

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A
SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

JONATHAN SOARES GUIMARÃES

**ANÁLISE DA ESTRUTURA A TERMO DA VOLATILIDADE
IMPLÍCITA DO MERCADO DE OPÇÕES DE MILHO NO CME
GROUP ANTES E DEPOIS DA CRISE DE 2008**

Sorocaba
2013

**ANÁLISE DA ESTRUTURA A TERMO DA VOLATILIDADE
IMPLÍCITA DO MERCADO DE OPÇÕES DE MILHO NO CME
GROUP ANTES E DEPOIS DA CRISE DE 2008**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A
SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

JONATHAN SOARES GUIMARÃES

**ANÁLISE DA ESTRUTURA A TERMO DA VOLATILIDADE
IMPLÍCITA DO MERCADO DE OPÇÕES DE MILHO NO CME
GROUP ANTES E DEPOIS DA CRISE DE 2008**

Monografia apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, para obtenção do título de bacharel em Ciências Econômicas.

Orientação: Prof. Dr. José César Cruz Júnior

Sorocaba
2013

FOLHA DE APROVAÇÃO

JONATHAN SOARES GUIMARÃES

ANÁLISE DA ESTRUTURA A TERMO DA VOLATILIDADE IMPLÍCITA DO MERCADO DE OPÇÕES DE MILHO NO CME GROUP ANTES E DEPOIS DA CRISE DE 2008

Monografia apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, para obtenção do título de bacharel em Ciências Econômicas.

Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, 04 de Dezembro de 2013.

Orientador

Dr. José César Cruz Júnior
Universidade Federal de São Carlos
campus Sorocaba

Examinador 1

Dr. Geraldo Edmundo Silva Júnior
Universidade Federal de São Carlos
campus Sorocaba

Examinador 2

Dr. Thorsten M. Egelkraut
Oregon State University

AGRADECIMENTO

Agradeço...

Primeiramente a Deus, porque vieram dEle todas as oportunidades que tive ao longo da minha vida, nada conseguiria fazer se as bênçãos do Senhor não estivessem sobre mim;

A todos os professores pela enorme ajuda ao longo do curso, em especial ao professor César, pela orientação e pela atenção que me deu desde a orientação da iniciação científica, e aos professores Geraldo e Thorsten, por aceitarem participar da banca e pelas sugestões que possibilitaram a melhoria do trabalho;

A UFSCar pela oportunidade que me forneceu de estudar, onde pude me dedicar ao máximo e ter concluído o curso com um bom desempenho;

A toda a minha família pelo apoio e enorme ajuda;

A todos os meus amigos da turma que foram essenciais para o meu aprendizado e crescimento.

RESUMO

GUIMARÃES, Jonathan Soares. *Análise da estrutura a termo da volatilidade implícita do mercado de opções de milho no CME Group antes e depois da crise de 2008*. Ano. 2013 f. 53. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

No mercado de milho, a última década foi caracterizada pelas mudanças na dinâmica geográfica relacionadas ao cultivo da cultura, com ganhos substanciais na produção dos países da América Latina e da China. Além disso, o aumento expressivo na liquidez das negociações de milho nos mercados futuros e de opções refletiram a importância que a *commodity* passou a ter no cenário mundial. Diante desse contexto, o presente estudo avaliou o comportamento da volatilidade dos preços futuros de milho e sua capacidade preditiva pelo mercado de opções durante os anos de 2006 a 2013, considerando-se a crise financeira ocorrida em 2008. Para tal análise, foi desenvolvida a estrutura a termo da volatilidade implícita e analisou-se, por meio de regressões, o seu desempenho na previsão da volatilidade futura através de comparações com duas medidas de volatilidade histórica. Para verificar o impacto da crise financeira, o período foi dividido em três partes: antes, durante e depois da crise. Os resultados confirmaram a existência de um padrão sazonal na volatilidade coincidente com os ciclos de crescimento e comercialização do milho. De acordo com este padrão, períodos mais críticos foram acompanhados por maior volatilidade. A volatilidade implícita, para o período completo, se mostrou eficiente, apesar de enviesada. Ao dividir a amostra, a volatilidade implícita apresentou desempenho igual à volatilidade histórica para os períodos antes e durante a crise. No período recente, entretanto, a volatilidade implícita, em comparação com as duas medidas de volatilidade histórica, foi o único previsor não enviesado e eficiente. Desta forma, pode-se concluir que o modelo de volatilidade implícita pode ser de grande utilidade na gestão do risco de preços para os *hedgers* do mercado de milho no CME Group.

Palavras-chave: Mercado de opções. Milho. Volatilidade implícita. Estrutura a termo.

Classificação JEL: G01; G12; G13.

ABSTRACT

During the last decade, the world corn market presented important changes regarding the geographic dynamics of the crop, mainly due to the production increase in Latin America and China. Moreover, the significant increase of liquidity in the futures and options markets enhanced the importance of the commodity worldwide. We studied the corn futures prices volatility during the period of 2006 and 2013, including the 2008 financial crises, to understand the volatility behavior and to evaluate the options market volatility forecasts. We calculated the term structure implied forward volatility and estimated linear regressions to evaluate future volatility forecasts using two different historic volatility measures. The study was divided into three different periods in order to verify the influence of the financial crises on the volatility term structure. We found a clear pattern of seasonal volatility that matches the corn development and negotiation cycles. According to this pattern, critical periods were followed by more volatility. We also found that the implied volatility was efficient but biased for the full period analysis. When the sample period was divided, the implied volatility showed the same forecast performance of the historic volatility, before and during the crises. For the most recent period, however, the implied volatility showed a better performance than the others, since it can be considered an efficient and unbiased predictor of the real volatility. We conclude that the implied volatility model can be considered of great importance for individuals who are intending to hedge on the CME Group corn options market.

Keywords: Options markets. Corn. Implied volatility. The term structure.

JEL Classification: G01; G12; G13.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Volume médio diário de negociação de contratos de opções.....	17
Figura 2.2	Volatilidade Implícita Futura $\sigma_{ifv, T_a - T_b}$ derivada das volatilidades σ_{iv} das opções com vencimento em T_a e T_b	25
Figura 4.1	Estrutura a termo da volatilidade implícita e volatilidade realizada.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Produção anual de milho em milhões de toneladas.....	9
Tabela 1.2	Produção anual de etanol combustível nos Estados Unidos.....	10
Tabela 1.3	Contratos Futuros negociados no CME Group.....	10
Tabela 3.1	Intervalos obtidos a partir dos vencimentos das opções	29
Tabela 3.2	Divisão do período da amostra.....	34
Tabela 4.1	Volatilidade Implícita Futura e Volatilidade Realizada, 2006-2013.....	36
Tabela 4.2	Média e desvio padrão da volatilidade realizada e implícita futura, 2006-2013.....	37
Tabela 4.3	Média e desvio padrão da volatilidade realizada e implícita futura, 1987-2001.....	38
Tabela 4.4	Teste T para comparação das médias entre os dois períodos.....	38
Tabela 4.5	Performance preditiva da volatilidade realizada – Abril/2006 a Nov/2013.....	39
Tabela 4.6	Performance preditiva da volatilidade realizada – Abril/2006 a Agosto/2008	40
Tabela 4.7	Performance preditiva da volatilidade Realizada - Agosto/2008 a Fevereiro/2011.....	40
Tabela 4.8	Performance preditiva da volatilidade Realizada - Fevereiro/2011 a Novembro/2013.....	41
Tabela 4.9	Previsão da volatilidade implícita para períodos com alta volatilidade	42
Tabela 4.10	Previsão da volatilidade implícita para períodos com baixa volatilidade	42
Tabela 4.11	Testes para comparação da média e da variância dos preços previstos com os reais.....	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. O PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA.....	9
1.2. HIPÓTESES	13
1.3. OBJETIVOS	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. INTRODUÇÃO AO MERCADO DE OPÇÕES.....	15
2.2. VOLATILIDADE.....	17
2.2.1. Métodos <i>ex-ante</i>	18
2.2.2. Métodos <i>ex-post</i>	19
2.3. RESULTADOS DOS PRINCIPAIS TRABALHOS EMPÍRICOS	20
2.4. MODELOS TEÓRICOS DE APREÇAMENTO DE OPÇÕES.....	22
2.4.1. Modelo de Black e Scholes (1973)	22
2.4.2. Críticas e mudanças no Modelo de Black e Scholes (1973)	23
2.5. ESTRUTURA A TERMO DA VOLATILIDADE IMPLÍCITA	25
3. METODOLOGIA.....	28
3.1. DADOS.....	28
3.2. CONSTRUÇÃO DOS INTERVALOS	28
3.3. CÁLCULO DA VOLATILIDADE	29
3.3.1. Volatilidade Implícita.....	29
3.3.2. Volatilidade Implícita Futura (<i>Implied Forward Volatility</i>).....	31
3.3.3. Volatilidade Realizada	32
3.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA PREVISÃO.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1. PADRÃO DA VOLATILIDADE	36
4.2. PERFORMANCE PREDITIVA DA VOLATILIDADE REALIZADA	39
5. CONCLUSÃO.....	44
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
APÊNDICE A	51
APÊNDICE B.....	53

1. INTRODUÇÃO

1.1.O PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA

Por se caracterizar como uma cultura determinante, o cultivo de milho possui períodos curtos, porém críticos no seu ciclo de crescimento, durante os quais fatores ambientais, como as condições climáticas, geram impacto maior na variabilidade da produção e dos preços do que em outros períodos. Além disso, em virtude do ciclo de crescimento do milho ser biologicamente definido, as condições adversas de tempo e clima no período crítico não permitem que o crescimento da cultura seja compensado no futuro. Assim, estas adversidades climáticas podem trazer consequências aos preços negociados no mercado, tal como o aumento da sua volatilidade.

Tabela 1.1 – Produção anual de milho em milhões de toneladas, % da produção mundial em parênteses

Ano	Mundo	Estados Unidos	China	América do Sul
2000	592,5	251,9 (42,5)	106,2 (17,9)	55,4 (9,4)
2001	615,5	241,4 (39,2)	114,3 (18,6)	64,6 (10,5)
2002	604,9	227,8 (37,7)	121,5 (20,1)	57,8 (9,6)
2003	645,2	256,2 (39,7)	116,0 (18,0)	71,8 (11,1)
2004	729,0	299,9 (41,1)	130,4 (17,9)	65,6 (9,0)
2005	713,7	282,3 (39,5)	139,5 (19,5)	64,7 (9,1)
2006	706,8	267,5 (37,8)	151,7 (21,5)	67,5 (9,5)
2007	789,9	331,2 (41,9)	152,4 (19,3)	84,4 (10,7)
2008	830,3	307,1 (37,0)	166,0 (20,0)	92,9 (11,2)
2009	820,0	332,5 (40,6)	164,1 (20,0)	74,2 (9,1)
2010	849,8	316,2 (37,2)	177,5 (20,9)	89,8 (10,6)
2011	885,3	313,9 (35,5)	192,9 (21,8)	91,7 (10,4)
2012	875,1	273,8 (31,3)	208,3 (23,8)	110,9 (12,7)

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da *Food Agriculture Organization of The United Nations* – FAO (2013)

Segundo dados da FAO (2013) - *Food and Agriculture Organization of The United Nations* – o cultivo mundial do milho apresentou, ao longo dos últimos anos, uma

dinâmica interessante. É possível verificar na Tabela 1.1 que, embora os Estados Unidos sejam líderes mundiais na produção de milho, o aumento na produção (em toneladas) entre 2000 e 2012 foi de apenas 8,7 %, enquanto que a China e a América do Sul presenciaram ganhos expressivos de 96,1 % e 100 %, respectivamente. Sendo que, o crescimento da produção mundial foi de 47,7 % neste mesmo período.

Em outra perspectiva, o mercado de etanol nos Estados Unidos, que é fortemente dependente do processamento do milho, evidenciou aumentos relevantes na produção consoante com os dados da Tabela 1.2, a partir da qual é proveitoso notar que entre 2000 e 2010 a produção de etanol aumentou cerca de 8 vezes.

Tabela 1.2 – Produção anual de etanol combustível nos Estados Unidos (em bilhões de galões)

Ano	2000	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Produção	1,62	6,52	9,31	10,94	13,30	13,93	13,30

Fonte: elaboração própria a partir de dados da *U.S. Energy Information Administration* (2013)

Logo, conclui-se que mudanças significativas foram verificadas no mercado de milho para os últimos anos, tais como os aumentos consideráveis na produção da China e da América do Sul em 96,1% e 100%, respectivamente (entre 2000 e 2012), como também o rápido crescimento na produção de etanol pelos Estados Unidos. Assim, dado o contexto atual no qual o milho está inserido, pode-se dizer que estes fatores influenciam, em larga escala, as variabilidades nos preços da *commodity*.

Tabela 1.3 – Contratos Futuros de milho negociados no CME Group

Milho	Volume médio mensal de Contratos Futuros (em mil)	Contratos futuros negociados no meio eletrônico (%)
2000 – 2003	1483	1
2004 – 2008	3405	37
2009 – 2011	5316	92

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho de Irwin e Sanders (2012)

Dessa forma, o aprimoramento das metodologias relacionadas à avaliação da volatilidade pode gerar ganhos consideráveis para os negociantes do mercado. Neste sentido, como um mecanismo de gestão de risco, muitos produtores e empresas industriais têm recorrido ao mercado de contratos futuros e de opções para se proteger das variações indesejadas nos

preços passíveis de ocorrer em data futura. Este fato pode ser comprovado pela elevação no volume negociado de contratos de milho evidenciado na Tabela 1.3. Convém destacar, também, a migração das negociações realizadas no pregão viva-voz (*pit*) para o meio eletrônico, fator esse que contribuiu para o aumento no volume de contratos negociados.

Os mecanismos de gestão de risco utilizados nos mercados futuros e de opções podem ser entendidos da seguinte forma: nos mercados de futuros, o produtor agrícola pode vender, por meio de um contrato, a sua produção em uma data futura a um preço predeterminado. Enquanto que uma empresa que utiliza a *commodity* como insumo pode comprar, por meio de um contrato, uma determinada quantidade em uma data futura a um preço predeterminado.

O mercado de opções sobre futuros, por sua vez, permite ao produtor agrícola poder comprar, por meio de um contrato, o direito de vender a sua produção em data futura a um preço predeterminado, isto significa que nesta operação o produtor comprou uma opção de venda emitida por outro participante do mercado mediante o pagamento de um prêmio. A situação oposta também é válida para o participante que deseja adquirir um contrato que garanta a ele o direito de comprar uma determinada quantidade em uma data futura a um preço predeterminado. Assim, um contrato de opção permite ao produtor agrícola, já no planejamento do plantio, por exemplo, realizar um “seguro” da produção contra uma queda futura nos preços.

Logo, para que os participantes do mercado possam dispor de um mecanismo eficiente para gestão de risco ao atuar nos mercados de futuros e de opções, torna-se essencial o entendimento mais apurado acerca da formação dos preços de contratos futuros e de opções.

No contexto da formação dos preços das opções, frequentemente são utilizados modelos teóricos para precificação, sendo que o modelo de Black e Scholes (1973) é o mais comum. Neste modelo, por exemplo, para o apreçamento das opções, são consideradas algumas variáveis, as quais serão abordadas em mais detalhes ao longo do trabalho. Entretanto, a volatilidade é uma variável não observada neste modelo. Merton (1973) interpretou esta volatilidade como a volatilidade média que o mercado espera ocorrer durante o tempo de vida da opção. Assim, invertendo-se o modelo de apreçamento de opções, obtém-se a volatilidade implícita nos preços negociados das opções. Ao calcular a volatilidade implícita para opções com diferentes períodos de vencimento, obtém-se, por meio da diferença entre as volatilidades, a curva da volatilidade – estrutura a termo da volatilidade implícita.

Desse modo, o problema estudado neste trabalho incide nas consequências do desconhecimento da volatilidade futura realizada¹ pelos participantes dos mercados futuros e de opções de produtos agrícolas. Ou seja, para os produtores, a incerteza com relação ao risco futuro de variabilidade no preço pode levar a planejamentos errôneos quanto às quantidades plantadas e armazenadas. Enquanto que, para os vendedores das opções sobre contratos futuros agrícolas, a inexistência de métodos eficazes para estimar a volatilidade futura realizada pode leva-los a exigir um prêmio mais elevado do que o valor justo na negociação de uma opção, o que pode desencorajar produtores agrícolas e indústrias - que utilizam o milho como insumo na produção - a operar no mercado de opções. Em consequência, é possível que ineficiências ocorram, podendo gerar tanto escassez ou excesso na oferta, como prejuízos inesperados aos participantes do mercado decorrentes das variações inesperadas nos preços.

Neste sentido, tais participantes, dispondo das informações contidas nos prêmios das opções com diferentes vencimentos, podem mensurar a volatilidade esperada pelo mercado para os próximos períodos e tomar decisões mais concretas, como por exemplo, às relacionadas ao planejamento do investimento, do plantio e do armazenamento.

É interessante destacar que os estudos que utilizaram o conceito da volatilidade implícita, sobretudo para o desenvolvimento da estrutura a termo, além de serem escassos, evidenciam, de um modo geral, que a volatilidade implícita supera a volatilidade histórica na performance preditiva da volatilidade futura realizada. (BERLOVA, 2011; EGELKRAUT, SHERRICK e GARCIA, 2007).

O trabalho seminal que versa sobre esta temática para o mercado de *commodities* agrícolas foi desenvolvido por Egelkraut, Garcia e Sherrick (2003), no qual os autores desenvolveram a estrutura a termo para o mercado de milho utilizando o período de 1987 a 2001 com a criação de cinco intervalos anuais de volatilidade correspondentes à estrutura de vencimento das opções. As conclusões verificaram um comportamento sazonal padrão da volatilidade e a superação da volatilidade implícita em comparação com a volatilidade histórica na capacidade de previsão da volatilidade futura realizada.

É conveniente ressaltar, também, que não foi encontrado nenhum estudo acadêmico relacionando o tema aos períodos de elevada incerteza no mercado, como por exemplo, a crise financeira de 2008.

Dessa forma, a relevância deste trabalho centra na questão das inseguranças relacionadas ao mercado futuro de milho, incluindo também as incertezas provenientes dos

¹ A volatilidade futura realizada pode ser entendida como a volatilidade que será realizada, ou seja, que ocorrerá no período futuro.

impactos que uma crise no sistema financeiro – como a crise de 2008 – possa ter gerado sobre a volatilidade implícita e realizada dos preços futuros de milho. Além disso, desde o trabalho seminal de Egelkraut, Garcia e Sherrick (2003), mudanças significativas ocorreram no mercado mundial desta *commodity*, tais como o surgimento de uma nova estrutura geográfica de produção; e o ganho expressivo tanto na produção mundial quanto no volume negociado na *Chicago Mercatile Exchange* – CME Group. Assim, o novo contexto dentro do qual o milho está inserido propicia uma análise interessante acerca do comportamento da volatilidade e da sua capacidade preditiva pelo mercado.

1.2.HIPÓTESES

Espera-se neste estudo que a estrutura a termo da volatilidade implícita do mercado futuro de milho apresente comportamento sazonal em todos os anos analisados, e que este comportamento seja reflexo dos riscos sazonais que o cultivo do milho apresenta, conforme encontrado no trabalho de Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007). Quanto ao poder preditivo e a acurácia do modelo, acredita-se que a volatilidade implícita apresente desempenho superior à volatilidade histórica, uma vez que a primeira reflete a volatilidade esperada dos agentes de mercado. Esta hipótese foi corroborada pela maioria dos trabalhos disponíveis na literatura sobre o tema. (EGELKRAUT, GARCIA, SHERRICK, 2007; TONIN, 2009; BERLOVA, 2011; YU, LUI, WANG, 2011; WU, GUAN, 2010).

Quanto aos impactos da crise financeira sobre a volatilidade futura das *commodities* analisadas, espera-se que estes não sejam significativos, pois a volatilidade presente nos preços futuros de milho é fortemente dependente do sucesso esperado na produção agrícola, e esta, por sua vez, depende de fatores climáticos, como o nível de umidade, chuvas e temperatura. Não obstante, pode haver uma relação dos preços das opções sobre contratos futuros de *commodities* com a instabilidade das instituições financeiras, uma vez que elas representam um papel fundamental em prover liquidez no mercado de opções, entretanto, a hipótese a ser testada é de que este impacto não é significativo.

1.3.OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho consiste no desenvolvimento da estrutura a termo da volatilidade implícita para a cultura de milho negociada na CME Group – *Chicago*

Merchandise Exchange - nos Estados Unidos compreendendo o período entre abril de 2006 e novembro de 2013. A partir desta, pretende-se explorar as seguintes questões:

- (i) O conteúdo informacional dos preços das opções apresenta um bom poder preditivo da volatilidade futura realizada quando se compara com os modelos de volatilidade histórica?
- (ii) A volatilidade realizada e implícita média para o período recente é diferente da volatilidade média encontrada por Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007) para o período de 1987 a 2001?
- (iii) Há padrão sazonal no comportamento da volatilidade implícita futura para o mercado de milho, assim como há sazonalidade na produção da cultura?
- (iv) Os eventos do mercado financeiro provenientes da crise de 2008 afetaram a volatilidade realizada, bem como também a capacidade preditiva dos participantes do mercado futuro de milho?

Após esta introdução, o trabalho segue organizado da seguinte forma: na seção 2 descreve-se o referencial teórico, o qual apresenta a teoria relacionada ao tema, bem como também os trabalhos já realizados e os resultados encontrados, que serviu de referência para este trabalho. Na seção 3 é apresentada a metodologia do trabalho. Na seção 4 são discutidos os resultados. Na seção 5 tem-se a conclusão do trabalho. Por fim, na seção 6 encontram-se as referências bibliográficas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. INTRODUÇÃO AO MERCADO DE OPÇÕES

Produtores rurais, indústrias, e especuladores frequentemente recorrem às bolsas de mercadorias para negociar contratos futuros ou contratos de opções sobre futuros no intuito de mitigar os riscos relacionados às variações nos preços. O contrato futuro pode ser compreendido a partir do seguinte exemplo: um produtor rural que deseja minimizar o risco decorrente da redução do preço da *commodity* no futuro pode vender, por meio de um contrato, em data futura uma determinada quantidade da produção agrícola a um valor pré-estabelecido. Uma situação analogamente oposta pode servir para exemplificar o caso da indústria que tem uma *commodity* como um insumo importante na cadeia produtiva e que deseja se proteger do risco proveniente do aumento do preço no futuro.

Quanto ao mercado de opções, seu entendimento pode ser obtido por meio da seguinte exemplificação: o vendedor (lançador) do contrato de opção dá ao comprador (titular) do contrato o direito de exercer a compra (*call*), ou venda (*put*) de um ativo em data futura a um preço predeterminado, mediante o pagamento de um prêmio². Dessa forma, percebe-se que a diferença fundamental entre os mercados futuros e os de opções consiste no fato de que o mercado futuro impõe uma exigência na execução do contrato por ambos os participantes (posições comprada e vendida) na data de vencimento do contrato, enquanto que no mercado de opções, o lançador garante ao titular apenas o direito (e não a obrigação) de exercer o contrato de opção³ (HULL, 2009).

Neste mercado, as opções podem ser classificadas a partir de algumas características: (i) quanto ao seu tipo: opção de compra (*call*) e opção de venda (*put*); (ii) quanto a possibilidade de exercício: opção europeia, que pode ser exercida somente no vencimento; e opção americana, que pode ser exercida a qualquer momento antes da data de vencimento; (iii) quanto a probabilidade de exercício: (a) dentro do dinheiro (*in-the-money*), que se refere a *call* com preço de exercício abaixo do preço do ativo subjacente, ou a *put* com preço de exercício

² Uma maneira de facilitar o entendimento acerca do mercado de opções é fazer a alusão ao mercado de seguros, no qual o titular da apólice de seguro paga um prêmio para ter o direito, em caso de sinistro, ao valor estipulado previamente no contrato de seguro.

³ É conveniente destacar que, no caso da opção de compra (*call*), sempre que o valor do ativo na data de vencimento da opção for maior que o valor de exercício da opção, o titular da opção preferirá exercer o direito de compra do ativo subjacente ao preço de exercício. A situação inversa também ocorre para a opção de venda (*put*).

acima do preço do ativo subjacente. (b) fora do dinheiro (*out-of-the-money*), referente a *call* com preço de exercício acima do preço do ativo subjacente, ou a *put* com preço de exercício abaixo do preço do ativo subjacente. (c) no dinheiro (*at-the-money*), que é referente a *call* ou a *put* com preço de exercício igual ao preço do ativo subjacente. Elas são negociadas em bolsa tendo como ativos-objetos (ou ativos subjacentes – *underlying assets*), ações, índices de ações, moedas estrangeiras, e contratos futuros (TONIN, 2009). No presente trabalho serão utilizadas apenas opções sobre contratos futuros de milho.

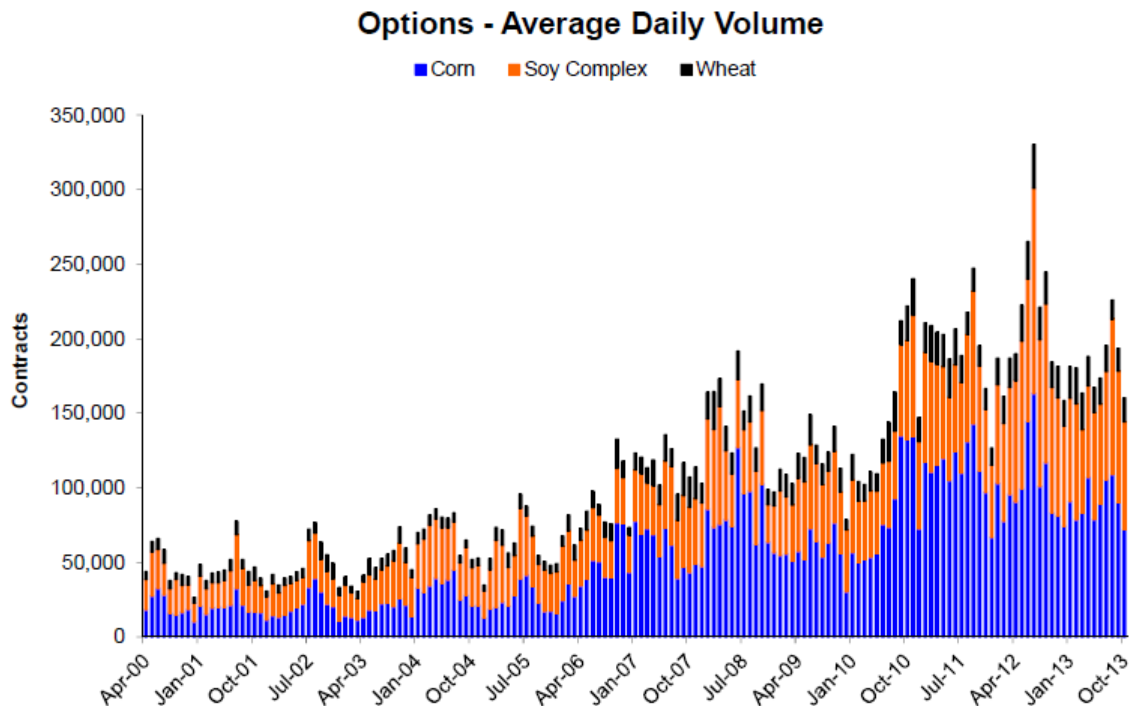
Leuthold et al. (1989) afirmam que, apesar de já haverem sido utilizadas em negociações fora da bolsa, as opções só foram regulamentadas e padronizadas em 1973 com a abertura da *Chicago Board Options Exchange* – CBOE. Com relação às opções sobre futuros agropecuários, Purcell e Koontz (1999) afirmam que a negociação iniciou-se de forma efetiva somente em 1984. Ainda, Tonin (2009) destaca que, apesar de os contratos de opções serem os instrumentos mais recentes entre os derivativos disponíveis, eles possibilitam uma enorme gama de estratégias de gestão de risco para os participantes deste mercado.

Os mercados de opções sobre futuros e os mercados de futuros de um determinado ativo são intimamente relacionados. Locke (2013) afirma que o valor de uma *call* quando exercida é a diferença entre o preço futuro corrente e o preço de exercício, enquanto que o valor da *put* no momento do exercício é a diferença entre o preço de exercício e o preço futuro corrente. Assim, as variações verificadas nos mercados futuros influenciam os prêmios das respectivas opções. Além disso, Locke (2013) ressalta também que os mercados futuros apresentam simetria na negociação, ou seja, para ambas as posições compradas e vendidas nos mercados futuros, *vis a vis*, opções sobre futuros de compra e de venda. Cabe salientar ainda que Soares (1999) afirma que em mercados mais voláteis, os agentes estão dispostos a pagar um prêmio maior para se resguardar de oscilações indesejadas nos preços. A partir deste relacionamento, a precificação das opções sobre futuros relacionadas ao ativo subjacente depende, entre outras variáveis, do preço futuro esperado na data de vencimento da opção e da volatilidade esperada que irá ocorrer durante o período de vida da opção. Assim, realizando-se o caminho oposto, por meio da inversão do modelo teórico de precificação, é possível obter os valores implícitos da volatilidade e do preço futuro intrínsecos no valor de negociação da opção. Na aderência ao objetivo do trabalho, embora sejam extraídos a volatilidade e o preço futuro implícitos, será utilizado na análise apenas a volatilidade implícita das opções.

Em se tratando do mercado de opções de milho, cabe realizar uma ressalva acerca das mudanças verificadas nos últimos 13 anos: o volume médio diário de contratos de

opções negociadas exibiu ganhos expressivos com um aumento de cerca de três vezes (CME GROUP; 2013). Maiores detalhes podem ser visualizados na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Volume médio diário de negociação de contratos de opções



Fonte: Obtido em CME Group (2013).

Após esta introdução sucinta ao mercado de opções, segue a seguir uma abordagem teórica do conceito de volatilidade e métodos existentes para sua estimação, bem como também uma revisão dos principais resultados encontrados na literatura.

2.2.VOLATILIDADE

O crescimento da importância de mecanismos eficientes na gestão de risco em finanças tem despertado o interesse de muitos pesquisadores e profissionais da área de finanças para o estudo de metodologias eficazes na avaliação e previsão da volatilidade.

A volatilidade de um ativo, na abordagem de Hull (2009), é definida como uma medida de incerteza sobre os retornos por ele proporcionados. Esta incerteza é verificada por meio da variabilidade nos retornos, isso implica que os períodos nos quais o retorno apresenta maior variância são conhecidos como períodos mais voláteis. Assim, a volatilidade pode ser entendida como o risco incorrido aos negociadores do ativo.

Neste sentido, o desenvolvimento de métodos com bom poder preditivo para a análise do risco futuro tem se tornado muito importante. Nos mercados futuros, informações sobre a volatilidade futura podem ajudar, por exemplo, os produtores agrícolas a decidirem se devem se proteger do risco de queda no preço futuro da *commodity*. Além disso, estas informações auxiliam, também, as decisões correntes destes produtores quanto às quantidades e culturas que serão cultivadas e armazenadas futuramente. Dessa forma, o conhecimento adequado acerca do risco é de importância essencial para os participantes do mercado, uma vez que suas decisões serão tomadas sob maior grau de confiança.

No mercado de milho, a volatilidade, de acordo com estudos passados, possui um comportamento padrão relacionado às características do desenvolvimento da cultura, como as épocas de crescimento, colheita e armazenamento (EGELKRAUT, GARCIA, SHERRICK; 2007). Por exemplo, Locke (2013) confirmou a existência de padrões cíclicos na volatilidade para os mercados de milho, trigo e soja. O autor constatou, inclusive, que a volatilidade é maior nos meses de verão, que é marcado pelo período de crescimento.

Quanto as metodologias utilizadas no cálculo da volatilidade, estas podem ser divididas em duas categorias: os métodos *ex-ante* (*backward looking*) e os métodos *ex-post* (*forward looking*), os quais são descritos a seguir⁴.

2.2.1. Métodos *ex-ante*

Nesta categoria, a volatilidade é calculada utilizando as informações passadas dos retornos, por esse motivo este grupo é conhecido como modelos de volatilidade baseados em séries temporais ou de volatilidade histórica. Dentro deste conceito, destacam-se os seguintes exemplos: (i) desvio padrão dos retornos passados, (ii) modelos da família ARCH/GARCH - autoregressivos de heterocedasticidade condicional (*Autoregressive conditional heteroskedasticity*); e (iii) modelos de volatilidade estocástica.

A limitação destes modelos consiste no fato de se restringirem apenas às informações passadas para a previsão da volatilidade futura. Dessa forma, estes métodos são mais restritos no sentido de pressupor que os negociadores avaliam apenas o que ocorreu no passado para prever a volatilidade futura e não consideram todo o conjunto de informações disponível.

⁴ As metodologias *ex-ante* e *ex-post* são conhecidas na literatura como *backward-looking* e *forward-looking*, respectivamente. (BENAVIDES, G., CAPISTRÁN, C., 2012) (WANG, Z., FAUSTI, S. W.; QASMI, B. A.; 2011).

É conveniente enfatizar que muitos trabalhos realizados concluem que apenas no curto prazo a volatilidade histórica tem alto grau de acerto, uma vez que o método baseado na informação passada capta a persistência da volatilidade, a qual é uma característica saliente nas séries financeiras. (ANDERSON, BOOLERSLEV, 1998; CANINA, FIGLEWSKI, 1993; POON, GRANGER, 2003).

2.2.2. Métodos *ex-post*

Nesta categoria de métodos, a extração da volatilidade é feita a partir da inversão do modelo teórico de apreamento de opções. Como não é possível escrever a volatilidade em função das demais variáveis do modelo, sua extração é feita por meio de um processo iterativo, com o qual se encontra o valor da volatilidade que iguala o prêmio originado pelo cálculo com o prêmio negociado pelo mercado. Purcell e Koontz (1999) denominam esta volatilidade de volatilidade implícita. De acordo com Hull (2009), as volatilidades implícitas podem ser utilizadas para monitorar a opinião do mercado acerca da volatilidade de um ativo particular. Para Gabe e Portugal (2004), a utilização da volatilidade implícita é uma forma de avaliar uma opção “olhando para frente”, pois o preço da opção depende das expectativas dos agentes econômicos em relação à volatilidade futura.

Xu e Taylor (1995) acentuam que os modelos de volatilidade implícita possuem informações superiores aos modelos de volatilidade histórica porque ao conter a previsão de mercado, são baseados no mais amplo conjunto de informação disponível. Yu, Lui e Wang (2009) realçam que se o mercado de opções for eficiente, a volatilidade implícita deveria fornecer informação contida em todas as outras variáveis, incluindo a volatilidade histórica, na explicação da volatilidade futura. Diante destas conclusões, espera-se que a volatilidade implícita possua desempenho superior à volatilidade histórica, uma vez que no momento de apreciar a volatilidade ao negociar a opção, o *trader* dispõe não somente das informações passadas, mas também de todas as informações correntes referentes às notícias disponíveis no mercado.

Nesta análise, como um mecanismo para a gestão do risco, produtores agrícolas têm, frequentemente, recorrido ao mercado de derivativos para negociar contratos de opções sobre os futuros das *commodities* agrícolas. Enfatizando Hull (2009), os contratos de opções são direitos negociáveis de efetuar uma compra ou venda de um ativo-objeto em uma data futura, a um preço predeterminado, mediante o pagamento de um prêmio. Ou seja, um contrato

de opção permite ao produtor agrícola, já no planejamento do plantio, por exemplo, realizar um “seguro” da produção contra uma queda futura nos preços.

2.3.RESULTADOS DOS PRINCIPAIS TRABALHOS EMPÍRICOS

Encontram-se, nos estudos verificados na literatura, evidências mistas relacionadas à informação contida na volatilidade implícita comparada à volatilidade histórica. De modo geral, os trabalhos preliminares concluíram que a volatilidade implícita é um previsor ineficiente da volatilidade futura.

Day e Lewis (1992) examinaram as opções do índice S&P 100 com vencimentos de 1985 a 1989 e encontraram que, na performance preditiva, a volatilidade histórica supera a volatilidade implícita, isso levou os autores a concluir que a volatilidade implícita é um estimador ineficiente e enviesado da volatilidade realizada. Lamoureux e Lastrapes (1993) obtiveram conclusão similar utilizando opções sobre 10 ações com vencimentos entre 1982 e 1984. Canina e Figlewski (1993) ao analisarem a amostra das opções do índice S&P 100 de março de 1983 a março de 1987 encontraram que a volatilidade histórica, ao invés da volatilidade implícita, foi significativamente correlacionada com a volatilidade futura. Com isso, os autores chegaram à conclusão de que a volatilidade implícita não possui conteúdo informacional.

Yu, Lui e Wang (2009), ao revisar os três trabalhos citados anteriormente, encontraram algumas ineficiências nas metodologias das pesquisas. Por exemplo, de acordo tais autores, a volatilidade implícita calculada por Day e Lewis (1992) foi obtida a partir das opções do índice S&P 100 com tempo de vida restante de até 36 dias úteis, e foram relacionadas com a volatilidade futura de uma semana à frente. Já Lamoureux e Lastrapes (1993) examinaram o poder preditivo da volatilidade implícita para um dia à frente com base nas opções sobre ações com vencimentos em até 129 dias úteis. Ambos os estudos sofrem, portanto, do problema da incompatibilidade da maturidade. É possível perceber, também, que Day e Lewis (1992) utilizaram opções com períodos curtos de vencimento para estimar a volatilidade realizada futura de uma semana, enquanto que Lamoureux e Lastrapes (1993) adotaram opções com períodos longos de maturidade para estimar a volatilidade realizada futura de um dia. Além disso, estes estudos usaram amostras com vencimentos sobrepostos, assim como foi realizado por Canina e Figlewski (1993).

Christensen e Prabhala (1998) utilizaram os mesmos dados adotados por Day e Lewis (1992) e Canina e Figlewski (1993) do índice S&P 100, porém com um prazo mais

extenso – de 1983 a 1995, além disso, não houve sobreposição de vencimentos e os prazos das amostras foram mensais. O resultado encontrado indicou que a volatilidade implícita obtida a partir do modelo de Black e Scholes (1973) é um previsor com menor viés e maior eficiência da volatilidade realizada, em comparação com a volatilidade histórica. Os autores encontraram também que a performance preditiva da volatilidade implícita melhorou após o *crash* no mercado de ações em outubro de 1987.

Szakmary et al. (2003) encontraram para uma larga maioria dos 35 mercados de opções sobre futuros analisados nos Estados Unidos, que a volatilidade implícita superou a volatilidade histórica como um previsor da volatilidade futura dos preços do ativo subjacente ao longo do tempo restante de vida da opção. Os autores também identificaram vantagens superiores na utilização de opções sobre futuros com relação às opções sobre ações. Primeiro, em contraste com os mercados de ações e de opções sobre ações, os mercados futuros e suas opções são negociados na mesma bolsa, o que assegura que os preços são observados simultaneamente e, portanto, erros de mensuração são minimizados⁵. Segundo, os mercados futuros têm custos de transação substancialmente menores do que os mercados de ações, aumentando a possibilidade de arbitragem. Portanto, as estimativas de volatilidade obtidas das opções sobre futuros englobariam informações mais confiáveis do que as estimativas obtidas das opções sobre ações.

É importante também destacar as evidências encontradas por Benavides e Capistrán (2012). Os autores verificaram que o conteúdo informacional proveniente da volatilidade implícita nos prêmios das opções é superior à informação encontrada pelas medidas de volatilidade histórica. Além disso, os pesquisadores Poon e Granger (2003) chegaram às mesmas conclusões ao avaliar a literatura existente sobre as metodologias de previsão de volatilidade, por meio da revisão empírica e metodológica de 93 trabalhos científicos sobre o tema. Os autores concluíram que a volatilidade implícita obtida a partir do modelo de Black e Scholes (1973) e suas derivações, fornece as melhores previsões.

Logo, corrobora-se que, de modo geral, a volatilidade implícita supera a volatilidade histórica na previsão da volatilidade futura com base na análise dos trabalhos acadêmicos. Além disso, de acordo com Benavides e Capistrán (2012), esta afirmação pode ser verificada em diversos outros estudos acadêmicos como, por exemplo, em Fleming (1998) e

⁵ Mercados de ações dos Estados Unidos fecham 15 minutos mais cedo que os mercados de opções. Então os preços das ações e das suas respectivas opções não são observados simultaneamente, o que pode criar um erro de mensuração, o qual está ausente nos preço de futuros e das opções sobre futuros. (SZAKMARY ET AL., 2003)

Blair et al. (2001) para ações; Ederington e Guan (2002) para opções sobre futuros do índice S&P 500; e Manfredo et al. (2001) e Benavides (2003) para *commodities* agrícolas.

No conceito da extração da volatilidade implícita, verificam-se os seguintes exemplos de modelos teóricos de apreçamento de opções mais comuns na literatura: Modelo de Black e Scholes (1973) e suas extensões, tais com o modelo binomial de Cox, Ross e Rubistein (1979), e o modelo livre introduzido por Britten-Jones e Neuberger (2000)⁶.

A seguir, é feita uma explanação sucinta acerca dos modelos teóricos de precificação de opções.

2.4. MODELOS TEÓRICOS DE APREÇAMENTO DE OPÇÕES

Os modelos mais conhecidos para apreçamento de opções, de acordo com Tonin (2009), podem ser classificados em dois grupos: os modelos de tempo contínuo e os modelos de tempo discreto. Na categoria de tempo contínuo têm-se os modelos obtidos por solução fechada como o modelo de Black e Scholes (1973) e suas extensões. Têm-se também os modelos com solução obtida por Simulação de Monte Carlo, como é o caso dos modelos que permitem mudanças estocásticas na volatilidade, de acordo com os trabalhos de Hull e White (1987) e Heston (1993). Na categoria de tempo discreto, destacam-se o modelo binomial de Cox, Ross e Rubistein (1979), e o modelo trinomial de Boyle (1986).

2.4.1. Modelo de Black e Scholes (1973)

O preço da opção é influenciado pela incerteza relacionada ao comportamento do preço do ativo subjacente, comumente conhecida como volatilidade. Esta incerteza influencia a probabilidade da opção ser exercida. Assim, uma distribuição de probabilidades do preço do ativo objeto é utilizada na análise. Neste sentido, partindo da hipótese de que o preço futuro é desconhecido, tem-se um modelo estocástico simples de movimento de preços – passeio aleatório (*random walk*), ou movimento browniano – para representar a dinâmica dos preços ou retornos do ativo-objeto. De acordo com Hull (2006), este processo é útil para a precificação, pois pressupõe que o mercado reage a uma nova informação.

⁶ Em virtude de o modelo binomial de Cox, Ross e Rubistein (1979) e o modelo livre de Britten-Jones e Neuberger (2000) não se relacionarem com os objetivos do trabalho, eles não serão abordados em detalhes. Para maiores informações, ver Cox, Ross e Rubistein (1979) e Britten-Jones e Neuberger (2000). Para resultados empíricos relacionados ao modelo de Britten-Jones e Neuberger (2000) verificar, por exemplo, Berlova (2011).

Seguindo estes pressupostos, e supondo que um determinado ativo segue um movimento browniano geométrico⁷, Fischer Black e Myron Scholes desenvolveram o modelo de precificação de opções que ficou conhecido como modelo de Black e Scholes. As hipóteses deste modelo, conforme descrito por Hull (2006), são as seguintes:

- O comportamento do preço do ativo segue uma distribuição lognormal, com média e variância constantes;
- Não há custos de transação ou impostos, todos os títulos são perfeitamente divisíveis;
- Não há dividendos sobre o ativo-objeto durante a vida da opção;
- Não há oportunidades de arbitragem sem risco;
- A negociação de títulos e do ativo objeto é contínua;
- Os investidores podem tomar emprestados ou emprestar recursos à mesma taxa de juro livre de risco.

A primeira hipótese do modelo de Black e Scholes (1973) refere-se aos movimentos aleatórios dos preços. A distribuição lognormal considera que o logaritmo de uma variável possui distribuição normal, ou seja, que o logaritmo da variável é normalmente distribuído. A segunda hipótese pressupõe que é possível emprestar e tomar emprestado à mesma taxa de juros, e não há custos de transação. A terceira hipótese, que admite o não-pagamento de dividendos, foi flexibilizada por trabalhos posteriores que levaram em consideração os ativos que pagam dividendos no modelo de precificação de opções. A quarta hipótese, que é pertinente à condição de não arbitragem, se relaciona à hipótese dos mercados eficientes, a qual sugere que os ativos estão sendo negociados ao preço justo, e qualquer divergência que vier a ocorrer com este preço será rapidamente percebida pelo mercado. A quinta hipótese permite a utilização do modelo para o tempo contínuo. Por fim, a última hipótese permite que sejam feitas avaliações de risco no portfólio e que possam ser compradas quaisquer quantidades de ativos que estiverem sendo negociados abaixo do seu preço justo, o que implicará na ausência da possibilidade de arbitragem pelo mercado.

2.4.2. Críticas e mudanças no Modelo de Black e Scholes (1973)

⁷ O movimento browniano simples não é aplicado neste caso pois admite valores negativos, o que não ocorre com o movimento browniano geométrico.

Uma das críticas mais evidentes na literatura se refere à hipótese de distribuição lognormal nos preços dos ativos (BERLOVA, 2011; TONIN, 2009). Uma das flexibilizações da premissa de lognormalidade é encontrada nos trabalhos de Merton (1976) e Ball e Tóuros (1986), que consideraram que os retornos do ativo-objeto seguem um processo de difusão e saltos de Poisson. É importante frisar que, para Berlova (2011), ainda não foi identificada uma alternativa que possa ajustar os dados perfeitamente. Kapotas, Schirmer e Manteiga (2003) afirmam que pelo fato de a distribuição do preço futuro do ativo subjacente não ser lognormal, os mercados realizam correções, produzindo o chamado “sorriso da volatilidade” – *smile volatility* – a qual representa a curva da volatilidade formada pelo gráfico de volatilidade implícita contra os diversos preços de exercício em uma determinada data de negociação, para um dado vencimento. Apesar desta crítica, estudos realizados encontraram que a aproximação da distribuição dos preços futuros para uma distribuição lognormal tem se mostrado bem razoável para a obtenção da volatilidade implícita nos mercados de opções de *commodities* agrícolas, conforme foi verificado nos trabalhos de Fackler e King (1989), Sherrick, Garcia e Tirapattur (1996) e Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007).

Outra limitação do modelo de Black e Scholes (1973) é a pressuposição de volatilidade constante, uma vez que diversas pesquisas demonstraram que a volatilidade dos retornos varia ao longo do tempo (SOUZA, MARQUES, MARTINES FILHO, 2010; BLACK, 1976). No sentido de incorporar a volatilidade com variação ao longo do tempo, Merton (1973) criou uma generalização do modelo de Black e Scholes. O autor foi o primeiro a sugerir que a volatilidade não observada de um retorno implícito no preço da opção pode ser interpretada como a volatilidade média do ativo subjacente que é esperada ocorrer ao longo do tempo restante de vida da opção⁸. Ademais, modelos alternativos foram desenvolvidos para a precificação das opções, como o modelo de variância com elasticidade constante de Cox e Ross (1976), que mantiveram os fundamentos de difusão de preços e das condições de não-arbitragem, porém relaxaram a hipótese de movimento browniano geométrico. Cabe destacar que estes autores também descrevem o prêmio da opção como o *payoff* futuro esperado descontado contra uma medida de avaliação neutra de risco – *risk-neutral valuation measure*⁹ (RNVM) – para caracterizar a distribuição de preços do ativo subjacente. Em outra linha,

⁸ Essa interpretação assume que a volatilidade é aditiva no tempo, de acordo com Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007)

⁹ De acordo com Hull (2009), o princípio da *risk-neutral valuation* é uma ferramenta que parte da premissa de que qualquer título cujo preço dependa do preço de outros títulos pode ser apreçado com base na hipótese de que os investidores são indiferentes ao risco. Isso significa que as preferências de risco dos investidores não afetam o valor de uma opção sobre ação quando seu preço é expresso como uma função do preço da ação objeto. Para maiores detalhes, ver, por exemplo, Hull (2009).

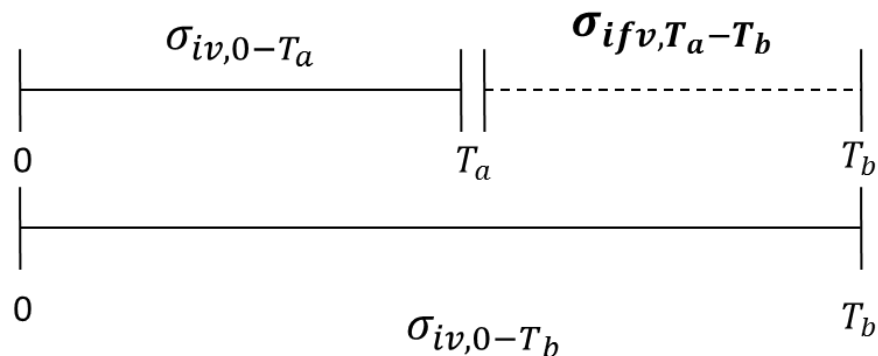
desenvolveram-se alguns modelos que permitem a mudança estocástica da volatilidade, como é o caso dos trabalhos de Hull e White (1976) e Heston (1993).

Outras extensões também foram realizadas no modelo original, como em Merton (1973) para incluir ativos que pagam dividendos, em Black (1976), que desenvolveu o modelo de precificação de opções sobre futuros, e em Garman e Kohlhagem (1983) que ajustou o modelo para precificação de opções sobre a taxa de câmbio.

2.5. ESTRUTURA A TERMO DA VOLATILIDADE IMPLÍCITA

As volatilidades implícitas extraídas dos preços das opções não são as únicas informações possíveis de serem obtidas. Assumindo que a volatilidade é aditiva no tempo, é possível obter a volatilidade implícita futura¹⁰ (*implied forward volatility*) a partir da interpolação da volatilidade implícita de duas opções com vencimentos subsequentes. Conforme pode ser verificado na Figura 2.2, no tempo T_0 as opções que expiram em T_a e T_b , com $T_b > T_a$ refletem a volatilidade para dois intervalos diferentes. No entanto, além destas duas volatilidade extraídas, os preços das opções também contém informação sobre a volatilidade implícita futura σ_{ifv, T_a-T_b} ao longo do intervalo entre T_a e T_b .

Figura 2.2 – Volatilidade Implícita Futura σ_{ifv, T_a-T_b} derivada das volatilidades σ_{iv} das opções com vencimento em T_a e T_b



Fonte: elaboração própria a partir da exemplificação de Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007).

Dessa forma, a volatilidade implícita futura pode ser entendida como a volatilidade que o mercado espera ocorrer em um período futuro. Extrapolando o conceito para

¹⁰ A apreciação “volatilidade implícita futura” é a tradução que se verificou mais apropriada para o conceito conhecido internacionalmente como *Implied Forward Volatility* e que também foi utilizada no trabalho de Souza, Marques e Martinez Filho (2010).

todos os vencimentos das opções, os participantes do mercado podem inferir um padrão para a volatilidade implícita futura - curva da volatilidade, conhecida como estrutura a termo da volatilidade implícita (*the term structure of implied forward volatility*). Este tratamento que permite obter a curva da volatilidade implícita fornece análises mais acuradas acerca da volatilidade futura realizada.

De acordo com Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007), o conceito da estrutura a termo da volatilidade implícita é similar ao da curva originada pela taxa de juros implícita nos preços dos títulos com mesmo grau de risco de inadimplência (*default*) e diferentes vencimentos - estrutura a termo da taxa de juros. A hipótese de ausência de arbitragem implica que, a partir de um conjunto de taxas de juros no momento inicial com duração de i períodos futuros, $r_{0,i}$, $i=1,2,\dots,m,\dots,n$. As taxas de juros implícitas no futuro entre os períodos m e n , as quais definem a estrutura a termo, podem ser obtidas através da Equação 2.1 (FAMA,1984):

$$r_{m,n} = \left[\left(\frac{(1 + r_{0,n})^n}{(1 + r_{0,m})^m} \right)^{(n-m)^{-1}} - 1 \right] \quad (2.1)$$

Os trabalhos verificados na literatura que estenderam a análise da volatilidade implícita ao desenvolvimento da estrutura a termo para o mercado de *commodities* agrícolas são muito escassos, quanto ao mercado de milho por exemplo, não há nenhum trabalho abordando o conceito da estrutura a termo da volatilidade para o período recente. Dentre os poucos estudos encontrados nesta área, convém destacar os trabalhos realizados por Souza, Marques e Martinez Filho (2010) e Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007).

No primeiro, os autores utilizaram a estrutura a termo das volatilidades implícitas futuras no mercado de opções de soja negociadas no CME Group para fazer previsões da volatilidade e dos preços à vista no estado do Mato Grosso, Brasil. Foi adotado o modelo teórico de Black (1976) para a extração das volatilidades implícitas, por meio de um método iterativo. O trabalho utilizou simultaneamente todas as opções negociadas e o período empregado na análise compreendeu de janeiro de 2006 a junho de 2009. Os autores concluíram que a volatilidade implícita é um previsor mais eficiente da volatilidade realizada em comparação com a previsão simples (*naïve forecast*), para o curto prazo.

Quanto ao segundo trabalho, os autores calcularam a estrutura a termo das volatilidades implícitas nas opções de milho negociadas no CME Group, para o período de 1987 a 2001. Foi utilizada a solução do modelo de Black e Scholes (1973) para a obtenção do vetor

bivariado φ contendo as volatilidades e os preços futuros implícitos. Os autores também utilizaram simultaneamente todas as *calls* e *puts* com todos os preços de exercício. Os resultados evidenciaram um padrão sazonal na volatilidade correspondente às características intrínsecas ao cultivo da cultura. Em comparação com duas medidas de volatilidade histórica, o trabalho concluiu que a volatilidade implícita apresentou qualidade superior, sendo um previsor eficiente e não enviesado.

3. METODOLOGIA

Nesta seção é apresentado o conteúdo metodológico do trabalho, a começar pelos dados utilizados, seguidos pela descrição dos cálculos e dos métodos empregados na análise.

3.1.DADOS

A análise utiliza preços de fechamento das opções de milho sobre futuros negociadas entre 24 de fevereiro, de 2006 e 21 de junho, de 2013¹¹ e preços de fechamento diários de futuros de milho de 25 de abril de 2003 a 22 de novembro de 2013. Os dados obtidos são referentes às negociações realizadas na *Chicago Mercantile Exchange – CME Group*, que foram obtidos por meio *on line* no Barchart. Foram utilizadas 3515 opções no total (2032 *calls* e 1483 *puts*) dos 37 intervalos, o que equivale a uma média de 95 opções por intervalo.

3.2.CONSTRUÇÃO DOS INTERVALOS

Os contratos no mercado futuro de milho expiram cinco vezes por ano, e os contratos de opções correspondentes vencem cerca de um mês antes¹². Dessa forma, a estrutura dos vencimentos das opções sugere a construção dos intervalos pelos quais a volatilidade implícita futura pode ser examinada, e resulta nas volatilidades implícitas futuras de diferentes extensões – algumas com cerca de dois meses e outros com cerca de três meses. Os intervalos sobre os quais a volatilidade implícita futura é calculada são essencialmente fixos, uma vez que os contratos futuros de milho e de opções vencem na mesma época em cada ano. Dada a estrutura de vencimentos dos contratos ao longo do ano é possível obter cinco intervalos para análise da volatilidade implícita futura. Assim, os intervalos podem ser exemplificados na Tabela 3.1.

¹¹ Na base de dados obtida não havia dados referentes as opções negociadas em dezembro de 2007, o que impossibilitou o cálculo da volatilidade implícita futura para o período de fev-abr de 2008. No entanto, a análise dos dados não foi prejudicada.

¹² Os contratos futuros de milho do CME Group vencem nos seguintes meses: Março (H), Maio (K), Julho (N), Setembro (U) e Dezembro (Z); com os respectivos códigos de vencimento entre parênteses. A data de vencimento em cada mês corresponde ao dia útil anterior ao dia 15 do mês do contrato. Nos mercados de opções sobre futuros, os vencimentos ocorrem na última sexta-feira do mês anterior ao vencimento do contrato futuro que antecede, pelo menos, dois dias úteis.

Tabela 3.1 – Intervalos obtidos a partir dos vencimentos das opções

Intervalos	Contratos Futuros	Características do período
FEV-ABR	Maio	Armazenamento
ABR-JUN	Julho	Plantio e início do ciclo de crescimento
JUN-AGO	Setembro	Ciclo crítico de crescimento
AGO-NOV	Dezembro	Colheita
NOV-FEV	Março	Colheita e armazenamento

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

Para calcular a volatilidade implícita em cada intervalo, primeiramente recorreu-se aos dados de fechamento das opções negociadas no dia que antecedeu em dois meses o início do intervalo, ou seja, dois meses antes do vencimento da opção com prazo mais curto¹³. Estes dados são filtrados para conter as opções sobre os dois contratos com vencimentos mais próximos e são eliminadas todas as opções listadas, mas não negociadas. Foram também considerados todos os preços de exercício. Posteriormente, realizou-se a extração da volatilidade implícita das opções para os dois prazos de maturidade, conforme exemplificado na Figura 2.2. Por fim, calculou-se a volatilidade implícita futura para o intervalo em questão.

Conforme verificado na Tabela 3.1, dadas as características que a cultura apresenta em cada período, espera-se que os intervalos de volatilidade implícita futura apresentem um comportamento sazonal bem definido ao longo dos anos.

3.3.CÁLCULO DA VOLATILIDADE

3.3.1. Volatilidade Implícita

Utilizando a mesma abordagem adotada por Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007) e seguindo Facker e King (1989) e Sherrick, Garcia e Tirupattur (1996), assumiu-se a existência de condições de não arbitragem, e a descrição de Cox e Ross (1976) do prêmio da opção como o *payoff* esperado descontado contra uma medida de avaliação neutra de risco (*risk-neutral valuation measure* - RNVM) para caracterizar a distribuição do preço do ativo subjacente. Assim, os prêmios correntes das opções *call* e *put* são dados por:

¹³ Dentro do mês para a coleta dos dados, o dia escolhido para coletar os dados foi a última sexta-feira que antecede dois dias úteis. Para maiores detalhes sobre as datas utilizadas na análise das opções, verificar o Apêndice A.

$$V_c(x) = b(T) \int_0^{\infty} \max(0, F_T - x) g(F_T) dF_T \quad (3.1)$$

$$V_p(x) = b(T) \int_0^{\infty} \max(0, x - F_T) g(F_T) dF_T \quad (3.2)$$

Onde $V_c(x)$ e $V_p(x)$ são os prêmios das opções de compra e venda europeias, x é o preço de exercício, T é o tempo para o vencimento, F_T é o preço do ativo subjacente no vencimento da opção, $b(T)$ é o fator de desconto, e $g(F_T)$ é a função densidade de probabilidade do preço do ativo subjacente F_T esperada pelo mercado. Convém salientar que a distribuição de F_T no presente trabalho foi aproximada para uma distribuição lognormal, uma vez que alguns estudos mostraram que esta distribuição se comporta razoavelmente bem para obter a volatilidade implícita nos mercados de opções agrícolas. Ao adotar a premissa de lognormalidade para F_T , as equações (3.1) e (3.2) representam o modelo de apreçamento de opções de Black e Scholes (1973)¹⁴. A partir destas equações, os prêmios observados e a taxa de desconto corrente¹⁵ podem ser utilizados para extrair a distribuição implícita dos retornos do ativo subjacente. Assim, a função objetiva usada para obter a distribuição implícita é:

$$\min_{\varphi} \left[\sum_{i=1}^k \left(\left(V_{c,i} - b(T) \int_{x_i}^{\infty} g(F_T|\varphi)(F_T - x_i) dF_T \right)^2 \right) + \sum_{j=1}^l \left(\left(V_{p,j} - b(T) \int_0^{x_j} g(F_T|\varphi)(x_j - F_T) dF_T \right)^2 \right) \right] \quad (3.3)$$

A equação (3.3) minimiza a soma dos quadrados da diferença entre o prêmio da opção observada e o prêmio calculado pelo modelo. Neste caso, $V_{c,i}$ e $V_{p,j}$ são os prêmios das opções observadas, x_i e x_j são os respectivos preços de exercício da *call* e da *put*, e k e l são as diferentes quantidades de *calls* e *puts* negociadas em um dado dia. A solução da equação (3.3)

¹⁴ Seguindo Egelkraut, Garcia e Sherrick (2003), foi utilizado neste trabalho o modelo de precificação de opções europeias para aproximar a precificação americana das opções sobre futuros de milho.

¹⁵ Para a composição das taxas de desconto, foi utilizada a *T-Bill rate* de 3 meses obtidas do Federal Reserve (2013).

pode ser obtida por qualquer método iterativo não-linear. O software Solver do Microsoft Excel foi utilizado no presente trabalho para se obter o vetor ϕ para uma distribuição particular contendo a volatilidade e o preço futuro implícitos. É importante ressaltar que Locke (2013) evidencia que a estratégia para a obtenção das duas variáveis implícitas – preço futuro e volatilidade - fornece resultados mais consistentes.

Os resultados obtidos diferenciam do modelo tradicional de Black e Scholes por meio de duas maneiras: (i) Ao obter, além da volatilidade, o preço futuro implícito, não são impostas restrições à média da distribuição do ativo subjacente, como por exemplo, que o preço futuro deve ser igual ao preço corrente do ativo, ou uma função dele. (ii) Em contraste com a utilização exclusiva de opções no-dinheiro (*at-the-money*), são utilizadas simultaneamente as informações contidas em todas as *calls* e *puts* para todos os preços de exercício negociados.

3.3.2. Volatilidade Implícita Futura (*Implied Forward Volatility*)

Uma vez que o processo para a obtenção da volatilidade implícita gera um vetor de parâmetros para cada conjunto de vencimentos, as volatilidades implícitas podem ser extraídas para os diferentes intervalos. Por exemplo, para um dia específico $t=0$, com opções vencendo em T_a e T_b , e $T_b > T_a$, obtém-se as volatilidades para os dois intervalos diferentes, $\sigma_{iv,0-T_a}$ e $\sigma_{iv,0-T_b}$. Sob a premissa de a volatilidade ser aditiva no tempo, sendo $T_b - T_a$ o tempo de extensão do intervalo (em anos), T_a o tempo de vida (em anos) da opção com vencimento mais próximo, e T_b o tempo de vida (em anos) da opção com vencimento mais distante, a volatilidade implícita futura é calculada por meio da equação (3.4):

$$\sigma_{ifv,T_a-T_b} = \sqrt{\frac{T_b \sigma_{iv,0-T_b}^2 - T_a \sigma_{iv,0-T_a}^2}{T_b - T_a}} \quad (3.4)$$

Segundo Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007), a partir da equação (3.4), a volatilidade implícita futura pode ser interpretada como a expectativa do mercado da volatilidade média que irá ocorrer no futuro entre T_a e T_b .

3.3.3. Volatilidade Realizada

A correspondente volatilidade realizada tem como base os contratos futuros F subjacentes às opções com tempo de maturidade mais longo e é calculada sobre os retornos diários. Sendo os retornos obtidos da seguinte maneira:

$$R_t = \ln(F_T - F_{T-1}) \quad (3.5)$$

A volatilidade realizada é obtida da seguinte forma:

$$\sigma_{real, T_a - T_b} = \sqrt{252 * \left(\frac{\sum_{t=1}^N (R_t - \bar{R}_t)^2}{N} \right)} \quad (3.6)$$

Onde N é o número de dias úteis entre T_a e T_b .

Percebe-se que a medida de volatilidade foi anualizada para se permitir comparações com a volatilidade implícita, uma vez que esta última é obtida em bases anuais quando extraída do modelo de Black e Scholes (1973). A utilização de 252 dias úteis para a transformação da volatilidade diária para anual é considerado padrão pela literatura financeira. (BENAVIDES, CAPISTRÁN, 2012; LOCKE, 2013; TONIN, 2009)

3.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA PREVISÃO

A volatilidade implícita será avaliada por meio de comparações com medidas alternativas de previsão da volatilidade, tais como a média móvel de 3 anos, e a previsão ingênua (*naïve forecast*). A média móvel foi calculada por meio de uma média simples da volatilidade realizada dos três últimos anos para o respectivo intervalo. Enquanto que a previsão ingênua foi definida como a volatilidade realizada durante o intervalo do último ano.

A performance preditiva foi examinada utilizando a seguinte regressão:

$$\sigma_{REAL} = \alpha_0 + \alpha_1 \sigma_{FORECAST} + \varepsilon \quad (3.7)$$

Onde σ_{REAL} e $\sigma_{FORECAST}$ são as volatilidades realizadas e previstas, respectivamente. Um coeficiente estatisticamente significativo α_1 indica que a volatilidade implícita futura contém informação sobre a subsequente volatilidade realizada. Uma previsão eficiente e não-enviesada é caracterizado por $\alpha_0 = 0$ e $\alpha_1 = 1$. Esta restrição é testada com o teste F de restrição de Wald.

As diferenças na acurácia da previsão da volatilidade também são avaliadas utilizando o Erro Percentual Absoluto Médio (*mean absolute percentage errors* - MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{T} \sum_{T_b-T_a} \left| \frac{(\sigma_{FORECAST,Tb-Ta} - \sigma_{REAL,Tb-Ta})}{\sigma_{REAL,Tb-Ta}} \times 100 \right| \quad (3.8)$$

Onde T é o número de previsões. Esta medida de erro é comparada estatisticamente utilizando o teste *Modified Diebold Mariano (MDM)* (HARVEY, LEYBOURNE e NEWBOLD; 1997). O processo do teste especifica uma função de custo de erro $g(e)$ dos erros da previsão e , e testa, aos pares, a igualdade na performance preditiva. O teste estatístico é comparado aos valores críticos da distribuição t com $(T-1)$ graus de liberdade e é calculado para as T observações previstas por:

$$MDM = \sqrt{\left(\frac{T-1}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (d_t - \bar{d})^2} \right) \bar{d}} \quad (3.9)$$

Onde $d_t = g(e_{t,1}) - g(e_{t,2})$, \bar{d} é a diferença média entre todos os anos e a hipótese nula é que $E(d_t) = 0$. Por exemplo, no teste para diferença no erro absoluto percentual médio (MAPE) de duas previsões, $g(e_{t,1}) = |e_{t,1}|$ e $g(e_{t,2}) = |e_{t,2}|$ são os erros percentuais absolutos de previsão do método 1 e método 2, e $d_t = |e_{t,1}| - |e_{t,2}|$ é a diferença entre os respectivos erros percentuais absolutos de previsão no tempo t .

A seguir, foi realizada a divisão do período para a melhor compreensão das características das previsões da volatilidade em antes, durante e depois da crise. Como a amostra se inicia com o intervalo abril-junho/2006 e termina no intervalo agosto-novembro/2013, foi realizada a divisão do período de modo a verificar se houve mudança na previsão da volatilidade pelos participantes do mercado durante a crise financeira, conforme exibido na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Divisão do período da amostra

Período	Intervalos		Nº de Observações
	Início	Fim	
Antes da Crise	Abr-Jun /2006	Jun-Ago / 2008	11
Durante a Crise	Ago-Nov /2008	Nov/2010-Fev /2011	12
Depois da Crise	Fev-Abr/2011	Ago-Nov /2013	14

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

A data de início da crise financeira é definida por alguns autores, como Sabino e Bressan (2009), como o dia da quebra do banco Lehman Brothers em 15 de setembro de 2008. Assim, o intervalo de agosto-novembro/2008 foi considerado como sendo o início do período da crise. No sentido de manter as observações bem distribuídas ao longo dos três períodos analisados (para ter melhor consistência estatística), e de evitar que possíveis incertezas iminentes nos primeiros meses do pós-crise atrapalhassem o período subsequente, foi considerado o intervalo de novembro/2010-fevereiro/2011 como sendo o último intervalo do período da crise financeira.

Ademais, na busca de verificar a robustez dos resultados encontrados na performance preditiva da volatilidade implícita, foi analisado o período completo, utilizando-se uma variável *dummy* para identificar se houve diferenças nos estimadores da regressão tanto para os períodos em que volatilidade realizada ficou acima da média como para períodos em que a volatilidade realizada ficou abaixo da média. Ou seja, verifica-se se a capacidade preditiva pelos agentes da volatilidade realizada varia em períodos de alta e de baixa volatilidade. Espera-se que não haja diferenças significativas entre estes períodos. A análise será feita a partir das seguintes regressões:

$$\sigma_{REAL} = \alpha_0 + \beta_0 Dacima + \alpha_1 \sigma_{FORECAST} + \beta_1 Dacima \sigma_{FORECAST} + \varepsilon \quad (3.10)$$

$$\sigma_{REAL} = \alpha_0 + \beta_0 Dabaixo + \alpha_1 \sigma_{FORECAST} + \beta_1 Dabaixo \sigma_{FORECAST} + \varepsilon \quad (3.11)$$

Onde β_0 é o coeficiente da *dummy* de intercepto e β_1 é o coeficiente da *dummy* de inclinação, a variável *Dacima* é uma *dummy* que apresenta valor 1 quando a volatilidade realizada se encontra acima da média e valor 0 caso contrário, e a variável *Dabaixo* possui valor 1 quando a volatilidade realizada se encontra abaixo da média e 0 caso contrário. Assim, para que não haja diferenças na capacidade de previsão da volatilidade implícita entre os períodos

de alta e de baixa volatilidade, espera-se que os coeficientes β_0 e β_1 sejam não significativos para ambos os casos.

Por fim, no sentido de verificar o poder de acurácia do modelo de Black e Scholes (1973), será verificado, para toda a amostra, se o valor médio e a variância do prêmio observado das opções foram estatisticamente iguais ao valor médio e à variância do prêmio das opções calculados pelo modelo a partir dos testes t e χ^2 , respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1.PADRÃO DA VOLATILIDADE

Na observação do padrão da volatilidade é possível verificar, na Figura 4.1, que tanto a volatilidade implícita quanto a volatilidade realizada apresentam um comportamento sazonal ao longo dos anos, característicos da produção do milho. Verifica-se que o período de junho-agosto, por apresentar um ciclo de crescimento mais crítico possui, de modo geral, maiores volatilidades implícitas e realizadas. É interessante notar também o *outlier* verificado na volatilidade realizada para os intervalos Agosto-Novembro e Novembro-Fevereiro. Estes *outliers* são referentes ao período final do ano de 2008 e início do ano de 2009 e podem ser melhor visualizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Volatilidade Implícita Futura e Volatilidade Realizada, 2006-2013

Volatilidade Implícita Futura								
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FEV-ABR		0,28		0,44	0,33	0,40	0,31	0,28
ABR-JUN	0,31	0,32	0,37	0,46	0,36	0,39	0,31	0,26
JUN-AGO	0,40	0,44	0,50	0,49	0,35	0,42	0,31	0,34
AGO-NOV	0,27	0,33	0,36	0,41	0,28	0,34	0,29	0,26
NOV-FEV	0,24	0,25	0,33	0,30	0,33	0,29	0,27	
Volatilidade Realizada								
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FEV-ABR	0,23	0,34	0,33	0,31	0,25	0,39	0,27	0,29
ABR-JUN	0,26	0,38	0,31	0,30	0,23	0,37	0,34	0,29
JUN-AGO	0,29	0,32	0,46	0,43	0,35	0,35	0,38	0,32
AGO-NOV	0,34	0,30	0,51	0,39	0,38	0,31	0,25	0,22
NOV-FEV	0,28	0,22	0,48	0,28	0,26	0,23	0,15	

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

Figura 4.1 – Estrutura a termo da volatilidade implícita e volatilidade realizada.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

A seguir são exibidos, na Tabela 4.2, os valores médios e o desvio padrão da volatilidade realizada e da volatilidade implícita futura, para o período de 2006 a 2013. Verifica-se que, na média, o intervalo junho-agosto apresentou a maior volatilidade, tanto implícita como realizada, enquanto que o intervalo novembro-fevereiro possuiu a menor volatilidade média para o período analisado. Esta constatação corrobora as hipóteses esperadas, uma vez que o período crítico do ciclo de crescimento se situa no intervalo de junho a agosto, e os meses de novembro a fevereiro são marcados pela época de armazenamento. No exame dos intervalos agrupados em crescimento e não-crescimento, verifica-se, no primeiro grupo, maior volatilidade média que o segundo, conforme esperado.

Tabela 4.2 - Média e desvio padrão da volatilidade realizada e implícita futura, 2006-2013.

Intervalos	Volatilidade Realizada		Volatilidade Implícita Futura	
	Realized Volatility		Implied forward volatility	
	Média	DP (/ 10 ²)	Média	DP (/ 10 ²)
	Mean	SD (/ 10²)	Mean	SD (/ 10²)
FEV-ABR	0,301	5,182	0,340	6,428
ABR-JUN	0,310	5,220	0,350	6,258
JUN-AGO	0,360	5,665	0,405	6,916
AGO-NOV	0,338	9,292	0,317	5,433
NOV-FEV	0,270	10,397	0,287	3,330
ABR-AGO (crescimento)	0,335	5,860	0,377	6,973
AGO-ABR (não-crescimento)	0,304	8,562	0,314	5,347
Todos	0,317	7,638	0,341	6,808

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

Para efeito de comparação, na Tabela 4.3, obtida do trabalho de Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007), são exibidos os resultados para as mesmas variáveis da Tabela 4.2, porém para os anos de 1987 a 2001. Os dados seguem agrupados em períodos de crescimento e não-crescimento, e em valores médios para a amostra total.

No sentido de comparar os resultados médios das volatilidades implícitas e realizadas, entre o período de 1987 a 2001 e o período de 2006 a 2013, foi realizado o teste *t* para comparação das médias, conforme é possível verificar na Tabela 4.4. As estatísticas encontradas foram significativas a 1% tanto para a volatilidade implícita, como para a volatilidade futura, o que implica na rejeição da hipótese nula de igualdade entre as médias dos períodos.

Tabela 4.3 - Média e desvio padrão da volatilidade realizada e implícita futura, 1987-2001

Intervalo	Volatilidade Realizada		Volatilidade Implícita Futura	
	Realized Volatility		Implied forward volatility	
	Média	DP (/ 10 ²)	Média	DP (/ 10 ²)
	Mean	SD (/ 10²)	Mean	SD (/ 10²)
ABR-AGO (crescimento)	0,311	8,180	0,286	4,446
AGO-ABR (não-crescimento)	0,189	3,437	0,202	2,879
Todos	0,239	4,565	0,235	2,452

Fonte: Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007).

Tabela 4.4 - Teste T para comparação das médias entre os dois períodos

Intervalo	Volatilidade Realizada		Volatilidade Implícita Futura	
	Estatística t	Valor-p	Estatística t	Valor-p
Todos	-6,74	0,000	-12,04	0,000

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

Dessa forma, percebe-se que a volatilidade realizada média de 0,317 (para o período de 2006 a 2013) foi estatisticamente maior que 0,239 (volatilidade realizada média para o período de 1987 a 2001). Pode-se concluir, portanto, que para o período recente, a variabilidade média nos preços futuros de milho manteve-se em um patamar mais elevado quando comparado ao período de 1987 a 2001.

4.2. PERFORMANCE PREDITIVA DA VOLATILIDADE REALIZADA

A seguir são apresentados os resultados das regressões realizadas para se verificar o desempenho dos métodos de previsão da volatilidade realizada. Na Tabela 4.5, apresenta-se a avaliação da performance da volatilidade implícita comparada com duas medidas alternativas de volatilidade histórica, para todo o período. Como é possível observar, a regressão da volatilidade implícita apresentou a melhor acurácia, evidenciando o erro percentual absoluto médio estatisticamente menor que as duas medidas alternativas, a partir do teste MDM, considerando o nível de significância de 10%. É essencial notar, também, que o coeficiente significativo de α_1 , juntamente com o poder explicativo de 22,92 % (R^2) da equação da volatilidade implícita sugerem que esta contém informações sobre a volatilidade futura. Entretanto, apesar de ser eficiente (por possuir o menor erro e melhor poder explicativo) este predictor se verificou enviesado, a partir da observação do teste de restrição de Wald.

Tabela 4.5 - Performance preditiva da Volatilidade Realizada – Abril/2006-Nov/2013

	Regressão		R^2	Teste Wald	Teste MDM	Erro
	α_0	α_1		$\alpha_0 = 0,$ $\alpha_1 = 1$	MAPE	MAPE
	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>		<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	
Volatilidade Implícita Futura	0,134 <i>0,027</i>	0,542 <i>0,003</i>	0,2292	<i>0,0076</i>		17,634
Média Móvel de 3 anos *	0,290 <i>0,000</i>	0,095 <i>0,628</i>	0,0054	<i>0,0000</i>	<i>0,093</i>	20,071
Previsão Ingênua *	0,267 <i>0,000</i>	0,163 <i>0,245</i>	0,0285	<i>0,0000</i>	<i>0,089</i>	19,946

*Foi utilizado o processo de Newey-West para estimar erros padrões consistentes

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Posteriormente, realiza-se a divisão dos períodos em três categorias para que seja analisada a influência da crise financeira de 2008 sobre as volatilidades realizada e implícita:

(i) antes da crise; (ii) durante a crise; (iii) depois da crise.

Tabela 4.6 - Performance preditiva da volatilidade Realizada – Abril/2006 a Agosto/2008

	Regressão			Teste Wald	Teste MDM	Erro
	$\alpha 0$	$\alpha 1$	R ²	$\alpha 0 = 0,$ $\alpha 1 = 1$	MAPE	MAPE
	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>		<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	
Volatilidade Implícita Futura	0,252 <i>0,011</i>	0,159 <i>0,518</i>	0,0542	<i>0,0163</i>		10,769
Média Móvel de 3 anos *	0,238 <i>0,021</i>	0,264 <i>0,456</i>	0,0574	<i>0,0061</i>	<i>0,336</i>	11,004
Previsão Ingênua *	0,337 <i>0,000</i>	-0,126 <i>0,108</i>	0,0425	<i>0,0000</i>	<i>0,377</i>	11,310

*Foi utilizado o processo de Newey-West para estimar erros padrões consistentes

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

Tabela 4.7 - Performance preditiva da volatilidade Realizada - Agosto/2008 a Fevereiro/2011

	Regressão			Teste Wald	Teste MDM	Erro
	$\alpha 0$	$\alpha 1$	R ²	$\alpha 0 = 0,$ $\alpha 1 = 1$	MAPE	MAPE
	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>		<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	
Volatilidade Implícita Futura	0,233 <i>0,135</i>	0,324 <i>0,405</i>	0,0639	<i>0,0000</i>		22,295
Média Móvel de 3 anos *	0,531 <i>0,033</i>	-0,533 <i>0,401</i>	0,0795	<i>0,0767</i>	<i>0,117</i>	25,092
Previsão Ingênua *	0,367 <i>0,030</i>	-0,029 <i>0,932</i>	0,0008	<i>0,0025</i>	<i>0,204</i>	23,846

*Foi utilizado o processo de Newey-West para estimar erros padrões consistentes

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

Assim, segue na Tabela 4.6 a regressão realizada com os dados de abril de 2006 a agosto de 2008 (antes da crise), e na Tabela 4.7 com os dados de agosto de 2008 a fevereiro

de 2011. Pode-se analisar que o período compreendido pelas Tabelas 4.6 e 4.7 (antes e durante a crise) apresentaram resultados semelhantes. Ao assumir um nível de significância de 10 %, pela verificação do teste de Wald, verifica-se que as volatilidades implícitas e históricas para os dois períodos (antes e durante a crise) foram enviesadas na estimativa da volatilidade realizada. Quanto à acurácia, percebe-se que não houve um previsor mais eficiente, dado que os erros percentuais absolutos médios foram estatisticamente iguais na comparação da previsão da volatilidade implícita com as volatilidades históricas para os dois períodos.

Por fim, a análise do período mais recente – depois da crise – mostrou resultados diferentes. Na verificação da Tabela 4.8, conclui-se que a volatilidade implícita foi o único estimador não enviesado da volatilidade realizada, pela verificação do teste de Wald. Ademais, a volatilidade implícita foi o previsor mais eficiente apresentando o erro percentual absoluto médio (MAPE) estatisticamente menor que o apresentado pelas duas medidas alternativas de volatilidade histórica. Além disso, ressalta-se o melhor poder explicativo da equação da volatilidade implícita pela verificação do R^2 de 53,08 %. Dessa forma, verifica-se superioridade na qualidade de previsão da volatilidade implícita.

É interessante salientar, no entanto, que os períodos marcados por *stress* no mercado financeiro levam a redução na eficiência da capacidade de previsão da volatilidade pelo mercado.

Tabela 4.8 - Performance preditiva da volatilidade Realizada - Fevereiro/2011 a Novembro/2013

	Regressão		R^2	Teste Wald	Teste MDM	Erro
	α_0	α_1		$\alpha_0 = 0,$ $\alpha_1 = 1$	MAPE	MAPE
	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>		<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	
Volatilidade Implícita Futura	-0,016 <i>0,856</i>	0,979 <i>0,003</i>	0,5308	<i>0,2764</i>		14,376
Média Móvel de 3 anos *	0,169 <i>0,308</i>	0,382 <i>0,386</i>	0,0715	<i>0,0011</i>	<i>0,059</i>	20,499
Previsão Ingênua *	0,181 <i>0,228</i>	0,368 <i>0,369</i>	0,1042	<i>0,0017</i>	<i>0,065</i>	19,834

*Foi utilizado o processo de Newey-West para estimar erros padrões consistentes

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

Para averiguar se há divergências entre as previsões de períodos com alta ou baixa volatilidade, foram estimadas as equações (3.10) e (3.11), cujos resultados estão descritos nas Tabelas 4.9 e 4.10. A partir destes, verifica-se que, para um nível de significância de 5 %, tanto a *dummy* de intercepto como a de inclinação não foram significativas, o que implica que tanto nos períodos em que a volatilidade se encontra acima quanto abaixo da média não há diferenças significativas no comportamento da volatilidade implícita na previsão da volatilidade realizada.

Tabela 4.9 – Previsão da volatilidade implícita para períodos com alta volatilidade

	Regressão				R ²
	$\alpha 0$	$\alpha 1$	$\beta 0^*Dacima$	$\beta 1^*Dacima$	
	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	
Volatilidade Implícita Futura	0,150 <i>0,005</i>	0,363 <i>0,021</i>	0,135 <i>0,089</i>	-0,070 <i>0,750</i>	0,71

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

Tabela 4.10 - Previsão da volatilidade implícita para períodos com baixa volatilidade

	Regressão				R ²
	$\alpha 0$	$\alpha 1$	$\beta 0^*Dabaixo$	$\beta 1^*Dabaixo$	
	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	<i>p-valor</i>	
Volatilidade Implícita Futura	0,286 <i>0,000</i>	0,293 <i>0,076</i>	-0,135 <i>0,089</i>	0,070 <i>0,750</i>	0,71

Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

Para verificar se houve um alinhamento entre os preços das opções gerados pelo modelo (processo de extração da volatilidade) com os preços reais, foram analisadas as características da distribuição dos prêmios negociados e dos prêmios calculados, no intuito de verificar se há diferenças entre elas. Esta análise se desenvolveu a partir da comparação estatística da média e da variância das duas distribuições. Com a utilização do teste *t* para a média e do teste χ^2 para a variância, analisou-se se estes parâmetros foram estatisticamente iguais. Os resultados verificados na Tabela 4.11 indicam a não rejeição das hipóteses nulas de

igualdade entre as médias e as variâncias. Assim, pode-se concluir que o processo de inversão do modelo teórico de apreçamento de opções gerou bons resultados¹⁶.

Tabela 4.11 – Testes para comparação da média e da variância dos preços previstos com os reais.

Estatística descritiva	Média	Variância	Nº Observações
Preço Fechamento opções	32,92	2469,57	3515
Preço calculado no processo de extração da volatilidade (modelo)	32,72	2483,21	3515
Teste para a média	Estatística <i>t</i>	p-valor	Hipótese nula
	-0,165	0,434	As médias são iguais
Teste para a variância	Estatística χ^2	p-valor	Hipótese nula
	3533,417	0,594	As variâncias são iguais

Fonte: elaboração própria a partir de dados do trabalho.

¹⁶ No Apêndice B são apresentados os histogramas com as estatísticas descritivas das duas distribuições para melhor compreensão

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como principal objetivo a análise da estrutura a termo da volatilidade implícita para o mercado de futuros de milho negociados no CME Group. A análise gráfica dos resultados permitiu identificar um padrão comportado das volatilidades implícitas e futuras ao longo do ano. Tal padrão está relacionado às características biológicas da cultura, com exceção dos *outliers* presentes nos intervalos de agosto/2008 a fevereiro/2009 na volatilidade realizada, os quais correspondem ao período da crise financeira.

Salienta-se que a volatilidade média no período recente, a partir de 2006, foi estatisticamente maior em comparação com a volatilidade média obtida por Egelkraut, Garcia e Sherrick (2007), para o período de 1987 a 2001. Esta conclusão sugere que o crescimento nas negociações em meio eletrônico e o dinamismo que a cultura tem apresentado no mundo propiciou ganhos substanciais de liquidez nos mercados de futuros e opções. Por conseguinte, com os altos volumes em negociação, os preços futuros da *commodity* podem ter apresentado maior variabilidade. Porém, mais estudos são necessários para dar mais robustez a essa afirmação.

Em se tratando da performance preditiva da volatilidade realizada, ao abranger o período completo, a volatilidade implícita, embora tenha se mostrado enviesada, foi o previsor mais eficiente por apresentar o menor erro (MAPE), quando comparada às medidas de volatilidade histórica. Dessa forma, os resultados aqui encontrados corroboraram a hipótese inicial. Tais achados refletiram, inclusive, que apesar de o período recente ter experimentado mudanças significativas no mercado de milho, as estimativas das volatilidades futuras feitas pelos participantes do mercado apresentaram maior consistência em comparação com as das volatilidades históricas.

Na análise do período dividido, os resultados encontrados antes e durante a crise foram muito similares, todos os previsores foram enviesados, e não houve nenhum que fosse mais eficiente. Conclui-se que a crise financeira e o período que a antecedeu geraram instabilidade aos participantes do mercado, o que prejudicou, notoriamente, a capacidade de estimar a volatilidade por estes participantes. Assim, a hipótese inicial de que os períodos de crise no mercado financeiro não produziram impactos significativos no mercado de milho foi rejeitada. Ou seja, devido à insegurança que a crise financeira proporcionou aos participantes do mercado de milho, a volatilidade que o mercado esperou se diferenciou de forma significativa da volatilidade futura realizada.

Entretanto, o período posterior à crise traz uma visão diferente a esta análise, visto que a volatilidade implícita foi o único previsor não-enviesado, além de ser o mais consistente na previsão da volatilidade realizada. Resultados semelhantes foram verificados por Christensen e Prabhala (1998) para o índice S&P 100, entre 1983 e 1995, onde os autores concluíram que a volatilidade implícita possuiu qualidade superior em comparação com a volatilidade histórica, além de constatar que o seu poder de previsão melhorou a partir do *crash* de 1987.

Uma questão interessante a destacar diz respeito à avaliação da consistência do modelo de Black e Scholes (1973) utilizado para a extração da volatilidade implícita. Verificou-se que, embora haja críticas na literatura acadêmica, seu desempenho foi bom no sentido de conseguir alinhar bem os preços das opções calculadas pelo modelo, aos preços das opções negociadas.

Portanto, verificou-se que a volatilidade implícita nos preços das opções têm se comportado razoavelmente bem na previsão da volatilidade realizada, superando a volatilidade histórica, exceto para os períodos de crise, onde a insegurança presenciada pelo mercado tende a produzir diferenças significativas entre a volatilidade esperada e a volatilidade futura realizada. No entanto, nem a volatilidade histórica foi eficiente neste período de incerteza.

Assim, este trabalho contribui para destacar a eficiência da previsão do mercado da volatilidade realizada nas épocas de estabilidade, sugerindo que nestes períodos um produtor, por exemplo, pode conseguir monitorar eficientemente, com antecedência de 2 meses, a volatilidade do mercado de milho que ocorrerá no futuro durante um período de 2 a 3 meses. Isto favorece o uso do mercado de opções como um mecanismo de gestão de risco.

Para os próximos trabalhos, sugere-se que sejam analisadas a relação entre o ganho de liquidez nas negociações no mercado de milho e o aumento da volatilidade média verificados para o período recente. Além disso, a realização de estudos que comparem a volatilidade implícita extraída pelo modelo de Black e Scholes com a obtida por outros modelos de precificação de opções será um tema muito interessante para um próximo trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, T. G.; BOLLERSLEV, T. Answering the skeptics: Yes, standard volatility models do provide accurate forecasts. **International economic review**, p. 885-905, 1998.

ANDRADE, S. C. de. **Estimação da volatilidade para hedge de carteiras de opções: Um teste de eficiência**. 1996. 53p. Dissertação (Mestrado em Economia) – Escola de pós-graduação em economia, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 1996.

BALL, C. A.; TOROUS, W. N. Futures Options and the Volatility of Futures Prices. **The Journal of Finance**, Vol. 41, No. 4. Sep., 1986, pp. 857-870.

BARBACHAN, J. S. F.; ORNELAS, J. R. H. Apreçamento de opções de IDI usando o modelo CIR. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 287-323, 2003.

BENAVIDES, G. Price Volatility Forecasts for Agricultural Commodities: An Application of Historical Volatility Models, Option Implieds and Composite Approaches for Futures Prices of Corn and Wheat. **Option Implieds and Composite Approaches for Futures Prices of Corn and Wheat**, 2003.

BENAVIDES, G.; CAPISTRÁN, C. Forecasting exchange rate volatility: The superior performance of conditional combinations of time series and option implied forecasts. **Journal of Empirical Finance**, v. 19, p. 627-639, 2012.

BERLOVA, E. **Informational content of the term structure of forward implied volatility in oil and gas futures market**. 2011. 101 p. Tese (Master of Business in Finance) - University of Otago, Otago, New Zealand. 2011.

BLACK, F. The pricing of commodity contracts. **Journal of Financial Economics**, 3,167-179, 1976.

BLACK, F; SCHOLES, M. The Pricing of Options and Corporate Liabilities. **Journal of Political Economy**, v. 81, n. 3, pp. 637 - 659, May/June, 1973.

BLAIR, Bevan J.; POON, Ser-Huang; TAYLOR, Stephen J. Modelling S&P 100 volatility: The information content of stock returns. **Journal of banking & finance**, v. 25, n. 9, p. 1665-1679, 2001.

BOYLE, P.P. Option Valuation Using a Three Jump Process. **International Option Journal**, n.3, p. 7-12, 1986

BRITTEN-JONES, M; NEUBERGER, A. Option Prices, Implied Price Processes, and Stochastic Volatility. **Journal of Finance**. 55: 839–866. 2000.

BRÜMMER, Bernhard et al. **Volatility in the after crisis period—A literature review of recent empirical research**. Working Paper 1, ULYSSES project, EU 7th Framework Programme, Project 312182 KBBE. 2012.1. 4-05, 2013.

CANINA, L; FIGLEWSKI, S. The Information Content of Implied Volatility. **The Review of Financial Studies**, p. 659-681. 1993.

CHRISTENSEN, B. J; PRABHALA, N. R. The Relation Between Implied and Realized Volatility. **Journal of Financial Economics**, p. 125-150. 1998.

CME GROUP. **Monthly agricultural review**. Disponível em: <<http://www.cmegroup.com/trading/agricultural/files/magu.pdf>>. Acessado em: 14/11/2013.

COX, J. C.; ROSS S. A. The valuation of options for alternative stochastic processes. **Journal of Financial Economics**, p.145-166, Jan. 1976.

COX, J. C.; ROSS, S. A.; RUBINSTEIN, M. Options Pricing: A Simplified Approach. **Journal of Financial Economics**, n. 7, pp. 229 - 263, 1979.

DAY, T. E; LEWIS, C. M. Stock market volatility and the information content of stock index options. **Journal of Econometrics**, v. 52, n. 1, p. 267-287, 1992.

EDERINGTON, L.; GUAN, W. Is implied volatility an informationally efficient and effective predictor of future volatility?. **Journal of Risk**, v. 4, p. 29-46, 2002.

EGELKRAUT, T. M.; GARCIA, P.; SHERRICK, B. J. The term structure of implied forward volatility: Recovery and informational content in the corn options market. In: NCR-134 CONFERENCE ON APPLIED COMMODITY PRICE ANALYSIS, FORECASTING AND MARKET RISK MANAGEMENT. **Proceedings...** St. Louis, MO, p. 1-26, 2003.

EGELKRAUT, T. M.; GARCIA, P.; SHERRICK, B. J. The term structure of implied forward volatility: Recovery and informational content in the corn options market. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 89, n. 1, p. 1-11, 2007.

FACKLER, P. L.; KING, R. P. Calibration of option-based probability assessments in agricultural commodity markets. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 72, n. 1, p. 73-83, 1990.

FAMA, E. F. The Information in the Term Structure. **Journal of Financial Economics**, 13:509–28. 1984.

Food and Agriculture Organization of The United Nations - FAO. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>>. Acessado em: 03 nov. 2013.

FEDERAL RESERVE. Disponível em: <<http://www.federalreserve.gov/releases/h15/data.htm>> Acessado em: 03 nov. 2013.

FLEMING, J. The Quality of Market Volatility Forecasts Implied by S&P 100 Index Option Prices. **Journal of Empirical Finance**, p. 317-345. 1998.

GABE, J.; PORTUGAL, M. S.. Volatilidade Implícita Versus Volatilidade Estatística: Um exercício utilizando opções e ações da Telemar S.A. **Revista Brasileira de Finanças**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 47-73, 2004.

GLASSERMAN, P.; WU, Q. Forward and future implied volatility. **International Journal of Theoretical and Applied Finance**, v. 14, n. 03, p. 407-432, 2011.

HARVEY, D.; LEYBOURNE, S.; NEWBOLD, P. Testing the equality of prediction mean squared errors. **International Journal of forecasting**, v. 13, n. 2, p. 281-291, 1997.

HESTON, S. A closed-form solution for option with stochastic volatility with applications to bond and currency options. **The Review of Financial Studies**, vol 6, n. 2. 1993.

HULL, J. C. **Options, Futures and Other Derivatives**. 6. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 2006.

HULL, J.; WHITE, A. The pricing of options on assets with stochastic volatility. **Journal of Finance**, 42, 1987.

HULL, J. C. **Fundamentos dos mercados futuros e de opções**. 6ª ed. São Paulo: BM&F, 2009.

IRWIN, S. H.; SANDERS, D. R. Financialization and structural change in commodity futures markets. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 44, n. 3, p. 371, 2012.

KAPOTAS, J. C.; SCHIRMER, P. P. S.; MANTEIGA, S. M. **Apreçamento de contratos de volatilidade a termo no mercado brasileiro**. IME-USP, 2003.

LAMOUREUX, C. G; LASTRAPES, W. D. Forecasting Stock-Return Variance: Toward an Understanding of Stochastic Implied Volatilities. **The Review of Financial Studies**. p. 293-326. 1993.

LEUTHOLD, R. M.; J.C.JUNKUS, J. C.; CORDIER, J. E. **The theory and practice of futures markets**. Lexington Books, 410 p. 1989.

LOCKE, P. **Information implied by futures option prices**. 2013. Disponível em: <<http://fek24.fek.su.se/Global/Forskning/Seminarier/Information%20implied%20by%20futures%20option%20prices%20June%202013.pdf>>. Acesso em: 03 jul. 2013.

MANFREDO, M. R.; LEUTHOLD R. M; IRWIN, S. H. Forecasting Fed Cattle, Feeder Cattle, and Corn Cash Price Volatility: The Accuracy of Time Series, Implied Volatility, and Composite Approaches. **Journal of Agricultural and Applied Economics**. 33(3): 523-538. 2001.

MELLO, A. R. de A. F. **Volatilidade implícita das opções de ações**: uma análise sobre a capacidade de previsão do mercado sobre a volatilidade futura. 2009. 45p. Dissertação (Mestrado em Finanças e Economia) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2010.

MERTON, R. C. The Theory of rational option pricing. **Bell Journal of Economics**, v. 4, p. 141-183, 1973.

MERTON, R. C. Option pricing when underlying stock returns are discontinuous. **Journal of Financial Economics**, n.3, p. 125-144, 1976.

MIKOSZEWSKI, R. **Precificação de opções de compra no mercado brasileiro**: uma abordagem relativa de método numérico frente ao modelo de Black& Scholes. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

PEREIRA, L. M.; SECURATO, J. R. Avaliação de Empresas pelo Modelo de Apreçamento de Opções com o Uso da Volatilidade Implícita Setorial de Ativos: Um Estudo Empírico. **Caderno de Pesquisas em Administração**, São Paulo, v. 11, p. 41-56, 2010.

POON, S. H.; GRANGER, C. W. Forecasting volatility in financial markets: A review. **Journal of Economic Literature**, v. 41, n. 2, p. 478-539, 2003.

PURCELL, W. D.; KOONTZ, S. R. **Agricultural futures and options**: principles and strategies. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

RODRIGUES, C. **Volatilidade implícita**: Importância na valorização das opções financeiras e significado dos índices de volatilidade implícita. 2010. 85p. Dissertação (Mestrado em Contabilidade Internacional) – Instituto Politécnico de Lisboa, Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Lisboa, Lisboa, 2010.

SHERRICK, B. J.; GARCIA, P.; TIRUPATTUR, V. Recovering probabilistic information from option markets: Tests of distributional assumptions. **Journal of Futures Markets**, v. 16, n. 5, p. 545-560, 1996.

SABINO, P. A. A.; BRESSAN, A. A. Avaliação do Desempenho Preditivo de Modelos para a Volatilidade: um Estudo para o Mercado Acionário Brasileiro entre 2000 e 2009. In: SEMEAD

EMPREENDEDORISMO E INOVAÇÃO, XII, 27 e 28 de Ago. de 2009. São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, SP, 2009, p. 1-15.

SOARES, G.B. **Precificação de Opções de Telebrás: Uma comparação entre os modelos Black-Scholes e Hull-White.** Monografia (Graduação em Economia) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SOUZA, W. A. R.; MARQUES, P. V.; MARTINES FILHO, J. G. O Uso da Estrutura a Termo das Volatilidades Implícitas Futuras das Opções de Soja do CME GROUP para Previsões da Volatilidade e dos Preços a Vista em Mato Grosso. IN: CONGRESSO SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 48, 2010, Campo Grande, MS, **Anais ...** Campo Grande, MS, 2010, p. 1-21. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/15/173.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2013.

SZAKMARY, A.; ORS, E.; KIM, J. K.; DAVIDSON III, W. N.I. The predictive power of implied volatility: Evidence from 35 futures markets. **Journal of Banking & Finance**, v. 27, n. 11, p. 2151-2175, 2003.

TONIN, J. M. **Aplicabilidade dos modelos de precificação para as opções sobre contratos futuros de café arábica na BM&FBOVESPA.** 2009. 165p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Programa de pós graduação em Economia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

US Energy Information Administration. Disponível em: <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=90&t=4>. Acessado em: 08/03/2013.

WANG, Zhiguang; FAUSTI, Scott W.; QASMI, Bashir A. Variance risk premiums and predictive power of alternative forward variances in the corn market. **Journal of Futures Markets**, v. 32, n. 6, p. 587-608, 2012.

WU, Feng; GUAN, Zhengfei. Forecasting Volatilities of Corn Futures at Distant Horizons. In: **2010 Annual Meeting, July 25-27, 2010, Denver, Colorado.** Agricultural and Applied Economics Association, 2010.

YU, Wayne W.; LUI, Evans CK; WANG, Jacqueline W. The predictive power of the implied volatility of options traded OTC and on exchanges. **Journal of Banking & Finance**, v. 34, n. 1, p. 1-11, 2010.

XU, X.; TAYLOR, S. J. Conditional volatility and the informational efficiency of the PHLX currency options market. **Journal of Banking & Finance**, v. 19, n. 5, p. 803-821, 1995.

APÊNDICE A

APÊNDICE A.1 – Dados de opções utilizados.

Dia da negociação	Vencimento da opção Limites dos intervalos	Referência aos contratos futuros
24/02/2006	20/04/2006 23/06/2006	Maio – 2006 Julho – 2006
20/04/2006	23/06/2006 25/08/2006	Julho – 2006 Setembro – 2006
23/06/2006	25/08/2006 24/11/2006	Setembro – 2006 Dezembro – 2006
22/09/2006	24/11/2006 23/02/2007	Dezembro – 2006 Março – 2007
22/12/2006	23/02/2007 20/04/2007	Março – 2007 Maio – 2007
23/02/2007	20/04/2007 22/06/2007	Maio – 2007 Julho - 2007
20/04/2007	22/06/2007 24/08/2007	Julho – 2007 Setembro - 2007
22/06/2007	24/08/2007 23/11/2007	Setembro – 2007 Dezembro - 2007
21/09/2007	23/11/2007 22/02/2008	Dezembro – 2007 Março - 2008
21/12/2007 *	22/02/2008 25/04/2008	Março – 2008 Maio - 2008
22/02/2008	25/04/2008 20/06/2008	Maio – 2008 Julho - 2008
25/04/2008	20/06/2008 22/08/2008	Julho – 2008 Setembro - 2008
20/06/2008	22/08/2008 21/11/2008	Setembro – 2008 Dezembro – 2008
26/09/2008	21/11/2008 20/02/2009	Dezembro – 2008 Março – 2009
26/12/2008	20/02/2009 24/04/2009	Março – 2009 Maio - 2009
20/02/2009	24/04/2009 26/06/2009	Maio – 2009 Julho – 2009
24/04/2009	26/06/2009 21/08/2009	Julho – 2009 Setembro – 2009
26/06/2009	21/08/2009 20/11/2009	Setembro – 2009 Dezembro – 2009
25/09/2009	20/11/2009 19/02/2010	Dezembro – 2009 Março – 2010
24/12/2009	19/02/2010 23/04/2010	Março – 2010 Maio – 2010
19/02/2010	23/04/2010 25/06/2010	Maio – 2010 Julho – 2010
23/04/2010	25/06/2010 27/08/2010	Julho – 2010 Setembro – 2010

APÊNDICE A.1 – Dados de opções utilizados (continuação).

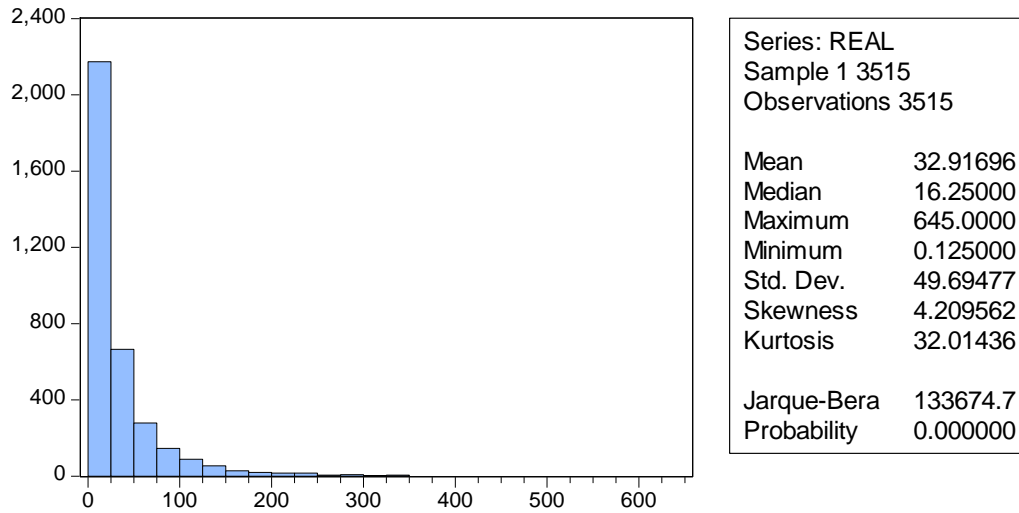
25/06/2010	27/08/2010 26/11/2010	Setembro – 2010 Dezembro – 2010
24/09/2010	26/11/2010 18/02/2011	Dezembro – 2010 Março – 2011
23/12/2010	18/02/2011 21/04/2011	Março – 2011 Maio – 2011
18/02/2011	21/04/2011 24/06/2011	Maio – 2011 Julho – 2011
21/04/2011	24/06/2011 26/08/2011	Julho – 2011 Setembro – 2011
24/06/2011	26/08/2011 25/11/2011	Setembro – 2011 Dezembro – 2011
23/09/2011	25/11/2011 24/02/2012	Dezembro – 2011 Março – 2012
23/12/2011	24/02/2012 20/04/2012	Março – 2012 Maio – 2012
24/02/2012	20/04/2012 22/06/2012	Maio – 2012 Julho – 2012
20/04/2012	22/06/2012 24/08/2012	Julho – 2012 Setembro – 2012
22/06/2012	24/08/2012 23/11/2012	Setembro – 2012 Dezembro – 2012
21/09/2012	23/11/2012 22/02/2013	Dezembro – 2012 Março – 2013
21/12/2012	22/02/2013 26/04/2013	Março – 2013 Maio – 2013
22/02/2013	26/04/2013 21/06/2013	Maio – 2013 Julho – 2013
26/04/2013	21/06/2013 23/08/2013	Julho – 2013 Setembro – 2013
21/06/2013	23/08/2013 22/11/2013	Setembro – 2013 Dezembro – 2013

* Não havia dados referentes a dezembro de 2007 na base de dados coletada, o que impossibilitou o cálculo da volatilidade implícita para o período de fevereiro a abril de 2008, entretanto a análise não foi prejudicada.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

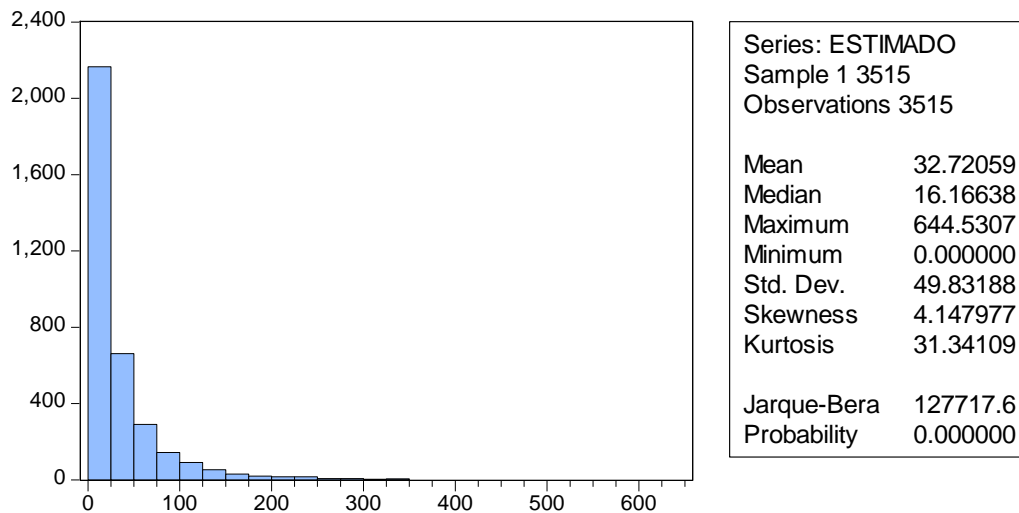
APÊNDICE B

APÊNDICE B.1 - Histograma e estatística descritiva dos prêmios negociados



Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.

APÊNDICE B.2 - Histograma e estatística descritiva dos prêmios calculados



Fonte: elaboração própria a partir dos dados do trabalho.