

4 Revisão bibliográfica

Diversas metodologias têm sido disponíveis na análise da modelagem de mercados de commodities, principalmente, porque os processos estocásticos formam a base do apreçamento de derivativos e dos modelos de gestão de riscos, sendo este um tema de fundamental relevância em economia e em finanças. Ademais os processos estocásticos nos permitem modelar a evolução dos preços através do tempo e atribuir probabilidades a possíveis preços futuros em função dos preços à vista e a termo e de um conjunto de parâmetros que descrevem a variabilidade dos preços ao longo do tempo, na expectativa de encontrar padrões empíricos.

Desta forma, este capítulo propõe-se a sintetizar alguns dos principais artigos técnicos que nortearam esta pesquisa. Cabe ressaltar que as contribuições referentes ao artigo de Das (1998) serão consideradas à parte de forma mais apropriada e detalhada no capítulo 5, uma vez que esta pesquisa visa abordar sua modelagem.

Contudo, apesar das inúmeras tentativas de modelagem dos preços de commodities, tais estudos podem ser divididos grosso modo em dois pontos de vista distintos: aqueles direcionados por modelos estatísticos e aqueles baseados em teorias microeconômicas e econométricas. Ou seja, enquanto a primeira abordagem considera que os modelos são representados por variáveis de estado com propriedades estatísticas adequadas capazes de representar fatos empíricos (ou fatos estilizados) das séries de preços analisadas. A segunda abordagem considera que os preços seguem movimentos originários das condições microeconômicas de equilíbrio entre a oferta e demanda. Esta classe de modelos é denominada também por modelos estruturais ou de equilíbrio.

Embora o foco desta pesquisa seja a primeira abordagem, aqui serão descritos os artigos que direcionam a modelagem de preços de commodities de uma forma geral, uma vez que visivelmente distintas existe uma convergência entre as duas óticas.

O capítulo será dividido em duas seções. Primeiramente, serão apresentados os artigos diretamente relacionados à pesquisa (referentes à primeira linha de abordagem) e que tiveram aplicação empírica para commodities que não fossem agrícolas. Posteriormente, foram considerados artigos sob ambos os pontos de vista, cuja análise empírica foi empregada em mercados agrícolas.

4.1.

Artigos estreitamente relacionados à pesquisa, cuja aplicação empírica não abordou os mercados agrícolas

Gibson e Schwartz (1990): Desenvolveram e testaram empiricamente um modelo de dois fatores para os preços do petróleo. O objetivo dos autores era apresentar uma abordagem mais geral que pudesse ser facilmente aplicada no apereçamento de ativos contingentes reais e financeiros do petróleo. Sendo assim, o preço à vista e o retorno de conveniência foram assumidos como os fatores estocásticos (ou variáveis de estado) determinantes para o preço destes ativos. Estas variáveis foram modeladas, respectivamente, pelos processos geométrico browniano e de reversão à média. Através da aplicação do Lema de Itô foi definida a equação diferencial parcial (EDP) de segunda ordem para a mudança instantânea de preço do ativo contingente, em função destes dois fatores. O mesmo procedimento resultou na EDP para o preço futuro do petróleo. Em primeiro lugar foi realizada a estimação conjunta dos processos estocásticos seguidos pelas variáveis de estado. Os parâmetros do modelo foram obtidos utilizando-se os preços semanais do contrato futuro do petróleo de janeiro de 1984 a novembro de 1988. Os resultados mostraram que enquanto o retorno de conveniência tende a reverter para a sua média de longo prazo sendo a variável de estado de maior volatilidade, o preço à vista é bem menos volátil e parece seguir um passeio aleatório. Dado a presença no modelo de outra variável de estado além do preço, houve a necessidade de se estimar o preço de mercado (λ) por unidade de risco do retorno de conveniência. De posse dos parâmetros obtidos anteriormente, o preço de mercado foi calculado ao se resolver numericamente a EDP para o preço futuro. Mais precisamente, a estimação contou a princípio com valores arbitrários para o preço de mercado, que ao ser comparado com os dados empíricos conduziu a obtenção do erro de estimação. O procedimento foi repetido de forma a se encontrar a estimativa ótima através da minimização do erro

quadrático. Os resultados deste estudo apontaram que o modelo mostrou-se um instrumento confiável na valoração de contratos futuros de curto prazo. Além de se mostrar capaz em identificar a diferença entre a volatilidade dos preços à vista e aquela dos contratos futuros. Este fato aliado ao padrão decrescente da volatilidade dos contratos futuros para maturidades maiores (hipótese de Samuelson) permitiu ao modelo estar condizente com as evidências empíricas do relacionamento entre os preços à vista e futuro de commodities.

Schwartz (1997): Conforme discutido no capítulo anterior, a modelagem da dinâmica de preços obteve avanços importantes com o advento dos processos de reversão à média e de saltos. Todavia, outra maneira de se aumentar a qualidade dos modelos não se limita a consideração de apenas uma variável de estado (designadamente, o preço). A introdução de uma ou várias variáveis de estado extras, como por exemplo, o retorno de conveniência e/ou a volatilidade estocástica, podem enriquecer a representação do processo estocástico. Sob esta ótica, Schwartz (1997) apresentou e comparou três modelos para o comportamento dos preços de commodities. O primeiro modelo trata-se de um simples modelo de um fator (uma única variável estocástica), pelo qual foi considerado que o logaritmo do preço à vista segue um processo de reversão à média do tipo Ornstein-Uhlenbeck. Já o segundo modelo, à luz de Gibson e Schwartz (1990), considerou como variáveis estocásticas o preço à vista, que segue um movimento geométrico browniano; e o retorno de conveniência, que evolui segundo um processo de reversão à média. Por último, ao assumir que a taxa de juros estocástica segue um processo de reversão à média como em Vasicek (1977), o segundo modelo pôde ser estendido no modelo de três fatores. A correlação das variáveis de estado foi uma das premissas adotada pelo autor. Para os três modelos foram derivadas as equações diferenciais parciais para os preços futuros, cujas soluções analíticas são conhecidas; exceto para o modelo de dois fatores, que neste caso teve de ser tratado numericamente. A linearidade do logaritmo dos preços em função das variáveis de estado é uma propriedade destes modelos. Tal característica é bastante útil do ponto de vista econométrico para a estimação dos parâmetros. No entanto, visto que as variáveis de estado não são observáveis diretamente nos mercados, mas apenas o preço futuro, a implementação empírica dos modelos ainda encontrava dificuldades. Os modelos

foram então colocados na forma espaço-estado, permitindo a aplicação do Filtro de Kalman para estimar as variáveis de estado não observáveis e os parâmetros do modelo. Os dados usados para testar a metodologia consistiram de observações semanais dos preços futuros para as commodities comerciais cobre e petróleo e para a commodity preciosa ouro, no período de 1985 a 1995. Para uma dada commodity particular foram usados contratos futuros específicos, uma vez que eles variam para diferentes commodities e diferentes períodos de tempo. Os contratos tiveram uma data de maturidade fixa, sendo classificados de acordo com a proximidade desta data num intervalo de 1 a 18 meses a depender da disponibilidade de dados completos para os períodos analisados. Em cada caso as informações foram separadas em painéis com cinco contratos futuros para a estimação. Ademais o autor contou ainda com a série histórica dos preços futuros de petróleo cedidos pela empresa Enron para o período de 1993 a 1996. Estes dados foram reunidos num painel à parte, no qual se utilizou o preço de 10 contratos futuros de longa maturação. Os principais resultados deste estudo podem ser sumarizados nos seguintes aspectos:

- As commodities comerciais mostraram que têm forte processo de reversão à média com parâmetros altamente significativos. Contudo, o mesmo não foi verificado para os preços do ouro no período analisado;
- Ao contrário do modelo de um fator, os modelos de dois e três fatores ajustaram-se adequadamente à estrutura a termo dos preços futuros. No caso dos dados de longo prazo do petróleo e do cobre, em algumas vezes este desempenho torna-se até mesmo indistinguível, e
- Embora cada modelo tenha implicações diferentes para a estrutura a termo da volatilidade dos retornos dos futuros de commodities, uma característica comum aos três modelos refere-se ao fato de que as volatilidades serão independentes das variáveis de estado e apenas dependerão do tempo até a maturidade dos contratos. Enquanto o modelo 1 apresentou baixa capacidade de ajuste a volatilidade dos dados, os modelos 2 e 3 mostraram uma aderência surpreendente com resultados muito similares de decréscimo para curtas maturidades e estabilização para maturidades maiores.

Deng (1998): A reestruturação da indústria da eletricidade na década de 90, até então vista como um monopólio, impulsionou a comercialização desta

commodity no mercado norte-americano. Diante deste processo, os riscos de mercado tornaram-se proeminentes e a demanda por derivativos aumentou bastante. Neste contexto, a necessidade de se obter modelos mais acurados de análise de preços motivou Deng (1998) a analisar o comportamento dos preços da energia elétrica. No entanto, dentre todas as commodities, a eletricidade apresenta um comportamento peculiar por se tratar de uma mercadoria não estocável. Esta característica exige que o equilíbrio entre as forças de mercado seja mantido continuamente, caso contrário, a integridade de todo o sistema pode ser comprometida. Contudo, os choques entre a demanda (função bastante inelástica do preço) e a oferta (marcada por mudanças abruptas no caso de interrupção da usina ou falha na rede de transmissão) resultam na presença de saltos e *spikes*³ na trajetória dos preços, que se somando aos seus padrões altamente sazonais, complicam ainda mais o processo de modelagem. O autor propôs três tipos de processos de difusão de saltos de reversão à média para descrever os preços da commodity de energia, sendo eles: (i) processos com volatilidade determinística; (ii) processos com mudança de regime e (iii) processos com volatilidade estocástica. Uma hipótese adotada no processo de modelagem foi que o tamanho dos saltos distribui-se exponencialmente, dado que esta situação é apropriada para reproduzir os *spikes*. Este artigo contou ainda com a utilização dos métodos de transformação de Fourier, desenvolvidos em Duffie, Pan e Singleton (2000), para a obtenção das fórmulas de apreçamento de vários derivativos sobre a commodity em questão. Embora o autor mencione sumariamente como se podem ajustar os modelos usando a série histórica de preços, o procedimento formal de estimação dos parâmetros não fez parte do escopo da obra. Por último, foi construída uma abordagem de opções reais para a valoração de ativos reais e da decisão ótima de investimento, tendo como exemplo de aplicação o cenário da indústria desregulamentada de energia elétrica.

Pindyck (1999): Apresentou um estudo sobre o comportamento dos preços da energia no mercado norte-americano, utilizando-se dos dados históricos de até 127 anos do petróleo, do carvão e do gás natural. O objetivo deste artigo consistiu

³ Movimentos crescentes muito acentuados logo seguidos por quedas de mesma amplitude, fazendo com que o preço retorne ao seu nível original.

em obter processos estocásticos alternativos que fossem compatíveis a este comportamento de longo prazo, sem qualquer tentativa de modelagem estrutural. Primeiramente analisou-se a possibilidade de reversão à média para as séries de preços. Para cada recurso ajustou-se uma tendência quadrática ao longo do tempo, usando todos os dados da amostra bem como os dados separados das décadas de 1960, 1970 e 1980. Os resultados encontrados sugeriram que os preços revertem à média a uma linha de tendência quadrática, embora a taxa de reversão seja lenta, tendo até uma década para ocorrer. Ainda com o intuito de analisar a estacionariedade das séries, foi aplicado o teste da raiz unitária (ADF – Augmented Dickey Fuller), que se mostrou não conclusivo devido ao tamanho da amostra. No entanto, associado ao teste da razão da variância, os resultados revelaram que os preços possuem reversão, mas a uma taxa pequena; de forma a permitir aos tomadores de decisões tratarem os processos de preços como um movimento geométrico browniano ou qualquer outro passeio aleatório. Além disso, observou-se que a média para a qual os preços dos recursos revertem flutuaram continuamente ao longo do tempo. O autor mostrou ainda que mesmo para os modelos mais simples de recursos minerais esgotáveis, é esperado que o nível e a inclinação da linha de tendência flutuem ao longo do tempo; sendo este comportamento uma resposta às oscilações da demanda, dos custos de extração e das reservas. Em face desta teoria, foi proposta uma versão multivariada do processo de Ornstein-Uhlenbeck incorporando a reversão a uma linha de tendência estocasticamente flutuante. Esta linha de tendência reflete o custo marginal total de longo prazo, que por se tratar de uma variável não observável, fez-se necessária a aplicação dos métodos de Filtro de Kalman na estimação das variáveis de estado. Os resultados mostraram que o modelo obteve bom desempenho na previsão dos preços do petróleo, porém menos satisfatórios para o carvão e o gás natural. Segundo o autor, as dificuldades com relação a estas duas commodities poderiam ser decorrentes de problemas de inicialização e de sensibilidade das estimativas para os dados iniciais da amostra.

Schwartz e Smith (2000): Desenvolveram um modelo de dois fatores para os preços de commodities que formalmente permite uma média de longo prazo variante no tempo e incorpora movimentos de curto e longo prazo. Neste modelo o logaritmo do preço à vista é decomposto em dois fatores estocásticos, ou seja,

$\ln(S_t) = \chi_t + \xi_t$, sendo estes as variações de curto prazo e o preço de equilíbrio de longo prazo, respectivamente. Enquanto a primeira variável foi assumida seguir um processo de reversão à média do tipo Ornstein-Uhlenbeck, para a segunda adotou-se o movimento geométrico Browniano. As variáveis de estado são correlacionadas. O modelo foi reescrito sob uma versão neutra ao risco, permitindo assim a obtenção da equação dos preços futuros. Visto que as variáveis de estado são não observáveis, o modelo foi colocado na forma espaço de estados e estimado usando o filtro de Kalman. Para a estimação dos parâmetros do modelo foi utilizada a mesma base de dados de Schwartz (1997), que se referia aos preços futuros do petróleo e aos preços de longo prazo cedidos pela empresa Enron. Os resultados mostraram que em geral o modelo se ajustou melhor aos contratos de médio prazo, com maiores erros para contratos de prazo muito curto e muito longo. Os erros foram maiores no ajuste dos contratos de curto prazo nos dados de mercado e nos contratos de nove anos nos dados da Enron. Os autores mostraram ainda a equivalência entre este modelo e o modelo de Gibson e Schwartz (1990), uma vez que o preço de curto prazo é uma função linear do retorno de conveniência. No entanto, este modelo é mais fácil de ser interpretado e apresenta algumas vantagens em relação aos demais modelos de dois fatores. A primeira vantagem refere-se ao fato deste modelo não usar diretamente o conceito de retorno de conveniência que é mais abstrato. As noções de variações de curto prazo e preço de equilíbrio de longo prazo são mais compreensíveis e conduzem a resultados mais transparentes. A segunda vantagem é que o modelo é mais ortogonal em sua dinâmica, ou seja, a relação entre os fatores estocásticos é estabelecida unicamente pela correlação de seus incrementos. Esta característica contribui na identificação dos impactos de cada fator no processo de apreçamento dos ativos. Além destas vantagens, o modelo pode ainda ser adaptado para outras situações e pode ser estendido de maneira a considerar mais variáveis estocásticas. Contudo, os autores fazem uma ressalva de que a melhora do desempenho do modelo em termos da sua capacidade de descrever a evolução estocástica dos preços deve ser balanceada com o princípio da parcimônia. Desta forma, os modelos mais complexos podem não ser adequados, dado a dificuldade de sua utilização na valoração de opções reais ou financeiras. Porém, apesar deste modelo ser mais complexo do que os modelos de um fator comumente usados, os autores acreditam que o benefício de se obter um modelo mais realista da

dinâmica dos preços de curto e longo prazo pode melhorar a qualidade do processo de valoração, com um mínimo de esforço adicional.

4.2.

Artigos testados empiricamente em commodities agrícolas sob as duas linhas de pesquisa de modelagem

Bessembinder, Coughenour, Seguin e Smoller (1995): Apresentaram um estudo sobre o equilíbrio de preços de diversos ativos, que permitiu identificar evidências do processo de reversão à média. Dentre as contribuições desta pesquisa, os autores apontaram a possibilidade de implementação do método em vários mercados, inclusive naqueles onde os preços à vista são ausentes. Além da eficiência do teste em detectar a reversão à média, que é esperada ocorrer em equilíbrio, sob a condição de não arbitragem descrita pelo modelo do custo de carregamento. A metodologia utilizada fundamentou-se nas relações entre os níveis de preço e a inclinação da estrutura a termo dos preços futuros, uma vez que a relação inversa entre estes elementos constitui-se em indícios de reversão. Estas constatações puderam ainda ser obtidas pela análise da elasticidade. Sob condição de equilíbrio, foi possível inferir que a elasticidade do valor esperado do preço à vista em relação ao preço à vista é inferior a um, caracterizando-se em indicativo de reversão desta variável. E neste caso a derivada da inclinação da estrutura a termo deve ser negativa. A análise empírica foi conduzida empregando-se dados de commodities agrícolas (trigo, suco de laranja, gado e açúcar), de commodities minerais (petróleo, ouro, prata e platina) e de ativos financeiros (índice S&P500 e letras do tesouro). As observações utilizadas compunham-se de preços diários, compreendidos no período de janeiro de 1982 a dezembro de 1991, de contratos futuros com diferentes horizontes de maturidades. Assim como em Fama e Gibson, os preços futuros foram aplicados como estimadores (*proxies*) do preço à vista. Os resultados mostraram que para as commodities agrícolas e para o petróleo, as reversões à média foram significativas e elevadas; enquanto que para os metais, apesar de significativa, o grau da reversão foi bem inferior. Em relação aos ativos financeiros, verificou-se uma fraca evidência de reversão para as letras do tesouro; ao passo que para o índice S&P500 os resultados não foram conclusivos. Pelo critério da elasticidade, foi possível corroborar as evidências anteriores.

Bessembinder, Coughenour, Seguin e Smoller (1996): Apresentaram uma análise das condições econômicas pelas quais se espera que a hipótese de Samuelson seja sustentada. A hipótese de Samuelson prevê a relação entre a volatilidade dos preços futuros e o tempo até o vencimento do contrato, de modo que mudanças crescentes na volatilidade devem ocorrer à medida que se aproxima a data de expiração. Tal comportamento tem implicações importantes, sobretudo, na valoração de derivativos de futuros que requerem o conhecimento da dinâmica da volatilidade do preço. Diversos estudos têm investigado empiricamente a hipótese de Samuelson. Porém, as evidências têm sido antagônicas, sendo a hipótese válida somente em alguns mercados. O objetivo principal de Bessembinder *et al.* foi justamente definir estes mercados. A análise previu que a hipótese de Samuelson é mantida apenas em mercados onde as variações do preço à vista apresentam uma componente temporária. Desta forma, os investidores esperam que as mudanças desta componente sejam revertidas no futuro. Os autores apoiaram-se nas condições de equilíbrio dos mercados. A presença da componente temporária nas mudanças do preço à vista implica em perdas esperadas de capital (ou redução nas taxas de ganhos de capital) após aumentos de preços, e vice-versa. No entanto, o ativo à vista deve remunerar um retorno competitivo que justifique a manutenção do estoque da commodity, ou seja, a variação das taxas de ganho de capital deve ser em equilíbrio compensada pelas mudanças nos custos de carregamento do estoque. A condição de não arbitragem estabelecida pelo modelo do custo de carregamento possibilita que o custo econômico de carregamento do estoque seja revelado pela inclinação da estrutura a termo futura, que é observável. Desta forma, a combinação destes fatos permitiu que os autores validassem a hipótese de Samuelson nos mercados onde há covariância negativa entre as variações do preço à vista e da inclinação da estrutura a termo dos preços futuros. Em particular, a covariância positiva entre o retorno de conveniência e os preços à vista leva ao fato de que, em equilíbrio, os preços à vista revertem à média, sendo esta a condição suficiente para suportar a hipótese de Samuelson. Esta reversão está associada à variação no custo de carregamento do estoque, o que segundo os autores ocorre em mercados que apresentam variação no retorno de conveniência. As previsões teóricas foram testadas em onze mercados futuros, pelos quais foram observadas evidências empíricas consistentes. A hipótese de Samuelson foi fortemente sustentada para commodities agrícolas e para o

petróleo, onde verificaram-se relações expressivamente negativas entre os preços e a inclinação a termo futura – indicativo da presença de uma componente de reversão à média substancial nos preços à vista. Para os mercados de metais, onde o grau de reversão mostrou-se inferior, a hipótese de Samuelson foi constatada, porém, em menor intensidade. No entanto, para os ativos financeiros a hipótese não foi garantida.

Sørensen (2002): Muitas commodities, tais como os produtos agrícolas e o gás natural, apresentam sazonalidade em seus preços. Este comportamento deve-se, particularmente, aos ciclos da colheita e a variação do consumo em resposta aos padrões climáticos. Levando esta característica em consideração, Sorensen (2002) apresentou um estudo sobre o comportamento estocástico dos preços futuros de commodities agrícolas. O modelo proposto é similar ao modelo de dois fatores de Schwartz e Smith (2000), contando ainda com a introdução de uma componente determinística para modelar a sazonalidade. A idéia básica da modelagem consistiu em capturar as mudanças de preço que são inteiramente relacionados à época, assim como os movimentos que são provenientes de alterações temporárias e permanentes na oferta ou na demanda. A sazonalidade foi modelada por uma combinação linear de funções trigonométricas com frequências sazonais. Ao passo que os fatores de curto e longo prazo foram presumidos seguir os processos de Ornstein-Uhlenbeck e Geométrico Browniano, respectivamente. À semelhança de Schwartz (1997), os preços futuros foram determinados de acordo com a teoria da não-arbitragem, ou seja, calculando o valor esperado do preço à vista futuro sob medida martingal equivalente (MME). Como resultado do uso de tal medida na determinação da dinâmica das variáveis de estado, foi assumido que o prêmio de risco era constante. Pelo modelo apresentado, o logaritmo dos preços futuros tratava-se de funções afins das duas variáveis de estado estocásticas. Este fato, aliado às suposições sobre a dinâmica das variáveis de estado, possibilitou a estimação através do Filtro de Kalman e da função máxima verossimilhança. O modelo foi implementado empiricamente para as commodities milho, soja e trigo com base em informações semanais de preços futuros oriundos da Chicago Board of Trade (CBOT) no período de janeiro 1972 a julho de 1997. Os dados foram disponibilizados na forma de um painel incompleto que serviu como entrada para o filtro de Kalman. Os contratos futuros

de milho e de trigo tinham cinco meses de vencimento (março, maio, julho, setembro e dezembro) enquanto que para a soja as maturidades chegavam até sete meses (janeiro, março, maio, julho, agosto, setembro e novembro). Os resultados da estimação mostraram que as componentes sazonais acarretaram um pico de preços dois a três meses antes do período de colheita, atingindo seus valores mínimos com o fim da safra. Estes padrões de preços justificam-se pelo fato de que para manter o equilíbrio entre a oferta e a demanda, os períodos de baixa oferta são os momentos de alta de preços, enquanto que os períodos de grandes ofertas os preços estão baixos. Ainda na discussão sobre os padrões sazonais estimados, foram constatadas evidências empíricas a respeito da teoria do armazenamento, na qual estabelece um relacionamento negativo entre o estoque e o retorno de conveniência.

Bressan (2004): Elaborou um estudo com o objetivo de testar a aplicabilidade de modelos de previsão de séries temporais no auxílio à tomada de decisão na compra e venda de contratos futuros de boi gordo, café e soja na Bolsa de Mercadorias e Futuros (BM&F). A metodologia adotada consistiu na construção de modelos univariados de forma a captar o comportamento dos preços ao longo do tempo analisado e com isso calcular previsões *ex-post* um passo à frente. Os modelos abordados foram: ARIMA, Modelos Lineares Dinâmicos (também conhecidos por Modelos Estruturais)⁴ e Redes Neurais Artificiais⁵.

⁴ Em contraposição à abordagem estática dos modelos ARIMA, os modelos Estruturais são formulados com a característica de incorporar mudanças nos parâmetros à medida que ocorrem evoluções na série temporal estudada. O aumento no número de observações da série é interpretado, então, como informação adicional ao conjunto de informações atuais, fazendo com que os parâmetros apresentem uma evolução dinâmica, impedindo qualquer quantificação estática das relações subjacentes ao comportamento global da série (POLE *et. al.*, 1994). Em tais modelos, a série é decomposta em termos da tendência, do ciclo, da sazonalidade e de um componente irregular.

⁵ Os modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) se diferenciam dos modelos tradicionais de previsão por serem modelos não-paramétricos, envolvendo algoritmos de *aprendizado*. Esses algoritmos buscam imitar a estrutura de interconexões do cérebro humano, com o intuito de incorporar o padrão de comportamento de uma série temporal de modo a prever da maneira mais eficiente possível valores futuros desta (TURBAN, 1993).

A base de dados utilizada contou com informações semanais das cotações nos mercados físico e futuro da BM&F entre 1996 a 1999. No entanto, para a verificação dos resultados foram analisados os meses em que existiam contratos futuros negociados entre janeiro de 1998 e dezembro de 1999. À medida que novas informações eram incorporadas, os modelos foram reestimados para cada contrato, obtendo-se assim previsões mais precisas para a semana em que se realizava a negociação do contrato. O desempenho dos modelos nos diferentes mercados foi avaliado através da aplicação das previsões em simulações da operação de compra e venda de contratos futuros. O processo de simulação foi realizado de modo que fossem tomadas posições compradas no mercado futuro (se o valor previsto excedesse o preço futuro) e posições vendidas (se a previsão fosse inferior a cotação), seguindo as regras de comercialização da BM&F e considerando os custos de realização das operações. A partir destas operações foram calculados os retornos médios de cada modelo, uma vez que se pretendia obter um indicativo do potencial ou da limitação de cada um deles. Porém, visto que o retorno financeiro é uma medida sem muito valor para julgar o desempenho de um sistema de negociação, o autor adotou o Índice de Sharpe como parâmetro de comparação dado que o mesmo considera a relação risco-retorno. Os resultados apresentaram retornos financeiros positivos na maioria dos contratos analisados, indicando o potencial de utilização desses modelos como ferramenta de decisão em negociações de contratos para datas próximas ao vencimento, com destaque para operações fundamentadas nas previsões nos MLD e ARIMA havendo, contudo, diferenças de desempenho preditivo. Quanto ao modelo de Rede Neurais, pôde-se verificar um retorno médio negativo para os contratos de café, limitando assim a sua aplicabilidade como ferramenta de auxílio à tomada de decisão dos agentes que transacionam esta commodity, notavelmente marcada pela alta volatilidade de preços no mercado físico. Além disso, o autor ressaltou o elevado grau de subjetividade na interpretação das variáveis envolvidas nos modelos de Rede Neurais.

Geman e Nguyen (2005): Apresentaram um estudo para o caso da soja, indicando o nível de estoque como elemento fundamental na explicação da volatilidade dos preços e da dinâmica da curva a termo. Foi construído um banco de dados com informações anuais, trimestrais e mensais sobre o estoque de soja

mundial usando dados agregados dos Estados Unidos, do Brasil e da Argentina. Através deste banco de dados os autores mostraram que, independente da escala temporal usada, a volatilidade dos preços é uma função linear crescente do nível de estoque inverso, esta quantidade também é denominada de “escassez”. Para entender o impacto do estoque na volatilidade, foi rodada uma regressão, onde a variável “escassez” foi incluída. Os resultados mostraram a presença de uma correlação positiva não apenas para o calendário anual, mas também para os dados de menor periodicidade. Embora, os estoques - trimestrais e mensais - e a volatilidade estimada tenham exibido um padrão sazonal, o procedimento de estimação pôde ser validado através da dessazonalização das séries. Os autores estenderam ainda a análise de forma a determinar o quanto o estoque norte-americano é representativo para o estoque mundial, além de mostrar a sua influência sobre a volatilidade dos preços da soja. Os impactos dos estoques dos Estados Unidos foram quase o mesmo para a volatilidade e para os estoques mundiais. O artigo propôs ainda uma abordagem para a dinâmica da estrutura a termo dos preços futuros da soja através da inclusão de variáveis de estado, sucessivamente usando dois e três fatores. Os dois primeiros fatores considerados foram o preço à vista e a média de curto prazo da sua componente estocástica dessazonalizada. O processo de reversão à média foi adotado para ambas as variáveis estocásticas, uma vez que reflete o comportamento de auto-regulação entre a oferta e a demanda. O padrão sazonal dos preços à vista e da volatilidade foi controlado através de funções determinísticas apropriadas. Os processos foram ainda escritos sob medida martingal equivalente e a fórmula para o preço futuro na data de maturação do contrato foi derivada. O modelo foi expandido de forma a considerar também a variável de estado escassez, visto que as análises empíricas dos autores revelaram a habilidade do inventário em explicar os preços à vista, sua volatilidade e por sua vez a curva a termo. A dinâmica estocástica desta variável também foi assumida seguir o processo de reversão à média. Para a estimação dos modelos foram utilizados preços de contratos futuros no período de 1974 a 2000 obtidos da Chicago Board Trade (CBOT), além do banco de dados de estoque já descrito anteriormente. A metodologia contou com a aplicação recursiva do Filtro de Kalman para estimar as variáveis de estado. A motivação de seu uso está relacionada a duas razões. (i) Os preços dos contratos com maturidades distantes não são disponíveis em todas as datas observadas. (ii) Assim como na maioria dos

mercados de commodities agrícolas, não existe preço à vista subjacente pertencente aos dados futuros de soja. O procedimento de otimização deu-se pela maximização da função de verossimilhança. Através dos resultados da estimação, pôde-se ratificar a relação entre a escassez e a volatilidade, de forma que um aumento na primeira variável implica em um aumento na segunda. As velocidades dos coeficientes de ajustes foram altamente significantes, justificando o uso do processo de reversão à média. Contudo, observou-se que os desvios na trajetória da média de curto prazo são corrigidos muito mais rápido do que para a componente estocástica do preço à vista. A validade da introdução da variável escassez na modelagem foi corroborada pelo teste da razão de verossimilhança, que permitiu comparar os modelos de dois e três fatores. Alternativamente, os autores avaliaram ainda a qualidade de ajuste dos modelos levando em conta o número de parâmetros através dos critérios AIC e BIC (Akaike Information Criterion e Bayes Information Criterion, respectivamente). De acordo com ambos os critérios, observou-se também a superioridade do modelo de três fatores. A maior capacidade do modelo de três fatores no ajuste das várias formas da curva a termo é particularmente evidenciada em maturidades distantes, de modo que os autores salientam a utilidade de sua representação na valoração de contratos de longo prazo entre países produtores e empresas agroalimentares. Outro fato relevante apontado por Geman e Nguyen é a generalidade da metodologia, tornando-se assim possível a sua aplicação para outras commodities agrícolas ou até mesmo para commodities de energia desde que os estoques mundiais possam ser exaustivamente identificados.