



SPOLM 2009

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 05 e 06 de agosto
de 2009.

050/2009 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A VOLATILIDADE DOS PREÇOS DO PETRÓLEO NO MERCADO INTERNACIONAL

Leonardo Mutzenbecher Rodriguez

Escola Politécnica / Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Cidade Universitária - Ilha do Fundão - Rio de Janeiro - RJ

leomutz@terra.com.br

Thiago José Dell'Armi Loures

Escola Politécnica / Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

dellarmi54@yahoo.com.br

André Assis de Salles

Escola Politécnica / Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

asalles@ind.ufrj.br

Resumo

Dada a sua importância estratégica, e a sofisticação dos instrumentos financeiros negociados atualmente, o petróleo atualmente é negociado de diversas formas. Dentre essas há os derivativos, em particular, contratos de opções e de futuros. Através de modelos de apreçamento de opções pode-se mensurar a volatilidade dos preços do petróleo no mercado internacional. O propósito deste trabalho é determinar o modelo de volatilidade, dentre os selecionados para a análise, que permita uma melhor aproximação na precificação da opção de compra do barril de petróleo, do tipo Brent e do tipo WTI, utilizando o Modelo de Black & Scholes. A amostra selecionada compreende informações coletadas de janeiro de 2007 até julho de 2008.

Palavras-Chaves: Preços do Petróleo; Modelo de Black & Scholes; Modelos de Volatilidade.

Abstract

Given the crude oil strategic importance, and the sophistication of the financial instruments negotiated nowadays, this commodity is negotiated in several forms. Among these forms there are the derivatives, in particular, options contracts and futures contracts. Through models for evaluation options contract is possible obtain a estimate for the volatility of crude oil prices in the international market. The aim of this work is to determine between various volatility models the one that provide the better estimate for the determination of the call option price of the crude oil barrel, to the type Brent and the type WTI, using the Black & Scholes model. The information used here is collected from January 2007 to July 2008.

Keywords: Crude Oil Prices; Black & Scholes Model; Volatility Models.

1. INTRODUÇÃO

Dada a sua importância estratégica, e a sofisticação dos instrumentos financeiros

negociados atualmente, o petróleo atualmente é negociado de diversas formas. Dentre essas há os derivativos: contratos de opções e contratos de futuros. Dentre essas muitas se referem aos mercados de derivativos, formado por *hedgers* e especuladores, que possibilitam proteção aos agentes econômicos no que se refere ao risco, ou a volatilidade futura dos preços do petróleo, assim como de outros ativos financeiros; e proporcionam liquidez aos mercados. Os mercados de derivativos, em particular, o mercado de opções de petróleo cresceu junto com o desenvolvimento e sofisticação do mercado financeiro. Além de ser uma fonte de energia essencial, para mundo contemporâneo, várias empresas dependem do petróleo, o que disseminou o uso de seus derivativos e, com isso, uma maior participação de especuladores nesse mercado, o que o torna muito líquido e dinâmico. Desse modo o mercado de opções foi escolhido como pano de fundo para esta pesquisa. Pois além de incluir muitos agentes econômicos movimenta um volume financeiro considerável.

Assim merecem destaque estudos e pesquisas que se reportam aos preços do petróleo no mercado internacional e, por conseguinte, do risco associado à negociação do petróleo. Este trabalho procura estudar o risco, ou volatilidade dos retornos, do petróleo no mercado internacional visando determinar o modelo mais adequado para quantificar o risco, ou medir a volatilidade, através da precificação de opções de compra de contratos de barris de petróleo negociados em bolsas de valores. Cabe, ainda, destacar a relevância da quantificação da volatilidade dos preços do petróleo para cadeia produtiva de diversos setores da economia, e no financiamento e investimento da produção.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: a seção 2, a seguir, descreve o objetivo do trabalho; na seção 3 é apresentada uma introdução ao mercado de opções e ao principal modelo utilizado para precificação de opções; a seção 4 trata de modelos de volatilidade, disponíveis na literatura de finanças, selecionados para utilização neste trabalho; a amostra utilizada está descrita na seção 5; e por último, na seção 6 são tratados os resultados obtidos e os comentários finais. Na seção 7, ao final do texto, estão listadas as referências bibliográficas.

2. OBJETIVO

O propósito deste trabalho é determinar um melhor modelo de volatilidade, dentre os selecionados para a análise, que defina uma melhor aproximação na precificação da opção de compra do barril de petróleo, do tipo Brent e WTI, utilizando o modelo sugerido por Black & Scholes (1973), como observado o principal e o mais difundido para a precificação de uma opção de compra do preço de opções. A partir de informações coletadas de janeiro de 2007 até julho de 2008.

3. MERCADO DE OPÇÕES E O MODELO DE BLACK & SHOLES

Para que os riscos das operações no mercado à vista sejam minimizados, os investidores procuram formas de atenuar a volatilidade do mercado através de operações nos mercados de derivativos, instrumentos financeiros cujo valor está ligado a um ativo subjacente: tangível ou não. Essas operações de proteção são designadas como operações de *hedge*. Um dos mercados de derivativos que apresenta um considerável volume de negócios é o mercado de opções. No mercado de opções são negociados direitos de compra e venda de ativos financeiros, o comprador de uma opção tem um direito, que pode ser de comprar, no caso das opções de compra – *call*, ou de vender, no caso das opções de venda – *put* (ver Hull (1998)). As negociações no mercado de opções estão calçadas em contratos que contemplam o preço de exercício e o prazo. O comprador de uma opção tem o direito de comprar, ou vender, uma determinada quantidade de mercadoria, ou de ativos financeiros tangíveis ou intangíveis, onde o preço e o prazo estão pré-definidos. Esses direitos são negociados a um preço, também conhecidos como prêmio, que é o valor do direito a ser pago pelo titular e a ser

recebido pelo lançador. A precificação do prêmio justo a ser pago por uma opção é função de várias variáveis, como por exemplo: preço no mercado à vista do ativo subjacente, taxa de juros praticada no mercado, preço a ser pago numa data futura quando do exercício da opção, tempo até a data exercício, e a volatilidade, ou risco do ativo subjacente.

Ao se realizar uma transação de compras de opções há que se definir um preço justo para o prêmio, ou o direito de compra ou venda de ativo em data futura. Black & Scholes (1973), em um dos mais importantes trabalhos da teoria de finanças, apresentaram um modelo que permite a avaliação do prêmio justo de uma opção. O Modelo de Black & Scholes propiciou uma revolução no mercado financeiro mundial e, em particular, no mercado de opções. Segundo Jorion (1997) a derivação do modelo de Black & Scholes é baseado nas seguintes premissas: (a) o preço do ativo coberto é contínuo e segue um caminho de processo aleatório, chamado movimento geométrico browniano; (b) a taxa referencial e variância são conhecidas e constantes; (c) os mercados de capitais são eficientes. O mesmo autor observa que na prática, o modelo provê uma boa aproximação para opções de títulos, de médio e longo prazo, cuja maturidade deve ser maior que a data de vencimento da opção. O modelo de Black & Scholes é mais utilizado na precificação das opções européias de compra, o que é dado através de cinco variáveis, que são: S , o valor atual do ativo-objeto; K , o preço de exercício da opção; t , o tempo até o vencimento da opção; r , a taxa de juros livre de risco; e σ^2 , a variância dos retornos do ativo subjacente. Assim, o valor da opção de compra c , ou de uma *call*, é dado por:

$$c = S N(d_1) - K e^{-rt} N(d_2)$$

onde

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)t}{\sigma\sqrt{t}}$$

$$d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{t}$$

Sendo $N(d_1)$ e $N(d_2)$ são probabilidades obtidas utilizando-se uma distribuição normal padronizada cumulativa e os valores d_1 e d_2 obtidos.

Conforme observado anteriormente, o modelo depende de cinco parâmetros. O preço do exercício e o tempo até o vencimento da opção estão definidos no contrato. O preço do ativo subjacente e a taxa livre de risco são facilmente observáveis no mercado. Enquanto a volatilidade é um parâmetro de difícil determinação. Atualmente existem vários modelos de cálculo de volatilidade, disponíveis na literatura de finanças, e não há um consenso no mercado sobre qual é a melhor forma de cálculo da volatilidade. Na seção seguinte são listados alguns modelos apresentados na literatura e utilizados neste trabalho.

4. MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DA VOLATILIDADE

A volatilidade, que pode ser definida como a intensidade das variações, é medida pela dispersão dos retornos e, por conseguinte, sua mensuração pode ser feita através de medidas estatísticas clássicas para dispersão como, por exemplo, a variância ou o desvio padrão. Dentre os muitos modelos de volatilidade apresentados na literatura de finanças cabe destacar os modelos da família ARCH que foram, inicialmente, propostos por Engle (1982) e, posteriormente, generalizados por Bollerslev (1986), através do modelo GARCH -- *Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity Model*, que deu origem a outros modelos como, por exemplo, o Threshold ARCH (TGARCH) e o Exponencial ARCH (EGARCH). Além desses modelos é importante citar: o Modelo da Média Móvel e o Modelo de Média Móvel com Amortecimento Exponencial (EWMA). Esses modelos de volatilidade

mencionados foram os selecionados, para serem utilizados neste trabalho, e estão apresentados de forma breve a seguir. Para um maior conhecimento, ou detalhamento, desses modelos de volatilidade pode-se recorrer a Tsay (2002).

4.1. MODELO DE MÉDIA MOVEL

Um dos modelos mais simples para estimar a volatilidade de ativos financeiros. O modelo utiliza um período, ou uma janela, móvel de tamanho fixo m que é atualizado a cada novo período, agregando-se a informação mais atualizada e descartando a de $m + 1$ períodos atrás. Uma desvantagem deste modelo é o de considerar pesos iguais para todos os períodos dentro do mesmo período de tempo, ou da mesma janela. Sendo r_t o retorno do ativo no período t , o modelo pode ser descrito pela expressão a seguir:

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_{t-j}^2 .$$

4.2. MODELO DE MÉDIA MOVEL COM AMORTECIMENTO EXPONENCIAL

Este modelo atribui pesos diferentes para os períodos mais recentes possibilitando se reduzir o erro causado pelo sub-avaliação de períodos mais próximos e superavaliação de períodos mais distantes. Assim, a volatilidade também cai exponencialmente conforme o período do choque se distancia e, conseqüentemente, o seu peso diminui. Esse peso é determinado pelo fator λ de amortecimento. O fator de amortecimento usualmente utilizado pelo mercado fica em torno de 0,97 para dados mensais e 0,94 para dados diários. O modelo EWMA pode ser descrito da seguinte maneira:

$$\sigma_t^2 = (1 - \lambda)r_{t-1}^2 + \lambda\sigma_{t-1}^2 , \quad \text{onde } 0 < \lambda < 1.$$

4.3. MODELO GARCH

O modelo GARCH é um modelo condicional autoregressivo heteroscedástico, o termo heteroscedástico refere-se a mudanças na variância dos retornos de um ativo. Proposto por Bollerslev (1986), o modelo GARCH tenta capturar um comportamento comum em séries de retorno de ativos financeiros, no qual grandes valores são seguidos por valores também altos nos períodos seguintes, não necessariamente no mesmo sentido, seguindo um processo previsível. Sendo os parâmetros alfas e betas maiores do que zero, um modelo GARCH (p,q) pode ser descrito na forma:

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i r_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^p \beta_i \sigma_{t-i}^2 .$$

4.4. MODELO TGARCH

O modelo TGARCH foi concebido partindo do princípio que os movimentos de baixa são seguidos de volatilidade mais alta que os movimentos de alta de força análoga. Apresentado nos artigos de Glosten, Jagannathan e Runkle (1993) e Zakoian (1994) o modelo TGARCH captura essa assimetria comum no mercado financeira, conhecida como alavancagem. Assim, as altas e as baixas possuem conseqüências diferentes. Enquanto que as boas notícias geram um impacto de α , as más notícias geram um impacto de $(\alpha + \gamma)$. Define-se também se existe alavancagem ou se o impacto de novas notícias é assimétrico. Sendo os parâmetros alfas, betas e gamas maiores do que zero o modelo TGARCH (p,d,q) pode ser

descrito da seguinte forma:

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i r_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^d \gamma_i r_{t-i}^2 d_{t-i} + \sum_{i=1}^p \beta_i \sigma_{t-i}^2 .$$

4.5. MODELO EGARCH

O modelo Exponencial GARCH ou EGARCH foi proposto por NELSON (1991) e procura capturar os efeitos assimétricos dos choques de forma similar ao TGARCH. A assimetria da resposta aos choques é capturada pelos parâmetros γ_i . Se $\gamma_i < 0$, um choque negativo aumentará a volatilidade e o contrário se ocorrer um choque positivo. O modelo EGARCH (p,d,q) pode ser descrito da seguinte forma:

$$\ln \sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q \left[\alpha_i \left| \frac{r_{t-i}}{\sigma_{t-i}} \right| \right] + \sum_{i=1}^d \left[\gamma_i \frac{r_{t-i}}{\sigma_{t-i}} \right] + \sum_{i=1}^p \beta_i \ln \sigma_{t-i}^2 .$$

5. MERCADO DE OPÇÕES E O MODELO DE BLACK & SHOLES

Neste trabalho são analisados os preços do barril de petróleo do tipo WTI, *West Texas Intermediate* negociado na NYMEX -- New York Mercantile Exchange, e do tipo BRENT, negociado na ICE – Bolsa Eletrônica Intercontinental Exchange. Esses tipos foram os escolhidos por serem os de maior liquidez e, conseqüentemente, serem os principais *benchmarks* do mercado mundial de petróleo. Ambos são precificados em dólares norte-americanos, que será a moeda de referência utilizada neste trabalho. Os dados, coletados no *site* www.bloomberg.com, foram das cotações de fechamento no período de janeiro de 2007 até julho de 2008. O resumo estatístico das amostras das cotações dos barris e seus retornos estão listados nas tabelas 1 e 2, abaixo:

Tabela 1 – Resumo Estatístico das Cotações e dos Retornos – WTI

Estatísticas	Cotação	Retorno
Média	87,911	0,002
Desvio Padrão	24,971	0,020
Mediana	86,350	0,002
Curtose	-0,750	0,253
Observações	396	396

Tabela 2 – Resumo Estatístico das Cotações e dos Retornos – Brent

Estatísticas	Cotação	Retorno
Média	87,715	0,002
Desvio Padrão	23,996	0,019
Mediana	83,690	0,002
Curtose	-0,750	0,010
	396	396

Os contratos de opções escolhidas para serem aqui analisados seguem as características listadas na tabela 3, adiante.

Tabela 3 – Vencimento e *Strikes* dos Contratos de Opções Selecionados

Vencimento	Preço de Exercício									
Abril / 2008	125	124	123	122	121	120	119	118	117	116

Maio / 2008	115	114	113	112	111	110	109	108	107	106
Junho / 2008	115	114	113	112	111	110	109	108	107	106

Como os preços do barril de petróleo WTI e BRENT são muito próximos, com uma diferença média entre US\$ 1,00 e US\$ 3,00, os *strikes*, ou preços de exercício, analisados foram os mesmos para ambos. A taxa livre de risco utilizada no modelo Black & Scholes foi a Libor BBA USD 6M, taxa interbancária em dólares norte-americanos para seis meses negociada em Londres, e uma das taxas utilizadas como *benchmark* no mercado financeiro mundial. Na seção que se segue são apresentados os resultados obtidos.

6. RESULTADOS OBTIDOS E COMENTÁRIOS FINAIS

Conforme mencionado, anteriormente, o objetivo deste trabalho é verificar qual modelo de volatilidade tem o melhor desempenho na precificação de opções de petróleo através do modelo, ou fórmula, de Black & Scholes. Para isso usou-se a volatilidade obtida para cada um dos modelos selecionados na fórmula de Black & Scholes de modo a verificar com qual desses modelos de volatilidade, aqui selecionados, o apreçamento do prêmio de opções ficou mais próximo do real, ou seja, do valor do prêmio praticado *ex-post*. Para todos esses modelos propostos, os parâmetros foram re-estimados diariamente.

Dentre os modelos mais simples: para o modelo da média móvel foi escolhido o período, ou janela, de 21 dias; enquanto para modelo EWMA foi utilizado um fator de amortecimento $\lambda = 0,94$. As escolhas destes parâmetros se devem aos valores praticados pelo mercado. Na estimativa dos modelos de volatilidade GARCH, TGARCH e EGARCH, inicialmente foi feita a comparação entre cada um dos modelos com parâmetros possíveis. E para escolha do modelo mais adequado a ser utilizado no modelo de Black & Scholes para a comparação com outros modelos. Os critérios de seleção de modelos utilizados foram: o erro padrão; a soma dos erros quadrados; e, principalmente, os critérios de Akaike e Schwarz.

Tabela 4 – Critérios de Seleção dos Modelos GARCH estimados para volatilidade - tipo WTI

Modelos GARCH	Erro Padrão	Soma Erros Quadrados	Critério de Akaike	Critério de Schwarz
GARCH (1,0)	0,0197	0,2012	-5,0226	-4,9981
GARCH (1,1)	0,0197	0,2012	-5,0375	-5,0049
GARCH (2,1)	0,0197	0,2012	-5,0347	-4,9940
GARCH (2,2)	0,0197	0,2009	-5,0434	-4,9945
GARCH (3,2)	0,0197	0,2008	-5,0439	-4,9868
GARCH (3,3)	0,0198	0,2009	-5,0407	-4,9754

Tabela 5 – Critérios de Seleção dos Modelos TGARCH estimados para volatilidade - tipo WTI

Modelos TGARCH	Erro Padrão	Soma Erros Quadrados	Critério de Akaike	Critério de Schwarz
TGARCH (1,1,1)	0,0197	0,2012	-5,0230	-4,9822
TGARCH (2,1,1)	0,0197	0,2012	-5,0192	-4,9703
TGARCH (2,2,1)	0,0198	0,2008	-5,0379	-4,9809
TGARCH (2,1,2)	0,0198	0,2012	-5,0162	-4,9591
TGARCH (1,2,1)	0,0197	0,2009	-5,0409	-4,9920
TGARCH (1,1,2)	0,0197	0,2011	-5,0200	-4,9710
TGARCH (1,2,2)	0,0198	0,2009	-5,0376	-4,9805
TGARCH (2,2,2)	0,0198	0,2008	-5,0343	-4,9691

Tabela 6 – Critérios de Seleção dos Modelos EGARCH estimados para volatilidade - tipo WTI

Modelos EGARCH	Erro Padrão	Soma Erros Quadrados	Critério de Akaike	Critério de Schwarz
EGARCH (1,1,1)	0,0197	0,2009	-5,0230	-4,9822

EGARCH (2,1,1)	0,0197	0,2009	-5,0192	-49703
EGARCH (2,2,1)	0,0197	0,2007	-5,0379	-4,9809
EGARCH (2,1,2)	0,0198	0,2009	-5,0162	-4,9591
EGARCH (1,2,1)	0,0197	0,2008	-5,0409	-4,9920
EGARCH (1,1,2)	0,0197	0,2009	-5,0200	-4,9710
EGARCH (1,2,2)	0,0198	0,2008	-5,0376	-4,9805
EGARCH (2,2,2)	0,0198	0,2008	-5,0343	-4,9690

Nas tabelas apresentadas acima são listados os resultados dos critérios de seleção de modelos utilizados para os modelos da família ARCH, empregados na estimação da volatilidade dos retornos das cotações de preço do barril do tipo WTI. Essas tabelas 4, 5 e 6, respectivamente, trazem informações dos modelos GARCH, TGARCH e EGARCH.

Nas três tabelas 7, 8 e 9, adiante, estão listados os critérios de seleção para cada um dos modelos da família ARCH escolhidos para determinação da volatilidade dos retornos das cotações do preço do barril do tipo Brent, respectivamente, GARCH, TGARCH e EGARCH.

Tabela 7 – Critérios de Seleção dos Modelos GARCH estimados para volatilidade - tipo Brent

Modelos GARCH	Erro Padrão	Soma Erros Quadrados	Critério de Akaike	Critério de Schwarz
GARCH (1,0)	0,0185	0,1778	-5,1363	-5,1118
GARCH (1,1)	0,0185	0,1778	-5,1439	-5,1113
GARCH (2,1)	0,0185	0,1778	-5,1403	-5,0995
GARCH (2,2)	0,0186	0,1778	-5,1392	-5,0902
GARCH (3,2)	0,0186	0,1777	-5,1349	-5,0778
GARCH (3,3)	0,0186	0,1777	-5,1295	-5,0642

Tabela 8 – Critérios de Seleção dos Modelos TGARCH estimados para volatilidade - tipo Brent

Modelos TGARCH	Erro Padrão	Soma Erros Quadrados	Critério de Akaike	Critério de Schwarz
TGARCH (1,1,1)	0,0185	0,1777	-5,1437	-5,1029
TGARCH (2,1,1)	0,0186	0,1778	-5,1442	-5,0953
TGARCH (2,2,1)	0,0186	0,1778	-5,1375	-5,0804
TGARCH (2,1,2)	0,0186	0,1778	-5,1404	-5,0833
TGARCH (1,2,1)	0,0186	0,1779	-5,1424	-5,0935
TGARCH (1,1,2)	0,0186	0,1778	-5,1401	-5,0912
TGARCH (1,2,2)	0,0186	0,1778	-5,1363	-5,0792
TGARCH (2,2,2)	0,0186	0,1779	-5,1470	-5,0817

Tabela 9 – Critérios de Seleção dos Modelos EGARCH estimados para volatilidade - tipo Brent

Modelos EGARCH	Erro Padrão	Soma Erros Quadrados	Critério de Akaike	Critério de Schwarz
EGARCH (1,1,1)	0,0185	0,1777	-5,1420	-5,9822
EGARCH (2,1,1)	0,0186	0,1778	-5,1446	-5,0956
EGARCH (2,2,1)	0,0186	0,1778	-5,1304	-5,0733
EGARCH (2,1,2)	0,0186	0,1777	-5,1416	-5,0846
EGARCH (1,2,1)	0,0186	0,1778	-5,1345	-5,0856
EGARCH (1,1,2)	0,0186	0,1776	-5,1394	-5,0905
EGARCH (1,2,2)	0,0186	0,1775	-5,1423	-5,0853
EGARCH (2,2,2)	0,0186	0,1778	-5,1502	-5,0849

A partir dos critérios de seleção, listados nas tabelas anteriores, os modelos escolhidos para o tipo WTI foram: o GARCH (3;2), o TGARCH (1;2;1) e o EGARCH (1;2;1). Enquanto para o petróleo do tipo Brent selecionou-se os seguintes modelos: o GARCH (3;2), o TGARCH (1;1;1) e o EGARCH (1;2;2). Os resultados das estimações dos parâmetros, com os respectivos erros padrão entre parênteses, para cada um dos modelos mencionados anteriormente estão listados, a seguir, nas tabelas 10 e 11, respectivamente, para

os modelos de volatilidade da família ARCH selecionados para os retornos do petróleo do tipo WTI e do tipo Brent.

A partir modelos de volatilidade selecionados obtiveram-se as séries de volatilidade para cada data, e desse modo calculou-se o valor teórico do prêmio das opções de petróleo para os vencimentos e *strikes* definidos na tabela 3. Em seguida foram comparados os resultados com os valores reais de fechamento dos prêmios das opções em cada dia. E para efeito de comparação foram calculadas as somas de quadrados das diferenças entre os valores observados e os teóricos, ou estimados, para cada modelo. Como para alguns *strikes* as opções têm maior liquidez que para outros, foi calculada uma média ponderada entre as somas dos quadrados das diferenças pela quantidade de negócios fechados.

Tabela 10 – Parâmetros Estimados para os Modelos da Classe ARCH - tipo WTI

Parâmetros Estimados	GARCH(3,2)	TGARCH(1,1,1)	EGARCH(1,2,1)
α_0	0,0000 (0,0000)	0,0000 (0,0000)	-1,1434 (0,7094)
α_1	0,1084 (0,0451)	0,0945 (0,0415)	0,2428 (0,0752)
α_2	-0,0744 (0,0547)	-	-
α_3	0,1105 (0,0792)	-	-
γ_1	-	0,0924 (0,0828)	-0,0869 (0,0521)
β_1	0,2141 (0,2019)	0,0511 (0,1235)	0,2079 (0,1594)
β_2	0,5256 (0,1866)	0,6957 (0,1403)	0,6719 (0,1550)

Tabela 11 – Parâmetros Estimados para os Modelos da Classe ARCH - tipo Brent

Parâmetros Estimados	GARCH(3,2)	TGARCH(1,1,1)	EGARCH(1,2,2)
α_0	0,0000 (0,0000)	0,0000 (0,0000)	-0,2959 (0,1003)
α_1	0,0146 (0,0408)	0,0014 (0,0288)	0,0424 (0,0259)
α_2	-0,0067 (0,0479)	-	-
α_3	0,0448 (0,0527)	-	-
γ_1	-	0,0860 (0,0583)	-0,1561 (0,0790)
γ_2	-	-	0,1336 (0,0773)
β_1	0,2590 (0,6153)	0,8715 (0,0916)	1,4306 (0,2521)
β_2	0,6391 (0,6028)	-	-0,4634 (0,2568)

Nas tabelas 12 e 13, adiante, estão listados os valores da soma dos quadrados das diferenças ponderada de acordo com o número de observações. E quanto menor a soma de quadrados melhor o ajuste do modelo aos valores observados.

Desse modo o modelo mais adequado para o caso do petróleo do tipo WTI se mostrou o modelo EWMA. No período estudado o modelo EWMA é o que melhor se ajusta para dois dos três vencimentos estudados, conforme a tabela 3, para os resultados do mês de

maio o modelo de Média Móvel apresentou um resultado ligeiramente melhor. Enquanto no caso do petróleo do tipo Brent, a cada vencimento um diferente modelo se ajusta melhor. Para os dados dos contratos com vencimento em junho/2008 o modelo de Média Móvel, com janela 21, foi o melhor. Enquanto para o vencimento em maio/2008 o modelo EWMA apresentou resultados melhores e para o vencimento em abril/2008 o modelo GARCH (3,2) foi o que teve o melhor desempenho.

Tabela 12 – Erro Médio Quadrado – tipo WTI

Modelos – WTI	Junho/2008	Mai / 2008	Abril / 2008
Média Móvel 21	0,3071	0,2842	0,1538
EWMA	0,1880	0,2866	0,1072
GARCH (3,2)	0,3787	0,4182	0,1571
TGARCH (1,1,1)	0,3490	0,4183	0,1562
EGARCH (1,2,1)	0,3606	0,4658	0,1600

Tabela 13 – Erro Médio Quadrado – tipo Brent

Modelos – WTI	Junho/2008	Mai / 2008	Abril / 2008
Média Móvel 21	1,5169	1,6949	0,4906
EWMA	1,6926	1,5927	0,4953
GARCH (3,2)	1,6723	1,7052	0,4702
TGARCH (1,1,1)	1,7474	1,8072	0,5161
EGARCH (1,2,2)	1,8366	1,8304	0,4873

De um modo geral, no período estudado, o modelo de volatilidade EWMA foi o se mostrou mais apropriado para a precificação da opção de compra do barril de petróleo tipo WTI, enquanto que o modelo de volatilidade da Média Móvel foi o mais adequado para precificação da opção de compra do barril de petróleo do tipo BRENT. Cabe destacar que os modelos mais sofisticados, ou seja, os da família ARCH, não se mostraram tão eficazes como esperado. Deve-se mencionar que esses resultados são válidos somente para o período da amostra considerada, do início de 2007 até julho de 2008. Em outro período de dados, ou seja, com outras amostras os resultados poderiam eventualmente ser bem diferentes.

Este trabalho gera diversas sugestões para possíveis estudos futuros. Uma idéia interessante seria analisar uma amostra maior, de forma se obter resultados mais abrangente. Outra sugestão seria testar outros modelos de volatilidade disponíveis na literatura. Além disso, a metodologia aplicada aqui poderia ser utilizada para outros ativos e mercados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **BLACK, F.; SCHOLES M.** The Pricing of Options and Corporate Liabilities. Journal of Political Economy, 81, 3, p. 637-654, 1973.
- [2] **BOLLERSLEV, T.** Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity. Journal of Econometrics, 31, p. 307-327, 1986.
- [3] **ENGLE, R.** Autoregressive Conditional Heteroskedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation. Econometrica, 50, p. 987-1008, 1982.
- [4] **GLOSTEN, L.; JAGANNATHAN, R. & RUNKLE, D.** On the Relation between the Expected Value and the Volatility of the Nominal Excess Return on Stocks. Journal of Finance, 48, p. 1779-1801, 1993.
- [5] **HULL, J.** Fundamentals of Futures and Options Markets, 4th Edition, New Jersey, Prentice Hall, 2002.

- [6] **JORION, P.** Value at Risk: the new benchmark for controlling derivatives risk. Chicago, Irwin Professional Publishing, 1997.
- [7] **NELSON, D.** Conditional Heteroskedasticity in Asset Returns: a new approach. *Econometrica*, 59, p. 347-370, 1991.
- [8] **TSAY, R.** Analysis of Financial Time Series, New York, John Wiley & Sons, 2002.
- [9] **ZAKOIAN, J.** Threshold Heteroskedastic Models. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 18, p. 931-955, 1994.