 3 cobre a metodologia do trabalho. Os resultados obtidos são apresentados e comentados na Seção 4, e a Seção 5 conclui o artigo.

2. Amostra

Os dados da volatilidade implícita foram cedidos pela Corretora Flow. O período escolhido é o posterior à desvalorização de janeiro de 1999, por julgarmos que o estudo ficaria prejudicado pela utilização de cotações influenciadas pelo

mais rica que aquela proveniente da BM&F, pois há mais negócios com opções cambiais no mercado de balcão do que no pregão da Bolsa.

³O APT é um modelo teórico que se baseia na hipótese de não arbitragem e que se colocou como alternativa teórica e empírica ao CAPM. A partir de uma hipótese sobre a geração dos retornos dos ativos, a inexistência de arbitragem leva a uma relação linear entre os retornos dos ativos.

controle do Banco Central.⁴ As observações correspondem ao período de janeiro de 2000 a julho de 2008, num total de 2220 observações (dados diários).

A volatilidade implícita é extraída através do modelo proposto por Garman e Kohlhagen (1983). Os contratos de opção em questão são do tipo europeu. Optamos por utilizar as volatilidades implícitas das opções at-the-money (ATM), ou seja, opções com 50% de delta, e com os seguintes vencimentos: 1, 3, 6, 12 e 24 meses.⁵ A escolha das opções ATM deve-se ao fato de que estas possuem: (i) prêmio de risco alto; (ii) gama máximo; (iii) emagrecimento (teta) máximo; (iv) vega máximo. Ou seja, são as mais sensíveis aos fatores de risco. Ao mesmo tempo, são as mais líquidas.

A Figura 1 apresenta o gráfico dos dados diários das volatilidades implícitas das opções ATM para as diferentes maturidades. Note que as séries de volatilidades implícitas são bastante correlacionadas. Geralmente, as volatilidades implícitas de opções com maturidades mais curtas apresentam níveis mais baixos. No entanto, quando as séries apresentam picos, os níveis mais altos de volatilidade implícita são oriundos das maturidades mais curtas, ou seja, há uma mudança na inclinação da estrutura a termo.

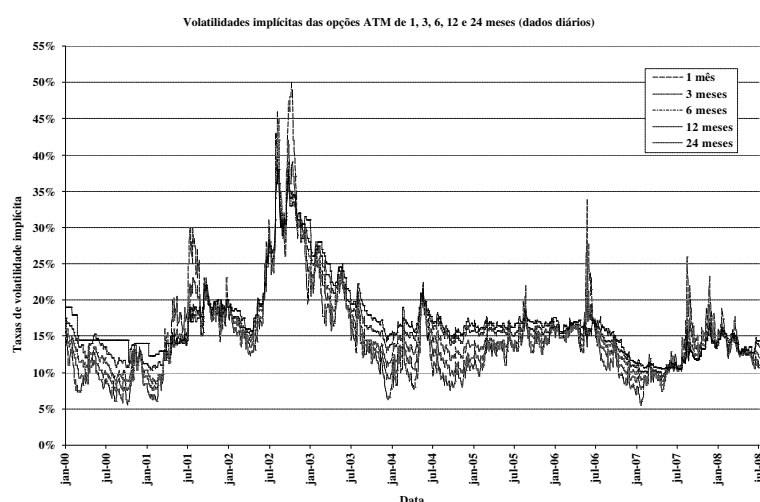


Figura 1
Volatilidades implícitas das opções de dólar ATM (dados diários)

⁴Souza et alii (2006) afirmam que entre abril de 1995 e julho de 2008 estiveram em vigor três regimes cambiais no Brasil. Inicialmente, vigorou o regime cambial com intrabandas. Este regime esteve em vigor no período de 06/03/1995 a 12/01/1999. No período de 13 a 15/01/1999, as intrabandas foram abolidas, e a partir de 18/01/1999 foi adotado o regime de câmbio flutuante.

⁵Quando não existem dados para um vencimento, o prêmio da opção foi obtido por interpolação linear entre os dois vencimentos adjacentes para o qual existem informações disponíveis.

Esta figura apresenta o gráfico da evolução temporal das volatilidades implícitas das opções de dólar com prazos de 1, 3, 6, 12 e 24 meses no período entre Janeiro de 2000 e Julho de 2008.

As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, a matriz de correlações e as estatísticas descritivas das volatilidades implícitas de 1, 3, 6, 12 e 24 meses, para dados em nível.⁶ A matriz de correlações na Tabela 1 indica forte dependência linear entre as séries. Quanto mais próximas estão as maturidades, mais alta é a correlação. Pela Tabela 2, nota-se que a estrutura a termo média é uma curva onde o nível de volatilidade implícita sobe à medida que a maturidade aumenta. Os dados de volatilidade implícita são positivamente assimétricos ($\text{Assimetria} > 0$) e leptocúrticos ($\text{Curtose} > 3$). Isso indica que a volatilidade implícita da taxa de câmbio não segue uma distribuição normal, o que é confirmado pela estatística de Jarque-Bera.

Tabela 1

Matriz de correlações das volatilidades implícitas de dólar

Esta tabela apresenta a matriz de correlação das volatilidades implícitas das opções de dólar ATM com prazos de 1, 3, 6, 12 e 24 meses. Os dados correspondem a observações de médias mensais no período de Janeiro de 2000 até Julho de 2008

Maturidades	1 mês	3 meses	6 meses	12 meses	24 meses
1 mês	1	0.9762	0.9333	0.8746	0.8335
3 meses	0.9762	1	0.9873	0.9511	0.9210
6 meses	0.9333	0.9873	1	0.9856	0.9631
12 meses	0.8746	0.9511	0.9856	1	0.9905
24 meses	0.8335	0.9210	0.9631	0.9905	1

⁶Nas tabelas que se seguem, optou-se pela utilização de dados de média mensal, já que as variáveis independentes escolhidas, descritas nas Tabelas 3 e 4, apresentaram forte heteroscedasticidade para dados diários. Contudo, os resultados revelaram-se equivalentes sob o ponto de vista da conclusão final do trabalho.

Tabela 2

Estatísticas descritivas das volatilidades implícitas de dólar

Esta tabela apresenta estatísticas descritivas das volatilidades implícitas das opções de dólar ATM com prazos de 1, 3, 6, 12 e 24 meses. Os dados referem-se a médias mensais e cobrem o período entre Janeiro de 2000 e Julho de 2008. Valor da estatística de Jarque-Bera maior que 5,99 rejeita a hipótese de dados distribuídos normalmente com 95% de confiança

Maturidades	1 mês	3 meses	6 meses	12 meses	24 meses
Média	0.1469	0.1493	0.1541	0.1625	0.1715
Mediana	0.1366	0.1398	0.1419	0.1558	0.1640
Máximo	0.4383	0.3698	0.3655	0.3414	0.3420
Mínimo	0.0675	0.0830	0.0905	0.0994	0.1061
Desvio padrão	0.0652	0.0562	0.0522	0.0491	0.0495
Assimetria	18.540	18.598	18.901	17.359	17.117
Curtose	77.594	72.178	71.403	62.617	60.874
Jarque-Bera	154.70	134.40	133.59	96.44	90.32
Nº de observações	102	102	102	102	102

Do terminal da Bloomberg, foram extraídos (referentes ao mesmo período da base de volatilidade implícita) os seguintes dados de fechamento das variáveis independentes dos modelos de replicação: série histórica do Ibovespa; série histórica do dólar comercial (taxa de câmbio de reais por dólar norte-americano); série histórica da expectativa do CDI para os 12 meses à frente (swap DI x PRÉ) e série histórica da expectativa do cupom cambial limpo para os 12 meses à frente.

As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, a matriz de correlações das variáveis independentes que serão usadas nos modelos de replicação e as estatísticas descritivas das mesmas, para dados de média mensal.

Tabela 3

Matriz de correlações das variáveis independentes

Esta tabela apresenta a matriz de correlação entre as variáveis Ibovespa, Dólar a vista, Juros para 12 meses e Cupom Cambial para 12 meses. Essas variáveis são usadas como variáveis independentes no nosso modelo. Os dados referem-se a médias mensais e cobrem o período entre Janeiro de 2000 e Julho de 2008

Variáveis	Ibovespa	Dólar	Juros	Cupom Cambial
Ibovespa	1	-0.5911	-0.7959	-0.3611
Dólar	-0.5911	1	0.6797	0.3796
Juros	-0.7959	0.6797	1	0.6467
Cupom Cambial	-0.3611	0.3796	0.6467	1

Tabela 4

Estatísticas descritivas das variáveis independentes

Esta tabela apresenta estatísticas descritivas das variáveis Ibovespa, Dólar a vista, Juros para 12 meses e Cupom Cambial para 12 meses. Essas variáveis são usadas como variáveis independentes no nosso modelo. Os dados referem-se a médias mensais e cobrem o período entre Janeiro de 2000 e Julho de 2008. Valor da estatística de Jarque-Bera maior que 5,99 rejeita a hipótese de dados distribuídos normalmente com 95% de confiança

Variáveis	IBOVESPA	Dólar	Juros	Cupom Cambial
Média	27,011.55	24.131	0.1818	0.0697
Mediana	21,761.91	23.065	0.1780	0.0537
Máximo	71,107.12	37.964	0.3124	0.3188
Mínimo	9,180.01	16.185	0.1082	0.0224
Desvio padrão	16,541.13	0.5233	0.0486	0.0549
Assimetria	10.639	0.5576	0.6574	27.866
Curtose	30.107	25.310	29.689	111.051
Jarque-Bera	19.24	6.22	7.35	411.20
Nº de observações	102	102	102	102

Observando a Tabela 4, verifica-se que os dados não seguem uma distribuição normal. De acordo com o teste Jarque-Bera, a hipótese nula de normalidade é rejeitada a um nível de significância de 5%. Note também que os dados de assimetria e curtose do cupom cambial limpo são semelhantes aos dados da volatilidade implícita, já que o cupom cambial limpo também é fortemente assimétrico (positivo) e possui valor positivo de curtose alto (leptocúrtico). Como será mostrado na Seção 4, esse fato nos ajudará a explicar os resultados encontrados no exercício empírico.⁷

3. Metodologia

3.1 Análise de componentes principais da estrutura a termo da volatilidade implícita

A análise de componentes principais (ACP) é um método de extração das principais fontes não correlacionadas de variação de um sistema multivariado. Ela reduz a dimensionalidade de um conjunto de dados que possui um grande número de variáveis colineares, preservando o máximo possível da variação presente no conjunto original. Desta forma, como destaca Alexander (2001), apenas as fontes mais importantes de informação são utilizadas. Esta redução é alcançada através da transformação ortogonal do conjunto de variáveis em um novo conjunto de variáveis, os componentes principais, não correlacionados, e que são ordenados de

⁷Embora toda a análise descritiva das variáveis tenha sido feita considerando dados em nível, do ponto de vista qualitativo, os resultados são equivalentes quando usamos os dados em primeira diferença. Por exemplo, a primeira diferença do cupom cambial é também leptocúrtica. Não apresentamos a análise descritiva das primeiras diferenças meramente por economia de espaço. No entanto, na Seção 4, para evitar problemas de não estacionariedade todas as variáveis foram diferenciadas.

maneira que os poucos primeiros contenham a maior parte da variação presente em todas as variáveis originais (Jolliffe, 2002). A eliminação da redundância advém da ortogonalidade dos componentes principais.

Tabela 5

Componentes principais do conjunto das volatilidades implícitas ATM

Esta tabela apresenta o resultado da análise de componentes das volatilidades implícitas de 1, 3, 6, 12 e 24 meses. A componente 1 representa o nível da curva e a componente 2, a inclinação da curva de volatilidade. A base de dados é constituída por 102 observações de média mensal no período entre Janeiro de 2000 e Julho de 2008

Componente Principal	1	2	3	4	5
Variância	1.48%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%
Participação	94.41%	5.13%	0.32%	0.11%	0.03%
Participação Acumulada	94.41%	99.53%	99.86%	99.97%	100.00%

A Tabela 5 apresenta os resultados da aplicação da ACP à estrutura a termo da volatilidade implícita ATM. O primeiro componente apresenta grande poder de explicação da variância, atingindo um percentual de participação de 94,41%. Os dois primeiros componentes principais em conjunto explicam mais de 99,50% da variância total.

A Figura 2 apresenta as cargas dos componentes principais para dados de média mensal. O primeiro componente, que explica aproximadamente 95% da variância total da amostra, representa mudanças paralelas da estrutura a termo da volatilidade implícita, ou seja, representa o nível da curva de volatilidade implícita. O segundo componente, que explica aproximadamente 5% da variância total da amostra, representa as mudanças na inclinação da curva de volatilidade implícita e o terceiro componente, apesar de ser pouco expressivo, é responsável pela curvatura da curva de volatilidade implícita.

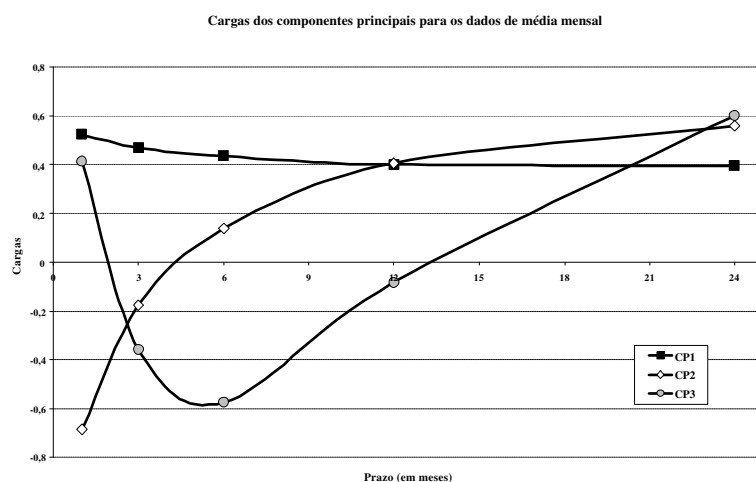
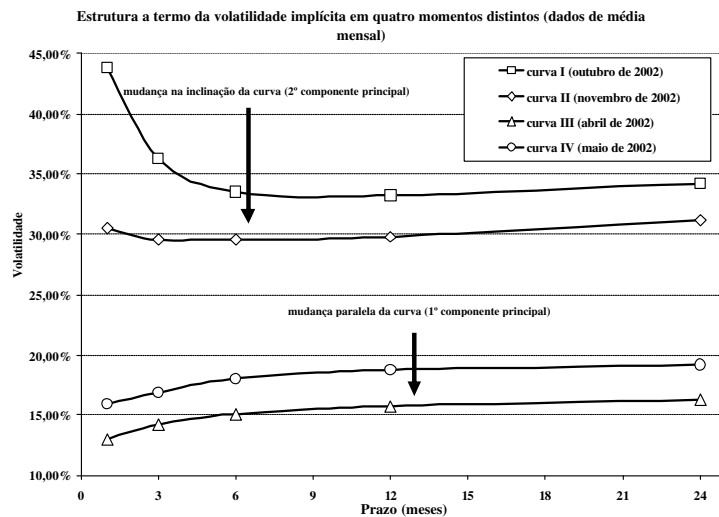


Figura 2
Cargas dos componentes principais

Interessante notar que os três componentes principais da estrutura a termo da volatilidade implícita são interpretados do mesmo modo que aqueles obtidos para a curva de juros, tal como observado inicialmente por Litterman e Scheinkman (1991). Dada essa semelhança, os modelos já consagrados baseados na análise de componentes principais da estrutura a termo de taxas de juros podem ser bastante úteis para os estudos relacionados à volatilidade implícita. Essa vasta literatura para taxas de juros, como modelos de previsão e *hedge* baseados na ACP, deve ser explorada em questões práticas associadas à volatilidade implícita.

A Figura 3 mostra a estrutura a termo da volatilidade implícita em quatro momentos distintos. O objetivo é ilustrar os dois movimentos mais significativos (primeiro e segundo componentes) extraídos da análise de componentes principais. O deslocamento da curva I (média de outubro de 2002) para a curva II (média de novembro de 2002) é um exemplo de movimento na inclinação da curva (segundo componente principal). O deslocamento da curva III (média de abril de 2002) para a curva IV (média de maio de 2002) é um exemplo de movimento paralelo da curva (primeiro componente principal). Os movimentos de inclinação forte da estrutura a termo da volatilidade implícita são observados em períodos de crise aguda, como o ocorrido, por exemplo, em outubro de 2002, decorrente da crise eleitoral.

**Figura 3**

Estruturas a termo da volatilidade implícita em quatro momentos distintos

A curva III (abril de 2002) na Figura 3 é um exemplo bem representativo da configuração média da estrutura a termo da volatilidade implícita durante o período de estudo. Entretanto, há momentos bastante distintos para o comportamento do nível e da inclinação da curva. Na parte empírica, apresentada a seguir, a investigação abrange todas as maturidades, de maneira a propiciar uma intervenção mínima do pesquisador nos resultados e de propiciar uma interpretação sobre a capacidade média de se replicar a volatilidade implícita.

3.2 Replicando a volatilidade implícita

Nessa etapa, busca-se verificar a capacidade de uma carteira, composta por variáveis negociáveis, replicar a volatilidade implícita embutida nas opções de dólar. Para isso, tomou-se por base a metodologia utilizada no modelo APT (*Arbitrage Pricing Theory*), originalmente formulado por Ross (1976). O APT é um modelo que se baseia na hipótese de não arbitragem. Do ponto de vista teórico, o modelo APT, diferentemente do CAPM (*Capital Asset Pricing Model*), não necessita de hipóteses acerca da distribuição dos retornos dos ativos nem sobre a estrutura de preferências dos indivíduos. O modelo vale para situações de desequilíbrio, bastando este não ser tal que se tenha na economia oportunidades de arbitragem.

No presente artigo as variáveis explicativas são compostas somente por variáveis negociáveis no mercado. Isso se deve ao fato de que, mais do que explicar, nós queremos saber se é possível negociar a informação contida na volatilidade implícita com instrumentos financeiros mais líquidos ofertados no mercado. Duas versões do modelo APT foram desenvolvidas para replicar as volatilidades implícitas ATM e suas duas primeiras componentes principais: (i) a versão 1 usa o câmbio, Ibovespa e expectativa de juros para os próximos 12 meses como fatores de risco; e (ii) a versão 2 usa apenas o Ibovespa e a expectativa de cupom cambial para os próximos 12 meses como fatores de risco.

Na versão 1, a escolha dos fatores de risco, câmbio, Ibovespa e expectativa de juros para os próximos 12 meses, se deu por causa da importância que tais variáveis possuem. Elas compõem o famoso “Kit Brasil”, ou seja, variáveis referências para as maiores exposições no mercado local. Quando as expectativas estão boas, o humor do mercado está alto e o cenário otimista é predominante, a compra do “Kit Brasil” torna-se o senso comum, ou seja, a compra do “Kit Brasil” significa ter exposição vendida em dólar (aposta de apreciação do Real), comprada em bolsa e vendida em juros (aposta que as taxas de juros futuras irão cair).

Na versão 2, as variáveis câmbio e expectativa de juros para os próximos 12 meses são substituídas por uma única variável: a expectativa de cupom cambial para os próximos 12 meses.⁸ Apesar de, a liquidez do mercado de cupom cambial ser um pouco menor que os mercados do “Kit Brasil”, ele é tão importante para os agentes econômicos quanto o câmbio, o Ibovespa e a expectativa de juros para os próximos 12 meses, já que ele mede a taxa de juros para aplicações em dólares no Brasil.

Essas quatro variáveis (câmbio, Ibovespa, expectativa de juros para os próximos 12 meses e expectativa de cupom cambial para os próximos 12 meses) são facilmente operadas no ambiente de negócios da BM&F. É possível montar posições na BM&F para apostar nos mercados de câmbio, bolsa (Ibovespa), juros e cupom cambial através dos respectivos instrumentos: dólar futuro, índice futuro, DI futuro de 12 meses e o FRA de 12 meses (mercado futuro de cupom cambial para 12 meses).

⁸Note que, por não arbitragem, vale a seguinte relação entre dólar spot (*DOLAR*), dólar futuro (*DOLFUT*), cupom cambial (*CCL*) e juros (*DI*): $DOLFUT = DOLAR \times \exp((DI - CCL) \times \text{prazo})$

Toda análise econométrica foi realizada através do software Eviews. Utiliza-se o teste de Dickey-Fuller aumentado para verificação da raiz unitária das variáveis. Com isso, constata-se que as quatro variáveis (câmbio, Ibovespa, expectativa de juros para os próximos 12 meses e expectativa de cupom cambial para os próximos 12 meses) se mostraram não estacionárias para o período considerado. De modo a evitar problemas estatísticos oriundos de não estacionaridade, optamos por tratar tais variáveis com a primeira diferença do seu logaritmo e, dessa maneira, as duas versões do modelo estão especificadas da seguinte maneira:

$$\text{Versão 1} \Rightarrow Y = \beta_1.DLDOLAR + \beta_2.DLIBOV + \beta_3.DLDI12M + C$$

$$\text{Versão 2} \Rightarrow Y = \beta_1.DLIBOV + \beta_2.DLCCL360 + C$$

onde Y , variável dependente, pode ser igual a:

DCP1 = primeira diferença do primeiro componente principal;

DCP2 = primeira diferença do segundo componente principal;

DVOL1M = primeira diferença da taxa de volatilidade implícita de 1 mês;

DVOL3M = primeira diferença da taxa de volatilidade implícita de 3 meses;

DVOL6M = primeira diferença da taxa de volatilidade implícita de 6 meses;

DVOL12M = primeira diferença da taxa de volatilidade implícita de 12 meses;

DVOL24M = primeira diferença da taxa de volatilidade implícita de 24 meses.

4. Resultados

As Tabelas 6 e 7 apresentam as regressões das versões 1 e 2 do nosso modelo. Os resultados indicam que as variáveis em conjunto, de cada versão, não são capazes de replicar a volatilidade implícita embutidas nas opções de dólar e também, como previsto, não são capazes de replicar os seus componentes principais (primeiro e segundo componente), já que as regressões apresentaram um R^2 baixo. A versão 2 apresenta resultados um pouco mais expressivos que a versão 1. Isso pode ser consequência da semelhança das estatísticas descritivas do cupom cambial e das volatilidades implícitas. Assim como a volatilidade implícita da taxa de câmbio, o cupom cambial também possui assimetria positiva forte e altos valores positivos de curtose, conforme visto na Seção 2. Apesar das versões 1 e 2 falharem em seus objetivos de replicar as volatilidades implícitas de 1, 3, 6, 12 e 24 meses, as variáveis independentes são, em sua maioria, estatisticamente significativas e com os sinais esperados

Note também que as duas versões do modelo apresentam poder explicativo ainda mais fraco na tentativa de replicar o segundo componente, já que, nos dois casos, as variáveis independentes se mostraram estatisticamente não significativas. Isso pode ser explicado pelo fato de que as mudanças na inclinação da curva de volatilidade implícita ocorrem sobretudo em períodos de crise aguda, ou seja, em momentos caracterizados pela irracionalidade, desalavancagem e movimentos de zeragem de posições (*stop loss*) e nestes momentos, há um intenso descasamento do movimento dos ativos, o que dificulta consideravelmente a previsão do comportamento de uma variável em função das demais.

Tabela 6

Resultados das regressões para a versão 1 do modelo

Esta tabela apresenta os resultados das regressões para a versão 1 do modelo. As variáveis dependentes são a primeira diferença do primeiro componente principal (DCP1); a primeira diferença do segundo componente principal (DCP2); as primeiras diferenças das volatilidades implícitas de 1 mês (DVOL1M), 3 (DVOL3M), 6 (DVOL6M), 12 (DVOL12M) e 24 (DVOL24M) meses. As variáveis independentes são as primeiras diferenças do dólar à vista (DLDOLAR), do Ibovespa (DLIBOV) e da expectativa de juros de 12 meses (DLDI12M). Os p-valores estão entre colchetes. Em negrito, valores significantes ao nível de 5%. A coluna Durbin-Watson apresenta a estatística de Durbin-Watson para o teste de autocorrelação entre os resíduos. Valores dessa estatística menores que 1,61 rejeitam a hipótese nula de resíduos não correlacionados

	DLDOLAR	DLIBOV	DLDI12M	C	R^2	Durbin-Watson
DCP1	0.3266 [0,0211]	-0.1321 [0,0941]	0.2041 [0,0206]	0.0022 [0,5656]	0.3648	1.885
DCP2 *	-0.0538 [0,5048]	-0.0092 [0,8498]	-0.0561 [0,3218]	-0.0004 [0,8015]	0.0638	22.242
DVOL1M	0.2255 [0,0408]	-0.0547 [0,3722]	0.1496 [0,0295]	0.0014 [0,6441]	0.2764	21.607
DVOL3M	0.1496 [0,0348]	-0.0674 [0,0886]	0.0996 [0,0242]	0.0011 [0,5484]	0.3472	18.017
DVOL6M	0.1057 [0,0670]	-0.0694 [0,0327]	0.0783 [0,0297]	0.001 [0,5081]	0.3531	1.783
DVOL12M	0.108 [0,0171]	-0.0605 [0,0172]	0.0619 [0,0277]	0.0008 [0,5065]	0.4139	16.998
DVOL24M	0.1242 [0,0069]	-0.044 [0,0842]	0.0509 [0,0722]	0.0004 [0,7459]	0.3613	16.807

*A segunda regressão foi a única que apresentou heteroscedasticidade (corrigida pelo método de White (1980)).

Tabela 7

Resultados das regressões para a versão 2 do modelo

Esta tabela apresenta os resultados das regressões para a versão 2 do modelo. As variáveis dependentes são a primeira diferença do primeiro componente principal (DCP1); a primeira diferença do segundo componente principal (DCP2); as primeiras diferenças das volatilidades implícitas de 1 mês (DVOL1M), 3 (DVOL3M), 6 (DVOL6M), 12 (DVOL12M) e 24 (DVOL24M) meses. As variáveis independentes são as primeiras diferenças do Ibovespa (DLIBOV) e do cupom cambial limpo de 360 dias (DLCCL360). Os p-valores estão entre colchetes. Em negrito, valores significantes ao nível de 5%. A coluna Durbin-Watson apresenta a estatística de Durbin-Watson para o teste de autocorrelação entre os resíduos. Valores dessa estatística menores que 1,61 rejeitam a hipótese nula de resíduos não correlacionados

	DLIBOV	DLCCL360	C	R^2	Durbin-Watson
DCP1	-0.2096 [0,0004]	0.1506 [0,0000]	0.0033 [0,3467]	0.4663	21.173
DCP2 *	0.0238 [0,5497]	-0.0164 [0,2251]	-0.0007 [0,6901]	0.0414	22.947
DVOL1M	-0.1252 [0,0091]	0.0911 [0,0000]	0.0022 [0,4419]	0.3164	23.505
DVOL3M	-0.1022 [0,0005]	0.0731 [0,0000]	0.0016 [0,3464]	0.4507	19.984
DVOL6M	-0.0889 [0,0002]	0.0615 [0,0000]	0.0013 [0,3260]	0.4839	19.746
DVOL12M	-0.0813 [0,0000]	0.0516 [0,0000]	0.0011 [0,2891]	0.5392	19.160
DVOL24M	-0.0628 [0,0005]	0.0533 [0,0000]	0.0007 [0,4905]	0.5105	18.361

*A segunda regressão foi a única que apresentou heteroscedasticidade (corrigida pelo método de White (1980)).

Os resultados indicam que as variáveis em conjunto, de cada versão, não são capazes de replicar a volatilidade implícita embutidas nas opções de dólar e também, como previsto, não são capazes de replicar os seus componentes principais (primeiro e segundo componente), já que as regressões apresentaram um R^2 baixo. A versão 2 apresenta resultados um pouco mais expressivos que a versão 1. Isso pode ser consequência da semelhança das estatísticas descritivas do cupom cambial e das volatilidades implícitas. Assim como a volatilidade implícita da taxa de câmbio, o cupom cambial também possui assimetria positiva forte e altos valores positivos de curtose, conforme visto na Seção 2. Apesar das versões 1 e 2 falharem em seus objetivos de replicar as volatilidades implícitas de 1, 3, 6, 12 e 24 meses, as variáveis independentes são, em sua maioria, estatisticamente significativas e com os sinais esperados.

Note também que as duas versões do modelo apresentam poder explicativo ainda mais fraco na tentativa de replicar o segundo componente, já que, nos dois casos, as variáveis independentes se mostraram estatisticamente não significativas. Isso pode ser explicado pelos ambientes de desconexão dos ativos, muito comuns em ambientes de crise. Geralmente, observam-se fortes mudanças na inclinação da curva de volatilidade implícita em períodos de crise aguda, ou seja,

em momentos caracterizados pela irracionalidade, desalavancagem e movimentos de zeragem de posições.

Logo, tais resultados levam a crer que as variáveis em conjunto, de cada modelo, não são capazes de replicar a volatilidade implícita embutidas nas opções de dólar com um grau razoável de confiança. Isto indica que existem fontes de risco do mercado de câmbio não negociáveis e que influenciam a formação da volatilidade implícita.

Uma das possíveis fontes de risco não negociáveis que influenciam na volatilidade implícita embutida nas opções de dólar são as intervenções cambiais esterilizadas promovidas pelo Banco Central do Brasil. Essa suposição de que as intervenções do Banco Central no mercado de câmbio podem afetar a volatilidade implícita embutida nas opções de dólar está baseada no fato de que a versão 2 do modelo (onde o Ibovespa e o cupom cambial tentam replicar a volatilidade implícita) apresenta resultados mais expressivos que a versão 1. A ligação disso está no fato de que o cupom cambial consegue captar os efeitos das intervenções melhor do que as outras variáveis analisadas, ou seja, o cupom cambial é mais sensível às intervenções do Banco Central do que as demais variáveis. Diógenes (2007), em sua dissertação de mestrado, fez um trabalho bastante atual sobre os efeitos das intervenções cambiais esterilizadas. A partir desse trabalho, pode-se dizer que as intervenções no mercado de dólar afetam o cupom cambial. O presente trabalho não tem como objetivo o aprofundamento nesse assunto. Entretanto, as intervenções no mercado a vista e de *swaps* cambiais do Banco Central é uma sugestão de variável para futuros estudos. A exploração dessa questão é muito interessante, já que a possibilidade de usar uma carteira que tenha capacidade de replicar uma fonte de risco não negociável seria de muita valia para os investidores. Por exemplo, conforme a suposição em questão, buscar *hedge* ou apenas especular com as intervenções cambiais usando uma carteira composta de operações de volatilidade implícita, de cupom cambial e renda variável (exposição ao Ibovespa) seria bastante interessante para os gestores de fundos.

5. Conclusão

O objetivo desse artigo foi verificar se as informações contidas no mercado de volatilidade implícita embutida nas opções de dólar são explicadas por variáveis negociadas no mercado. Trabalhou-se com volatilidades implícitas, extraídas através do modelo proposto por Garman e Kohlhagen (1983), de um período correspondente a janeiro de 2000 a julho de 2008.

Primeiramente, fizemos uma análise de componentes principais da estrutura a termo da volatilidade implícita. Verificamos que os dois primeiros componentes principais explicam mais de 99,50% da variância total, resultado semelhante ao obtido por esse mesmo tipo de análise em estruturas a termo de taxa de juros. Em seguida, tentamos replicar a volatilidade implícita com uma carteira composta por ativos transacionáveis. Os resultados não foram robustos. Isto pode significar que existem fontes de risco não negociáveis que influenciam a volatilidade implícita. A

carteira composta pelo Ibovespa e pelo cupom cambial limpo de 12 meses se saiu um pouco melhor que a carteira composta pelo Ibovespa, dólar comercial e juros de 12 meses. Dessa constatação e dada a relação mais direta entre o cupom cambial e as intervenções esterilizadas do Banco Central no mercado de câmbio, futuras pesquisas relacionadas às estas intervenções, como possíveis fontes de risco para a volatilidade do câmbio, se fazem necessárias.

Referências

- Alexander, C. (2001). Principal component analysis of implied volatility smiles and skews. EFMA 2001 Lugano Meetings.
- Amin, K. & Ng, V. (1997). Inferring future volatility from the information in implied volatility in eurodollar options: A new approach. *Review of Financial Studies*, 10:333–367.
- Andersen, T. G. & Bollerslev, T. (1998). Deutsche mark-dollar volatility: Intraday activity patterns, macroeconomic announcements, and longer run dependencies. *Journal of Finance*, 53(1):219–265.
- Andrade, S. C. & Tabak, B. M. (2001). Is it worth tracking dollar/real implied volatility? *Revista de Economia Aplicada*, 5:471–489.
- Bertucci, L. A. (1999). Avaliação de opções sob consideração de volatilidades históricas, implícitas e condicionadas – O caso Telebras na Bovespa. Tese (Doutorado em Administração) – Escola de Administração de Empresas de São Paulo: Fundação Getúlio Vargas. São Paulo.
- Bollerslev, T., Chou, R. Y., & Kroner, K. F. (1992). ARCH modeling in finance: A review of theory and empirical evidence. *Journal of Econometrics*, 52:5–59.
- Campa, J. M., Chang, P. H. K., & Reider, R. L. (1997). Implied exchange rate distributions: Evidence from OTC options markets. Working Paper 6179.
- Christensen, B. J. & Prabhala, N. R. (1998). The relation between implied and realized volatility. *Journal of Financial Economics*, 50:125–150.
- Cunha Jr., D. & Lemgruber, E. C. (2002). Opções de dólar no Brasil com taxas de juro e de cupom estocásticos. www.risktech.com.br.
- Diógenes, F. C. D. (2007). Efeitos sobre o câmbio das intervenções cambiais esterilizadas – O caso brasileiro de 2003 a 2006. Dissertação (Mestrado em Economia). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Garcia, M. G. P. & Fernandes, A. V. (2007). Diferencial de juros e carry-trade.
- Garman, M. B. & Kohlhagen, S. W. (1983). Foreign currency options values. *Journal of International Money and Finance*, 2(3):231–237.

- Gwilym, O. A. (2001). Forecasting volatility for options pricing for the U. K. stock market. *Journal of Financial Management and Analysis*, 14:55–62.
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, New York.
- Jorion, P. (1995). Predicting volatility in the foreign exchange market. *Journal of Finance*, 50:507–528.
- Litterman, R. & Scheinkman, J. (1991). Common factors affecting bond returns. *Journal of Fixed Income*, 1:54–61.
- Malz, A. M. (2000). Do implied volatilities provide early warning of market stress? *Risk Metrics Journal*, 1(1):41–60.
- Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *Journal of Finance*, 7(1):77–91.
- Ohanian, G. (2002). Modelo estatístico de estimativa de volatilidade implícita para opções de dólar americano negociadas no Brasil. Tese de Doutorado, USP.
- Ross, S. (1976). The arbitrage theory of capital asset pricing. *Journal of Economic Theory*, 13.
- Souza, S. R. S. d., Tabak, B. M., & Cajueiro, D. O. (2006). Investigação da memória de longo prazo da taxa de câmbio no Brasil. Trabalhos para Discussão nº 113 (Banco Central do Brasil).
- White, H. (1980). A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*, 48:817–838.
- Xu, X. & Taylor, S. J. (1995). Conditional volatility and the informational efficiency of the PHLX currency options markets. *Journal of Banking and Finance*, 19(5):803–821.