

## **Teoria de opções reais para análise de risco e determinação dos preços de entrada e saída em uma lavoura de café no Brasil**

Recebimento dos originais: 10/05/2012  
Aceitação para publicação: 14/09/2012

### **João Francisco Morozini**

Doutor em Administração de Empresas – MACKENZIE-SP  
Instituição: Universidade Estadual do Centro Oeste – UNICENTRO  
Rua Padre Salvador, 870 - Santa Cruz, Guarapuava-PR  
CEP: 85100-970.  
E-mail: [jmorozini@uol.com.br](mailto:jmorozini@uol.com.br)

### **Diógenes Manoel Leiva Martin**

Doutor em Administração de Empresas – FGV-SP  
Instituição: Universidade Presbiteriana MACKENZIE  
Rua da Consolação, 930 – Centro, São Paulo-SP.  
CEP: 01302-907.  
E-mail: [diomartin@mackenzie.br](mailto:diomartin@mackenzie.br)

### **Carlos Eduardo Cardoso**

Mestre em Administração de Empresas pela MACKENZIE-SP  
Instituição: Universidade Presbiteriana MACKENZIE  
Rua da Consolação, 930 – Centro, São Paulo-SP.  
CEP: 01302-907.  
E-mail: [cared123@hotmail.com](mailto:cared123@hotmail.com)

## **Resumo**

A produção agrícola seja ela de qualquer natureza é essencialmente produção sob condições de risco. Logo, necessariamente por assimetria de informações e viés cognitivo é comum a prática de erros estratégicos, vale dizer, erros que implicarão destruição de valor econômico da empresa agrícola ao longo de sua existência, comprometendo a sua continuidade. O objetivo deste artigo é aplicação da Teoria de Opções Reais, conforme modelo sugerido por Dixit e Pindyck (1994) na versão de Luong e Tauer (2004) para a determinação de preços de entrada e saída de um projeto de investimento em uma lavoura de café em função do comportamento do mercado. Esse modelo encontra-se calcado na Teoria de Opções Reais para análise da tomada de decisões sob risco. O modelo busca determinar os preços de gatilho para investir e para abandonar a lavoura em função do comportamento dos preços e dos custos de início de produção, manutenção da lavoura e de abandono da lavoura. A metodologia utilizada é quantitativa, buscando-se mostrar como os preços de entrada e saída são afetados pelo comportamento dos preços de mercado no tempo, custos fixos, variáveis e tempo de implantação da lavoura. Como o objetivo do trabalho envolve a utilização de série temporal, é conveniente que se possa utilizar a série que apresente o maior número de observações. A série que apresenta o maior número de observações é a publicada pela Organização Internacional do Café, denominada em centavos de dólar por libra peso. A presente pesquisa constatou a superioridade do modelo de opções reais em contraste aos modelos empíricos de tomada de decisão pelos agricultores e com o modelo oferecido pela teoria neoclássica convencional com relação à determinação dos pontos de entrada e saída da cultura do café.

**Palavras-chave:** Opções reais. Análise de investimento. Plantação de café. Reversão média.

## 1. Introdução

A decisão de investimento em lavouras perenes é feita sob risco, pois, de forma geral, envolve um tempo longo de formação da lavoura. O investidor conhece os comportamentos passados e atuais do mercado, especialmente quando o produto é uma *commodity*, bem como os custos atuais de formação da lavoura. No entanto, o investidor não tem certeza sobre o comportamento futuro do mercado.

A produção agrícola seja ela de qualquer natureza é essencialmente produção sob condições de risco. Logo, necessariamente por assimetria de informações e viés cognitivo é comum a prática de erros estratégicos, vale dizer, erros que implicarão destruição de valor econômico da empresa agrícola ao longo de sua existência, comprometendo a sua continuidade.

A decisão de investir em uma lavoura de café envolve o desembolso na formação da lavoura a um custo conhecido hoje, mas cujo retorno só se dará em futuro relativamente distante. A tendência é a de fazer o investimento quando o preço está alto e parar de produzir quando o preço estiver baixo.

Como em um mercado em equilíbrio, de forma geral, os preços de *commodities* agrícolas tendem para a média, quando o preço está alto a tendência é haver uma queda de preços e quando o preço estiver baixo há uma tendência a um aumento de preços. A decisão do investidor, assim, deve ser feita em um contexto de incerteza quanto ao preço futuro.

Becker e MacLintock (1967 *apud* MILBURN e BILLINGS, 1976, p.111) definiram o processo de tomada de decisão do ponto de vista psicológico de forma semelhante à conceituada pelos economistas. Os fenômenos de incerteza e risco são fenômenos multidimensionais dependentes do contexto, podendo assumir complexidade bastante superior àquela usualmente considerada na abordagem da psicologia.

Partindo-se do pressuposto da incerteza e risco na lavoura de café, e considerando que o preço de *commodities*, de forma geral, e, no caso em questão, o preço do café arábica segue um processo de reversão à média, quais seriam os preços de entrada (gatilho de entrada) e saída (gatilho de saída) que permitiriam a implantação e o abandono da lavoura de café pelo produtor rural? Para responder essa questão, tem-se o seguinte objetivo:

O objetivo deste artigo é aplicação da Teoria de Opções Reais, conforme modelo sugerido por Dixit e Pindyck (1994) na versão de Luong e Tauer (2004) para a determinação de preços de entrada e saída de um projeto de investimento em uma lavoura de café em função do comportamento do mercado.

## **2. Referencial Teórico**

### **2.1 A ótica da economia neoclássica convencional e a Teoria de Opções Reais**

A decisão de entrar em um mercado competitivo, pela teoria neoclássica (VARIAN, 2003) é feita com base no fato de o preço ser maior do que o custo total médio do projeto, uma vez que o custo fixo deve necessariamente ser remunerado pelo produto da venda. Sendo o preço, em um mercado competitivo, determinado pelo mercado sem que o produtor possa exercer influência sobre seu nível, a decisão de produzir passa a ser função do custo, que é o componente sobre o qual o produtor pode administrar.

A teoria neoclássica pressupõe a reversibilidade do investimento o que raramente ocorre na prática empresarial. Mossin (1968) desenvolveu algoritmo baseado em custos de ativação e desativação para decidir sobre a docagem de um navio em função da queda de receita ou a reativação de sua operação em função da receita prevista. O modelo assume simetria no movimento Browniano e parte de matrizes de transição de estados. Brennan e Schwartz (1985) mostram como ativos cujos fluxos de caixa apresentam alta variabilidade em função de condições de mercado podem ser valorizados. Mostram também como a política ótima de seu gerenciamento com relação à desativação e reativação pode ser determinada através do uso de carteiras replicantes de contratos futuros das *commodities* envolvidas. Carr (1988) analisa oportunidades de investimento multiperiódicas pela abordagem de carteiras replicantes seguindo o raciocínio proposto por McDonald e Siegel (1985) de avaliar a postergação de um projeto como uma opção de compra.

Triantis e Hodder (1990) abordam a flexibilidade gerencial na tomada de decisões de investimento como uma opção complexa usando a técnica de precificação de contingências.

Ao contrário da técnica usual de precificação de opções, os autores supõem que a curva de demanda do ativo possa ter uma tendência decrescente atendendo à realidade de que muitos mercados são monopolísticos ou oligopolísticos.

Fine e Freund (1990) concebem um modelo em dois estágios em que o primeiro estágio enfoca a decisão de investimento inicial associada á capacidade produtiva e no segundo estágio aborda as decisões de produção condicionadas ao primeiro estágio.

Pindyck (1991) apóia a nova visão sobre a avaliação de investimentos feita de acordo com a economia neoclássica tradicional ao questionar que:

- Os investimentos têm, freqüentemente, a característica de serem ou irreversíveis ou terem baixa reversibilidade e
- A ocasião de fazer investimentos pode ser postergada de acordo com a disposição e interesse do investidor em obter melhores informações sobre variáveis que influirão no retorno sobre o investimento a ser feito.

Em função dessas características, propõe o tratamento do investimento correspondente a fundo perdido como uma opção de compra uma vez que o exercício da opção é irreversível. Embora o ativo possa ser vendido a outro investidor, a opção exercida e o investimento nela feito não podem ser revertidos.

Os custos irrecuperáveis (*sunk cost*) afetam, também, as decisões de entrada e saída de investimentos uma vez que, além da existência de custos irrecuperáveis em um investimento inicial, existem, também, custos irrecuperáveis que ocorrem na desativação de uma unidade produtiva e em sua reativação. Os modelos de irreversibilidade de investimentos explicam o efeito de histerese, que consiste na permanência dos efeitos por um determinado tempo mesmo depois de cessada a causa.

Dixit e Pindyck (1994) abordam o problema de entrada, saída, desativação temporária e desativação total de investimentos. O ponto de partida é o comportamento estocástico dos preços que definem a receita de um projeto no correr do tempo e a incerteza sobre os lucros de períodos futuros. Os lucros futuros, comportando-se de forma aleatória, podem apresentar períodos de duração média ou longa com valores negativos, o que justifica o abandono temporário do projeto, podendo esse ser retomado quando a perspectiva de lucros futuros for positiva.

Embora um modelo simplificado assuma que não existem custos de parada e de reinício, modelos mais elaborados levam em consideração a existência desses custos. Em um extremo, encontra-se a posição de que os custos de reinício e parada não existem. Em outro extremo, leva-se em consideração que esses custos são idênticos aos inicialmente incorridos no início da operação e correspondem à perda total em caso de abandono.

Na vida real nenhuma dessas situações é verdadeira. Por um lado, ao decidir-se abandonar um projeto, ou suspendê-lo temporariamente, os custos iniciais de implantação não são totalmente perdidos, embora possa haver deterioração de equipamentos, e uma retomada não exigirá investimento semelhante ao investimento inicial. Por outro lado, quando um projeto é desativado existe um custo associado a essa desativação que afeta o retorno do projeto. Outra variável que afeta a reativação é o tempo de parada, pois usualmente os custos de reinício sobem em função do tempo de parada.

Essa característica pode ser modelada através da introdução de uma opção de reinício na qual a variável de estado é o tempo de parada. Durante o tempo de parada, o projeto não é necessariamente extinto, pois freqüentemente é conveniente manter o equipamento em condições de ser recolocado em operação.

Sato (2004) discutiu o problema de decisão ótima de abandono de uma lavoura de café. A decisão ótima de abandono de uma lavoura representa o exercício ou não de uma opção de abandono de operações buscando maximizar a riqueza do proprietário.

Foi utilizado o modelo binomial de precificação com programação dinâmica. O estudo buscou identificar o valor da opção de abandono e a fronteira ótima de exercício dessa opção através de programação dinâmica.

Nogueira (2005), abordando o momento ótimo de abandono de uma lavoura de café, utilizou um modelo trinomial com programação dinâmica. Luong e Tauer (2004) desenvolveram uma análise de plantação de café no Vietnã, buscando determinar os preços de gatilho para investimento e de abandono da lavoura. Tendo em vista que o Vietnã não fazia parte da Organização Mundial do Café, os preços praticados não refletem a demanda mundial. A atuação do Vietnã no mercado de café deu-se nos últimos 13 anos anteriores ao estudo. Dessa forma, o histórico de preços não chega a cobrir um ciclo completo de subida e descida de preços, o que dificulta o uso de modelos regressivos que representem, adequadamente, o comportamento dos preços. Em vista dessa característica, os autores modelaram a oferta de café pelo Vietnã utilizando a Teoria de Opções Reais através da qual foi possível modelar decisões de investimento sob incerteza e irreversibilidade.

A plantação de café é composta fundamentalmente de dois componentes: O investimento inicial na implantação da lavoura que será amortizado durante o prazo de vida útil da lavoura e os tratos anuais. O investimento é um componente fixo de longo prazo e os tratos anuais são um componente variável. O componente fixo compreende a decisão de investir levando em consideração os preços de mercado do café e o período de formação da lavoura e a decisão de abandonar a lavoura e remover os pés de café levando em consideração os preços de mercado.

Investimentos fixos têm um preço de aquisição e um valor residual. As decisões de investimento e abandono dependem do diferencial entre esses preços. Dixit (1991) usou a Teoria de Opções Reais para modelar a parte fixa de investimentos.

## 2.2. Modelo matemático para a definição dos pontos de entrada e saída

O modelo desenvolvido por Luong e Tauer (2004) foi construído em três etapas:

- I. Determinar o valor de um projeto inativo, ou seja, a espera por um investimento inicial ou a ser iniciado que corresponde à opção de investir.
- II. Determinar o valor de um projeto ativo composto do valor presente dos fluxos de caixa futuros e da opção de abandonar a lavoura.
- III. Determinação simultânea dos pontos de entrada e saída. Nos pontos de entrada e saída do investimento, o investidor deve ser indiferente entre estar na situação de ativo ou inativo, isto é, o valor de estar ativo deve ser idêntico ao valor de estar inativo. Adicionalmente, a taxa de incremento ou decréscimo de valor de um projeto ativo deve ser idêntica à mesma taxa para um projeto inativo. Igualando os valores dos projetos ativo e inativo e suas derivadas, chega-se a um sistema de quatro equações. Para que a opção de saída inclua, também, a possibilidade de reentrar no projeto, as equações devem ser resolvidas simultaneamente.

O preço de mercado está fora do controle do investidor movendo-se no tempo de forma incerta modelado como um processo estocástico. Um modelo padronizado para esse tipo de comportamento é o movimento geométrico Browniano definido pela fórmula:

$$dP = \mu P dt + \sigma P \varepsilon \sqrt{dt}$$

Equação 1

em que:  $\varepsilon$  é retirado de forma randômica de uma distribuição normal padronizada e  $dt$  é um infinitésimo de tempo no qual ocorre  $dP$ .

Como  $\varepsilon$  é retirado de uma distribuição normal padronizada,  $dP$  tem uma distribuição normal com: média =  $\mu P dt$  e variância =  $\sigma^2 P^2 dt$ .

O valor do investimento  $V(P,t)$  é uma função do preço de mercado  $P$  e do tempo  $t$ , cuja variação pode ser aproximada por uma expansão de Taylor até segunda ordem:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} dP + \frac{\partial V}{\partial t} dt + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} (\mu^2 P^2 dt^2 + 2 \mu P dt \frac{1}{2} \sigma P \varepsilon + \sigma^2 P^2 \varepsilon^2 dt) + \frac{\partial^2 V}{\partial P \partial t} dP dt + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} (dt)^2. \quad \text{Equação 2a}$$

Como  $\varepsilon$  é retirado de uma distribuição normal padronizada, o valor esperado de  $\varepsilon$  é igual a 0 e quando  $dP$  e  $dt$  tendem a zero, os termos de maior ordem, exceto  $(dP)^2$  tendem a zero e a equação fica:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} dP + \frac{\partial V}{\partial t} dt + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \sigma^2 P^2 dt. \quad \text{Equação 2b}$$

Substituindo na equação acima  $dP = \mu P dt + \sigma P \varepsilon \sqrt{dt}$ , obtém-se a equação:

$$dV = \left( \frac{\partial V}{\partial P} \mu P + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \sigma^2 P^2 \right) dt + \frac{\partial V}{\partial P} \sigma P \varepsilon \sqrt{dt}. \quad \text{Equação 3}$$

Sendo esse um problema de horizonte infinito, a variável  $t$  não é uma variável de decisão e a derivada  $\frac{\partial V}{\partial t}$  pode ser desprezada. Dessa forma, a equação pode ser escrita:

$$dV = \left( V'(P) \mu P + \frac{1}{2} V''(P) \sigma^2 P^2 \right) dt + V'(P) \sigma P \varepsilon \sqrt{dt} \quad \text{Equação 4}$$

Com  $\frac{\partial V}{\partial P} = V'(P)$ ,  $\frac{\partial^2 V}{\partial P^2} = V''(P)$ . e tomando-se o valor esperado dos dois lados da

igualdade e considerando que o valor esperado de  $\varepsilon \sqrt{dt} = 0$ , tem-se:

$$E(dV) = \left( V'(P)\mu P + \frac{1}{2}V''(P)\sigma^2 P^2 \right) dt,$$

Equação 5

### 2.2.1. Determinando a forma funcional do valor de um projeto inativo $V_0$

Em equilíbrio, o ganho de capital esperado de um projeto inativo  $dV_0(P)$  deve ser idêntico ao valor esperado do retorno normal sobre o investimento  $\rho V_0(P) dt$ :

$$\left( V_0'(P)\mu P + \frac{1}{2}V_0''(P)\sigma^2 P^2 \right) dt - \rho V_0(P) dt = 0.$$

Equação 6

Dividindo-se a equação por  $dt$ , fica-se com:

$$V_0'(P)\mu P + \frac{1}{2}V_0''(P)\sigma^2 P^2 - \rho V_0(P) = 0.$$

Equação 7

A solução geral para essa equação é:

$$V_0(P) = AP^{-\alpha} + BP^{\beta}$$

Equação 8

em que:

$$-\alpha = \frac{\sigma^2 - 2\mu - \left( (\sigma^2 - 2\mu)^2 + 8\rho\sigma^2 \right)^{1/2}}{2\sigma^2} < 0,$$

Equação 9a

e a equação

$$\beta = \frac{\sigma^2 - 2\mu + \left( (\sigma^2 - 2\mu)^2 + 8\rho\sigma^2 \right)^{1/2}}{2\sigma^2} > 1$$

Equação 9b



São as duas raízes da equação quadrática  $\frac{1}{2}\sigma^2x(x-1)+\mu x-\rho=0$  e A e B são constantes a serem determinadas. Para um projeto inativo, o valor do investimento tende a zero se o preço tende a zero. Como  $-\alpha < 0$  e  $\beta > 1$ , então  $V_0(P)=AP^{-\alpha}+BP^\beta$  tende a zero, quando P tende a zero somente se A=0. Assim, a forma funcional do valor de um projeto inativo torna-se:

$$V_0(P)=BP^\beta \quad \text{Equação 10}$$

### 2.2.2. Determinando a forma funcional do valor de um projeto ativo $V_1$

Em equilíbrio, o valor de um projeto ativo o retorno normal é igual ao ganho esperado de capital adicionado do fluxo de ganhos líquidos, ou seja,

$$\rho V_1(P)dt = E[dV_1] + (P - C)dt. \quad \text{Equação 11}$$

Substituindo  $E[dV] = \left( V'(P)\mu P + \frac{1}{2}V''(P)\sigma^2 P^2 \right) dt$  na equação acima e dividindo os dois lados da equação por  $dt$  e rearranjando os termos, tem-se:

$$V_1'(P)\mu P + \frac{1}{2}V_1''(P)\sigma^2 P^2 - \rho V_1(P) + P - C = 0 \quad \text{Equação 12}$$

A solução geral dessa equação é:

$$V_1(P) = P/(\rho - \mu) - (C/\rho) + AP^{-\alpha} + BP^\beta \quad \text{Equação 13}$$

em que:  $P/(\rho - \mu) - C/\rho$  é o valor presente das receitas líquidas e  $AP^{-\alpha} + BP^\beta$  representa o valor da opção de abandonar o projeto. Quando P tende a infinito, o valor dessa opção tende a zero. Como  $-\alpha < 0$  e  $\beta > 0$ , então  $AP^{-\alpha} + BP^\beta$  tende a zero, quando P tende a infinito, somente se B = 0 e, portanto, a forma funcional do valor de um investimento ativo torna-se:

$$V_1(P) = P/(\rho - \mu) - (C/\rho) + AP^{-\alpha}.$$

Equação 14

### 2.2.3. Determinando os pontos de entrada e saída de um investimento

Os pontos de entrada e saída são, respectivamente, os pontos nos quais o investidor decide adquirir um projeto abandoná-lo. No ponto de entrada  $H$  o valor da opção de investir, (correspondente ao valor de um projeto inativo), é idêntico ao valor de exercício, que é o valor de um projeto ativo, menos o valor do investimento irre recuperável. Para isso é necessário que:

$$V_1(H) - V_0(H) = K \text{ como condição de igualdade e}$$

$$V_1'(H) - V_0'(H) = 0 \text{ como condição de transição.}$$

Da mesma forma, no ponto de abandono  $L$ , ter-se-á:

$$V_1(L) - V_0(L) = X, \text{ e;}$$

$$V_1'(L) - V_0'(L) = 0.$$

Substituindo as definições de  $V_0$  e  $V_1$  nas formas funcionais anteriormente descritas, obtém-se o sistema de equações a seguir:

$$\frac{H}{(\rho - \mu)} - \frac{C}{\rho} + AH^{-\alpha} - BH^{\beta} = K,$$

Equação 15

$$\frac{1}{(\rho - \mu)} - \alpha AH^{-\alpha-1} - \beta BH^{\beta-1} = 0,$$

Equação 16

$$\frac{L}{(\rho - \mu)} - \frac{C}{\rho} + AL^{-\alpha} - BL^{\beta} = -X,$$

Equação 17

$$\frac{1}{(\rho - \mu)} - \alpha AL^{-\alpha-1} - \beta BL^{\beta-1} = 0.$$

Equação 18

Os parâmetros  $\rho$ ,  $\mu$  e  $\sigma^2$  podem ser estimados a partir de dados históricos e  $\alpha$  e  $\beta$  podem ser estimados inserindo-se as estimativas na solução geral da equação diferencial. Obtidos  $\alpha$  e  $\beta$ , os cinco parâmetros podem ser substituídos nas quatro equações do sistema, resultando as quatro incógnitas  $A, B, H, L$ .

### 3. Metodologia

Para atingir o objetivo proposto neste artigo, que foi fazer a aplicação da Teoria de Opções Reais, conforme modelo sugerido por Dixit e Pindyck (1994) na versão de Luong e Tauer (2004) para a determinação de preços de entrada e saída de um projeto de investimento em uma lavoura de café em função do comportamento do mercado, utilizou-se a pesquisa descritiva, fazendo a abordagem do problema de forma quantitativa, utilizando dados secundários.

O modelo usado por Luong e Tauer (2004), aplicado às condições brasileiras, assume que uma firma investe uma soma  $K$  em um projeto destinado a produzir um fluxo de saída a um custo variável  $C$ . Assume-se que o projeto tenha duração perpétua e não seja depreciável. Caso a firma decida-se por abandonar o projeto, haverá um custo de saída de  $X$  por unidade produzida e deverá reinvestir  $K$  caso deseje retomar o projeto. Cada unidade de saída será vendida pelo preço  $P$  determinado pelo mercado cujo comportamento está sujeito à incerteza.

A metodologia utilizada é quantitativa, buscando-se mostrar como os preços de entrada e saída são afetados pelo comportamento dos preços de mercado no tempo, custos fixos, variáveis e tempo de implantação da lavoura.

Como o objetivo do trabalho envolve a utilização de série temporal, é conveniente que se possa utilizar a série que apresente o maior número de observações. A série que apresenta o maior número de observações é a publicada pela Organização Internacional do Café, denominada em centavos de dólar por libra peso.

No mercado interno, o agricultor recebe em reais por saca de 60 quilos. Em se tratando de uma *commodity*, o preço no mercado interno deveria acompanhar os movimentos do mercado externo.

As hipóteses a serem testadas no sentido de atingir o objetivo do estudo são as seguintes:

**H<sub>01</sub>**: Os preços no mercado de café tendem a convergir a um valor médio.

**H0<sub>2</sub>**: A determinação dos gatilhos (preços) de entrada e saída, sugeridos pelo Modelo de Opções Reais (DIXIT e PINDYCK, 1994), proporcionará um retorno maior do que: 1) entrar no pico superior e sair no pico inferior de preços de mercado; 2) Entrar quando o preço de mercado for maior do que o custo total unitário e sair quando o preço de mercado for menor do que o custo variável unitário (Teoria neoclássica) e; 3) Produzir de forma contínua independentemente do preço de mercado.

### 3.1. Definição das variáveis

As variáveis incluídas no modelo são definidas a seguir,

**Tabela 1: Definição das Variáveis Independentes e Dependentes**

| Variáveis  |
|--|
| $V_0$ : Valor de um projeto inativo correspondente ao valor da opção de investir;                                  |
| $V_1$ : Valor de um projeto ativo correspondente ao valor das receitas líquidas mais o valor da opção de abandono; |
| $P$ : Preço de mercado de uma unidade produzida;   |
| $\mu$ : taxa percentual de crescimento esperada do preço de mercado;   |
| $\sigma^2$ : Variância da variação no preço de mercado;  |
| $C$ : Custo variável de uma unidade produzida;   |
| $K$ : Custo fixo irrecuperável por unidade produzida;  |
| $X$ : Custo de abandono por unidade produzida;   |
| $\rho$ : Custo de oportunidade do capital ou taxa de desconto;   |
| $H$ : Preço de mercado que dispara o investimento (Gatilho de entrada) e   |
| $L$ : Preço de mercado que dispara o abandono (Gatilho de abandono).   |

Fonte: Os Autores

Para obtenção dos valores acima, o modelo requer dados sobre a produção agrícola cafeeira que devem ser levantados em diversas fontes. Os dados referentes à produção de café foram das seguintes fontes.

**Tabela 2 - Fonte de dados das variáveis**

| Variável                       | Fonte de informação                            |
|--------------------------------|--|
| Preços do café                 | www.ipeadata.gov, ICO (www.ico.org), CEPEA IEA |
| Produtividade                  | Agriannual                                     |
| Area plantada                  | CEPEA  |
| Custo de capital               | Banco Central do Brasil                        |
| Custo do investimento fixo     | Agriannual                                     |
| Custo Variável de produção     | Agriannual                                     |
| Ciclo de vida da cultura       | IAC, Agriannual                                |
| Custo da terra                 | Agriannual                                     |
| Ciclo de vida dos equipamentos | Agriannual                                     |
| Custo dos equipamentos         | Agriannual                                     |
| Taxas de juros                 | Banco Central do Brasil                        |

Fonte: Os Autores

#### 4. Resultados e Discussões

Partindo-se do pressuposto da incerteza e risco na lavoura de café, e buscando atender o objetivo deste artigo, que é a aplicação da Teoria de Opções Reais, conforme modelo sugerido por Dixit e Pindyck (1994) na versão de Luong e Tauer (2004) para a determinação de preços de entrada e saída de um projeto de investimento em uma lavoura de café em função do comportamento do mercado, apresenta-se os seguintes resultados:

##### 4.1. Estimação dos Valores e Validação da Hipótese $H_{01}$ – Os preços de café não se comportam como “Reversão à Média”

No modelo sugerido por Dixit e Pindyck (1994), a hipótese básica sobre o comportamento dos preços é de que eles seguem um comportamento da forma:

$$P_t = \lambda P_{t-1} + u_t \quad \text{ou} \quad P_t - P_{t-1} = (\lambda - 1)P_{t-1} + u_t = \delta P_{t-1} + u_t \quad \text{Equação 19}$$

em que:  $\lambda=1$  ( $\delta = \lambda - 1$ ),  $P_t$  = preço no instante t-1 e  $u_t$  = ruído branco com média=0 e variância constante.

Se a hipótese nula de  $\delta=0$  (ou  $\lambda=1$ ) não puder ser rejeitada, então, o resultado é coerente com o comportamento *random walk*. Para detectar a estacionariedade da série temporal de preços do café pagos ao produtor, foram efetuados os testes de raiz unitária e o de Durbin-Watson. Os resultados para a variável preço denominada “saca OIC” são mostrados

na tabela 3.

Em todos os casos o *p-value* é inferior ao intervalo de confiança de 5%, de forma que a hipótese nula de que  $\lambda = 1$  pode ser rejeitada. Dessa forma, pode-se assumir que os preços ao produtor indicados pela OIC não se comportam como *random walk*.

Configura-se um processo de reversão à média quando  $\lambda < 1$  (WATSHAM e PARRAMORE, 2002). A análise da regressão descrita no tópico anterior aponta para o coeficiente -0,0602344 com *p-value* 0,04953 com *drift* e constante o que configura um processo de reversão à média.

Essa conclusão contraria o comportamento encontrado no trabalho de Luong e Tauer (2004) em que foi encontrado um processo de preços com comportamento *Random Walk*. Essa diferença pode ter origem em três fatores de diferenciação das duas pesquisas:

- I. A série de preços utilizada no estudo original de Luong e Tauer (2004) foi a do café Robusta enquanto na presente pesquisa foi a do café Arábica;
- II. A série de preços utilizada cobriu dez anos, embora ela tenha iniciado em outubro de 1980. Esse prazo é inferior a um ciclo produtivo e permite a observação de poucos ciclos de preços de mercado;
- III. A intensa intervenção governamental no mercado vietnamita pode distorcer a série de preços recebidos pelos produtores.

**Tabela 3 – Teste Dickey-Fuller para Preços Nominais de Café em US\$**

| <b>Teste ADF de Raiz Unitária - Série de Preços Recebidos pelo Produtor OIC em Dólares Nominais</b> |  |
|---|--|
| <b>Equação</b>  | $P_t - P_{t-1} = \beta_1 + (\lambda - 1)P_{t-1} + u_t$                           |
| Coef autocorr prim ordem de <i>u</i>  | -0,00200   |
| $\lambda-1$   | -0,06002   |
| tau   | -3,84335   |
| <i>p-value</i>  | 0,00251  |
| <b>Equação</b>  | $P_t - P_{t-1} = \beta_1 + \beta_2 t + (\lambda - 1)P_{t-1} + u_t$               |
| Coef autocorr prim ordem de <i>u</i>  | -0,00200   |
| $\lambda-1$   | -0,06024   |
| tau   | -3,84124   |
| <i>p-value</i>  | 0,01450  |
| <b>Equação</b>  | $P_t - P_{t-1} = \beta_1 + \beta_2 t + \beta_3 t^2 + (\lambda - 1)P_{t-1} + u_t$ |
| Coef autocorr prim ordem de <i>u</i>  | -0,00200   |
| $\lambda-1$   | 0,06023  |
| tau   | -3,83554   |
| <i>p-value</i>  | 0,04953  |

Fonte: Os Autores

## 4.2. Estimação dos Valores e Validação da Hipótese $H_0$ – Superioridade do modelo proposto por Dixit e Pindyck (1994)

Foi verificada a superioridade do modelo proposto por Dixit e Pindyck (1994) com relação aos métodos de:

- I. Entrar no pico superior e sair no pico inferior de preços de mercado;
- II. Entrar quando o preço de mercado for superior ao custo total unitário e sair quando o preço de mercado for inferior ao custo variável unitário (Teoria neoclássica) e
- III. Produzir de forma contínua independentemente do preço de mercado.

A seguir são estimados os valores de  $\mu$ ,  $\sigma^2$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $K$ ,  $C$  e  $X$  para obtenção dos preços de entrada  $H$  e saída  $L$ .

### 4.2.1. Determinação de $\mu$ valor médio esperado e $\sigma^2$ variância do retorno para o produtor

As decisões tomadas pelo produtor acompanham a periodicidade anual da produção. Para calcular a média e a variância anuais dos retornos para o produtor de café partiu-se de:

- Série de dados sobre preços  $P_i$  ( $i=0, \dots, 361$ );
- Intervalos de tempo,  $t_i - t_{i-1}$  em termos anuais correspondem a 1/12;
- Retornos, ou alterações percentuais de preços  $\theta = \ln\left(\frac{P_i}{P_{i-1}}\right)$ ;
- $\bar{\theta}$  média de retornos mensais para os períodos observados;
- Número de observações de janeiro de 1976 a dezembro de 2005 = 360.

O desvio-padrão de retornos mensais e o desvio padrão anualizado seguem LUENBERGER, 1998, p. 213). A variância dos retornos anuais é dada pela

fórmula:  $\sigma^2 = \sigma_m^2 \times 12$ . Sendo  $\ln\left(\frac{P_i}{P_{i-1}}\right) \sim N\left[\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)(t_i - t_{i-1}), \sigma\sqrt{t_i - t_{i-1}}\right]$  em que  $t$  é medido

em anos, pode-se assumir que  $E\left[\ln\left(\frac{P_i}{P_{i-1}}\right)\right] = \mu_m = \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)(t_i - t_{i-1})$  e, portanto, pode-se

calcular a média de retornos anuais como sendo  $\mu = \frac{\mu_m}{t_i - t_{i-1}} + \frac{\sigma^2}{2}$ . Para o cálculo dos

retornos, foi utilizada a série de preços de mercado OIC, em dólares, deflacionada pelo *Consumer Price Index*.

**Tabela 4 – Estatística descritiva da série de dados de retorno mensal**

| Estatística Descritiva usando observações de retornos de janeiro de 1976 a dezembro de 2005 |            |
|---|------------|
| Média = $\mu$   | 0,00048427 |
| Mediana   | -0,0077385 |
| Mínimo  | -0,64187   |
| Máximo  | 0,54291    |
| Desvio- Padrão $\sigma$   | 0,11873    |
| C.V.  | 245,17     |
| Skewness  | 0,25329    |
| Ex. kurtosis  | 4,6102     |

Fonte: Os Autores

Substituindo os valores encontrados na fórmula da média, obtém-se:

$$\mu = 0,00048427 \times 12 + \frac{0,1691617548}{2} = 0,00581124 + 0,0845808774400642 = 0,090392154400642$$

e a variância  $\sigma^2 = (0,11873 \times \sqrt{12})^2 = 0,1691617548$

#### 4.2.2. Cálculo de $\rho$ - Custo de oportunidade do Capital ou taxa de desconto

Em equilíbrio, o valor esperado de um projeto inativo  $dV_0(P)$  deve ser idêntico ao valor esperado do investimento  $\rho V_0(P) dt$  para que o investidor seja indiferente entre investir ou não. O investimento alternativo imediato para o investidor seria o investimento em depósito a prazo fixo cuja média, de acordo com o boletim mensal de dezembro de 2005 do Banco Central do Brasil indica 1,25% ao mês ou 16,48% ao ano.

#### 4.2.3. Cálculo de $\alpha$ e $\beta$

A equação diferencial quadrática que define o valor do projeto inativo é dada por:

$$V_0'(P)\mu P + \frac{1}{2}V_0''(P)\sigma^2 P^2 - \rho V_0(P) = 0.$$

Equação 20



A solução geral para essa equação é:

$$V_0(P) = AP^{-\alpha} + BP^{\beta}$$

Equação 21

em que:

$$-\alpha = \frac{\sigma^2 - 2\mu - \left( (\sigma^2 - 2\mu)^2 + 8\rho\sigma^2 \right)^{1/2}}{2\sigma^2} < 0,$$

Equação 22

E

$$\beta = \frac{\sigma^2 - 2\mu + \left( (\sigma^2 - 2\mu)^2 + 8\rho\sigma^2 \right)^{1/2}}{2\sigma^2} > 1$$

Equação 23

Substituindo os valores de  $\mu$ ,  $\sigma$  e  $\rho$  nas equações 23 e 24, obtivemos  $-\alpha = -1,413624$  e  $\beta = 1,34491$ .

#### 4.2.4. Custos de implantação - K

Os custos de implantação foram obtidos da publicação Agriannual (2007) para a região de Franca, no Estado de São Paulo. O custo total de implantação da lavoura é de R\$ 16.257,00 por hectare, considerando-se a receita obtida no terceiro ano como dedução do custo de implantação. Ao custo de implantação da lavoura acrescentou-se o custo de aquisição da terra no montante de R\$ 10.650,00 por ha (Valor médio de terras para cultura de café na região de Franca, Estado de São Paulo), resultando um custo total por hectare de R\$ 26.907,00. A vida média da lavoura é de 18 anos sendo produzidas, do quarto ao décimo oitavo anos, 40 sacas por hectare durante a vida da lavoura e 20 sacas no terceiro ano. Nessas condições, o custo de implantação da lavoura por saca de café produzido é de R\$ 46,39 ou US\$ 19,82 sendo R\$ 18,36 ou US\$ 7,85 correspondentes ao custo da terra.

#### 4.2.5. Custos de manutenção anual da cultura - C

Os custos de manutenção anual foram obtidos da publicação Agriannual 2007. O custo de manutenção por saca calculado em função da produção total esperada é de R\$ 203,54 por saca ou US\$86,98/saca.

#### 4.2.6. Custo de abandono - X

Ao término do período produtivo, ou quando houver abandono da produção, o valor residual do projeto pode ser considerado como o valor da terra, de R\$ 18,36 ou US\$ 8,46 por saca de café.

#### 4.3. Cálculo dos preços de entrada e saída – H e L

Os preços de entrada e saída, de acordo com o modelo proposto por Dixit e Pindyck (1994), podem ser calculados pela resolução do sistema de equações 15 a 19. Para a montagem do sistema de equações, têm-se os parâmetros calculados anteriormente que são resumidos na Tabela 5.

**Tabela 5 – Parâmetros de cálculo**

|  |             |
|--|-------------|
| $\mu$ - Taxa porcentual de crescimento esperada do preço de mercado  | 0,090389328 |
| $\sigma^2$ - Variância da porcentagem de mudança no preço de mercado | 0,169156056 |
| $-\alpha$ - Parâmetro da solução da equação diferencial              | -1,413624   |
| $\beta$ - Parâmetro da solução da equação diferencial                | 1,344910    |
| C - Custo variável de uma unidade produzida                          | 86,98       |
| K - Custo fixo irrecuperável por unidade produzida                   | 19,82       |
| X - Custo de abandono por unidade produzida                          | -7,85       |
| $\rho$ - Custo de oportunidade do capital ou taxa de desconto        | 0,1608      |

Fonte: Os Autores

Os cálculos para a solução das equações foram efetuados com o *software* MAPLE 10 e, em virtude do requisito de uso do ponto como separador decimal, todos os dados preparatórios para cálculo e resultados dos cálculos são apresentados nessa forma de notação. Substituindo os parâmetros calculados nas equações 15 a 19, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$14.20252805 H - 540.9203980 + \frac{A}{H^{1.413624}} - B H^{1.34491} = 19.82$$

$$14.20252805 - \frac{1.413624 A}{H^{2.413624}} - 1.34491 B H^{0.34491} = 0$$

$$14.20252805 L - 540.9203980 + \frac{A}{L^{1.413624}} - B L^{1.34491} = 7.85$$

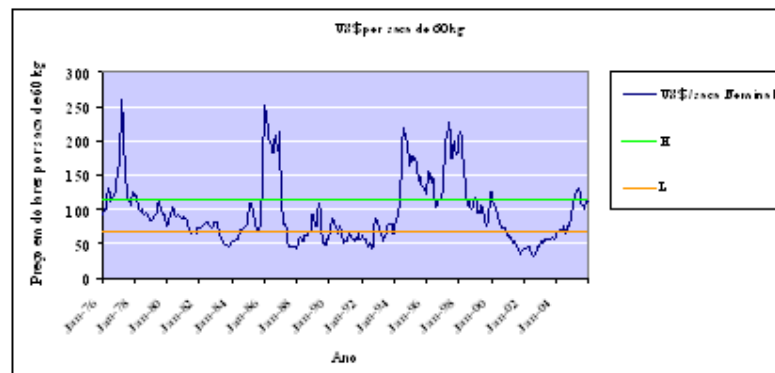
$$14.20252805 - \frac{1.413624 A}{L^{2.413624}} - 1.34491 B L^{0.34491} = 0$$

cuja solução, utilizando o *software* MAPLE, é:

$$\{A = 57042.94620, B = 1.933323125, H = 114.4344120, L = 67.73908916\}$$

O investidor deve entrar no mercado quando o preço atingir US\$114,43 por saca e sair do mercado quando o preço atingir US\$ 67,74 por saca. Para a comprovação, foram calculados os fluxos de caixa de cada opção observando os preços de entrada e saída e as datas de sua ocorrência. Os fluxos de caixa foram calculados a preços de dezembro de 2005. Esse procedimento teve como finalidade evitar a retroação dos custos a épocas nas quais a moeda era distinta do Real, em que, devido aos efeitos dos diversos planos econômicos, a paridade do poder de compra da moeda poderia ser afetada. O resultado comparativo é mostrado na Tabela 6 na qual fica claramente demonstrada a superioridade do método proposto por Dixit e Pindyck (1994) utilizando a Teoria de Opções Reais para a determinação dos preços de entrada e saída.

O Gráfico abaixo mostra a curva de preços e os preços de entrada H e saída L.



**Gráfico 1 – Série de Preços Nominais por saca e Limites de Entrada e Saída**

Fonte: Os Autores

A Tabela 6 evidencia os resultados comparativos dos modelos testados:

**Tabela 6 – Resultado comparativo dos métodos testados**

| <b>Abordagem</b>            | <b>Dixit e Pindyck</b> | <b>Entrada e saída nos picos</b> | <b>Teoria Neo-clássica</b> | <b>Produção Contínua</b> |
|-----------------------------|------------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| H - Preço de entrada        | 113.62                 | pico superior                    | 106.80                     |                          |
| L - Preço de saída          | 67.16                  | pico inferior                    | 86.98                      |                          |
| Entrada                     | Jan-76                 | Mar-77                           | Jan-76                     | Jan-76                   |
| Saída                       | May-92                 | Nov-83                           | Jul-87                     | Dec-05                   |
| Entrada                     | Nov-92                 | Jan-86                           | Jun-88                     |                          |
| Saída                       | Feb-01                 | Oct-87                           | Aug-89                     |                          |
| Entrada                     | Feb-05                 | May-89                           | Feb-90                     |                          |
| Saída                       | Dec-05                 | Sep-92                           | Nov-90                     |                          |
| Entrada                     |                        | Jul-94                           | Oct-92                     |                          |
| Saída                       |                        | Sep-02                           | Apr-93                     |                          |
| Entrada                     |                        | Jun-05                           | Aug-93                     |                          |
| Saída                       |                        | Dec-05                           | Aug-00                     |                          |
| Entrada                     |                        |                                  | Jan-05                     |                          |
| Saída                       |                        |                                  | Dec-05                     |                          |
| <b>Resultado em dólares</b> | <b>30,836</b>          | <b>(7,046)</b>                   | <b>22,895</b>              | <b>(25,038)</b>          |

Fonte: Os Autores

Observando os dados acima a estratégia de considerar os limites de entrada e saída permitem obter um valor presente do fluxo de caixa de R\$ 30.836,00, enquanto a abordagem da teoria neoclássica ofereceria um valor presente de R\$ 22.895.

## 5. Conclusão

Ao contrário dos resultados encontrados por Luong e Tauer (2004), no mercado brasileiro os preços se comportam em um movimento de retorno à média. O retorno à média é uma característica usual em *commodities* e o comportamento diverso do mercado Vietnamita pode refletir o fato de ser um mercado novo cujo histórico é curto e de ser uma economia controlada, oferecendo preços de garantia ao produtor. Os preços de garantia poderiam ser introduzidos no modelo deduzindo o preço de garantia dos preços recebidos pelo produtor.

A metodologia proposta por Dixit e Pindyck (1994) utilizada no presente estudo constitui uma ferramenta de planejamento estratégico de grande valia para o investidor. O resultado comparativo mostra a superioridade deste método em relação aos métodos da economia neoclássica convencional e das práticas de mercado dos agricultores. O método pode ser aplicado com facilidade a outros tipos de *commodities* e a regiões específicas uma

vez que se baseia em série de dados de preços de mercado. O modelo de cálculo de preços de entrada e saída, proposto por Dixit e Pindyck (1994) na versão de Luong e Tauer (2004), reproduzido para as condições do mercado brasileiro, mostrou-se mais adequado que:

- Produzir de forma contínua;
- Iniciar a implantação da cultura quando o preço atinge um pico superior e abandonar a produção quando o preço de mercado atinge um pico inferior;
- Adotar a visão da teoria neoclássica convencional de entrada e saída do mercado em função da relação entre preços e custos.

Os parâmetros utilizados no modelo baseiam-se no comportamento dos preços de mercado representados por séries de dados levantadas por diversas entidades. Este trabalho mostra que, desde que convertidas para uma mesma moeda, as séries de preços de café recebidos pelos produtores podem ser utilizadas indistintamente por serem co-integradas e apresentarem um comportamento muito similar. Esse fato permite que o agricultor, ou cooperativa de produtores, adapte o uso do modelo para sua região específica.

O trabalho de Luong e Tauer (2004) considerou a série de preços nominais. Neste trabalho, além da série de preços nominais, foram considerados os preços deflacionados trazidos a valores de dezembro de 2005. Enquanto os preços limite de entrada e saída para a série de preços nominais foram, respectivamente, de US\$ 114,43 e US\$ 67,74 por saca ao ser considerada a série de preços deflacionada, os preços de entrada e saída passaram a R\$ 113,62 e US\$ 67,16, respectivamente.

As decisões sobre investimentos, tomadas sob condições de incerteza, que envolvem irreversibilidade ou reversibilidade de alto custo estão sempre sujeitas à inércia. O investimento só deve ser feito quando a variável de estado assumir condições claramente favoráveis e revertida apenas quando assumir condições claramente desfavoráveis. Existe uma faixa de valores da variável de estado, em que a inércia é a atitude mais adequada (DIXIT 1991).

O problema fundamental para o cafeicultor é determinar o ponto ótimo de entrada e de saída. Por falta de ferramentas analíticas adequadas, parte dos cafeicultores não reverte o investimento produzindo de forma permanente. Outra parcela dos cafeicultores arrisca-se a iniciar a produção logo que se verifique um pico positivo de preços e abandona a produção quando ocorre um pico negativo de preços sem considerar a existência de um ponto ótimo para o início da reversão.

O modelo proposto oferece ao cafeicultor as ferramentas adequadas para a determinação do tempo ideal de inércia dentro de princípios matemáticos e estatísticos, tendo sido evidenciada a superioridade do modelo em relação aos modelos de decisão usuais na cafeicultura. A utilização do modelo levará à criação de valor para o investidor proporcionando retorno superior aos retornos obtidos pelos outros métodos considerados no estudo amplamente utilizado no mercado.

## 6. Referências

AGRIANUAL. São Paulo: Editora FNP, 2007.

BRENNAN, Michael; SCHWARTZ, Eduardo. Evaluating natural resources investments. *Journal of Business*, vol. 58, issue 2, Apr. 1985, p.135-157.

CARR, Peter. The valuation of sequential exchange opportunities. *The Journal of Finance*, XLIII, n. 5, Dec., 1988.

DIXIT, Avinash. Analytical approximation in models of hysteresis. *Review of Economic Studies*. Vol. 58, issue 193, Jan. 1991, p.141.

DIXIT, A.; PINDYCK, R. *Investment under uncertainty*. Princeton NJ: Princeton University Press, 1994.

FINE, Charles; FREUND, Robert. Optimal investment in product-flexible manufacturing capacity. *Management Science*. Vol. 36, n. 4, April 1990, p. 449-466.

LUENBERGER, David. *Investment science*. New York: Oxford University Press, 1998.

LUONG, Q.; TAUER, L. A. *Real options analysis of coffee planting in vietnam*. WP2004-13, Department of Applied Economics and Management Cornell University, Ithaca, NY, 2004.

MCDONALD, R.; SIEGEL, D. Investment and valuation of firms when there is an option to shut down. *International Economic Review*. Vol.26, issue 2, Jun.1985, p.331.

MILBURN, T.; BILLINGS, R. Decision-making perspective from psychology dealing with risk and uncertainty. *The American*. Sept./Oct. 1976, p.111.

MOSSIN. An optimal policy for lay-up decisions. *Swedish Journal of Economics*. 1968.

PINDYCK, Robert. Irreversibility, uncertainty and investment. *Journal of Economic Literature*. Sept. 1991, p.1110-1148.

TRIAANTIS, Alexander; HODDER, James. Valuing flexibility as a complex option. *The Journal of Finance*. Vol. XLV, n. 2, June 1990, p.549-565.

VARIAN, HAL. *Micro economia: Princípios Básicos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

WATSHAM, Terry; PARRAMORE, Keith. *Quantitative methods in finance*. London: Thomson, 2002.