

USO EXCESSIVO DE NITROGÊNIO GERA PERDA MONETÁRIA PARA CAFEICULTORES DO CERRADO BAIANO

Victor Meriguetti Pinto¹, Isabeli Pereira Bruno², Quirijn de Jong van Lier³, Durval Dourado Neto⁴, Klaus Reichardt⁵

(Recebido: 13 de abril de 2016; aceito: 08 de setembro de 2016)

RESUMO: Fertilizantes aplicados em excesso podem ser prejudiciais ao ambiente e encarecer os custos de produção agrícola de uma fazenda. Este estudo tem por objetivo estimar os dispêndios associados às perdas de nitrogênio (N) por lixiviação, volatilização e desnitrificação em um cafezal fertirrigado do Cerrado, e apresentar as vantagens econômicas da redução da quantidade de N no manejo de adubação para tal agroecossistema. Balanços de N simulados com os modelos SWAP e ANIMO foram obtidos para um cafezal simulado empregando-se as doses de 200, 300, 400 e 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N. Os investimentos anuais médios para produção do cafezal variaram de 36,1 a 65,3 mil reais por pivô, e os gastos com armazenamento de N no solo e serrapilheira foram de 13,6 a 85,3 mil reais. As perdas anuais médias com lixiviação por pivô foram de 7,5 a 25,4 mil reais, e com volatilização e desnitrificação somadas de 4,4 a 8,8 mil reais. A redução da dose de N para o cafezal do Cerrado de 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N para 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, além de diminuir em 33% os gastos de aplicação de fertilizantes, sem reduzir a produtividade, reduziria em 46% as perdas por lixiviação e em 26% as perdas das emissões de compostos nitrogenados para a atmosfera.

Termos para indexação: Custos de produção, modelagem agro-hidrológica, perdas de nitrogênio, lixiviação, volatilização, desnitrificação.

EXCESSIVE USE OF NITROGEN CAUSES MONETARY LOSS FOR COFFEE GROWERS IN THE CERRADO

ABSTRACT: Fertilizers used in excess may harm the environment and increase the costs of crop production. The present study aimed to predict the monetary expenditure related to nitrogen (N) losses by leaching, volatilization and denitrification in a fertigated coffee plantation in the Cerrado, and also to bring up the advantages of reducing N rates applied in such an agroecosystem. SWAP and ANIMO models were used to simulate the N balances for a simulated area of coffee cultivation managed with rates of 200, 300, 400 and 600 kg ha⁻¹ y⁻¹ of N. The average annual investment for coffee production varied from 36.1 to 65.3 thousand BR-Real per pivot, and the expenses with soil and canopy N storage were 13.6 to 85.3 thousand BR-Real. The average annual expenses with N leaching by pivot were between 7.5 to 25.4 thousand BR-Real, and with volatilization and denitrification between 4.4 to 8.8 thousand BR-Real. Reducing the N rate employed for coffee plants from 600 kg ha⁻¹ y⁻¹ of N to 400 kg ha⁻¹ y⁻¹ of N, would diminished by 33% the costs of N fertilizer application, by 46% the expenses with N leaching and by 26% the expenses with nitrogenous compounds loss to the atmosphere.

Index terms: Crop production cost, nitrogen loss, agro-hydrological modeling, leaching, volatilization, denitrification.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é suscetível a riscos e incertezas, principalmente devido aos ciclos de preços do café e variações da produção de cafezais a curto e longo prazo. Nesse cenário, é destacada a importância de estudos de viabilidade econômica e financeira (EVANGELISTA et al., 2011; LANNA; REIS, 2012), e o acompanhamento dos custos e da eficiência de produção na cafeicultura (REIS; RICHETTI; LIMA, 2005; SILVA; REIS, 2001). Estudos de viabilidade econômica ainda são inexistentes para a cadeia produtiva de café da Bahia, e inclusive, a grande

maioria dos cafeicultores baianos desconhece com precisão quais os custos de produção do seu empreendimento (FERNANDES, 2011).

Os custos de produção de café Arábica no município de Luís Eduardo Magalhães, e da microrregião de Barreiras, no oeste da Bahia, entre os anos de 2003 a 2016 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2015), mostram que as despesas para a condução da lavoura de café perfazem mais da metade dos custos totais de produção, sendo que em média 37% dos custos para condução do cafezal são apenas com fertilizantes. O problema dos altos

^{1,3,5} Universidade de São Paulo - Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) - Laboratório de Física do Solo - Av. Centenário, 303 - Cx. P. 96 - 13.416-970 - Piracicaba- SP - meriguetti@hotmail.com - qdjvlier@usp.br - klaus@cena.usp.br

²Instituto Agronômico do Paraná/IAPAR - Área de Ecofisiologia - Rodovia Celso Garcia Cid, km 375 - 86.047-902 - Londrina-PR isabelibruno@gmail.com

⁴Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Departamento de Produção Vegetal - 13.4180-970 Piracicaba- SP - ddourado@usp.br

gastos com fertilizantes está associado à aplicação de doses elevadas desses insumos e também ao seu preço, o qual está ligado à origem do produto. Os fertilizantes que chegam para o agricultor brasileiro são na maioria (70%) importados de outros países, e menos da metade (30%) é produzida no Brasil (ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA, 2015). Os valores dos fertilizantes empregados no Cerrado e no interior do país dependem principalmente do preço da matéria-prima de origem e da demanda de fertilizantes para a produção agrícola, mas encarecem devido a outros fatores, como as taxas portuárias e de transporte até o agricultor, e o valor da moeda brasileira em relação ao dólar.

Os bons resultados de produção de café arábica no oeste baiano, relativamente às outras regiões de Cerrado do Brasil (CONAB, 2015), acompanham manejos de altas doses de N, os quais ainda não foram validados por experimentação agrícola. Devido à procura dos agricultores por altas produtividades, o manejo de fertilizantes no cultivo de café no Cerrado da Bahia prevê taxas anuais de nitrogênio (N) da ordem de 600 kg ha⁻¹, chegando inclusive a maiores proporções (BRUNO et al., 2011). É reconhecido que o uso indiscriminado de fertilizantes tem potencial de degradação do meio ambiente. Durante a fertilização o N pode seguir outros caminhos além da absorção pelas plantas, como as inevitáveis perdas para o ambiente via volatilização, desnitrificação e lixiviação. Quando a ureia granulada é aplicada sobre a superfície do solo, a volatilização de amônia pode chegar a 50% da dose de N (CRUCIANI et al., 1998; FENILLI et al., 2007). As perdas por desnitrificação variam entre 2% e 25% em sistemas com solos bem drenados. Por lixiviação de nitrato, as perdas podem variar de 10% a 60% da dose de N aplicada (HAVLIN et al., 2005). Em solos arenosos do Cerrado, cultivados sob irrigação e fertirrigação constantes, as perdas de N ocorrem principalmente por lixiviação, podendo atingir a taxa média de 128 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para uma dose de 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N (PINTO, 2015). Os presentes manejos de N empregados no Cerrado baiano, e o consequente transporte de nutrientes por drenagem para regiões abaixo da zona radicular dos cafeeiros, podem causar danos ambientais, como a poluição de aquíferos, além de haver prejuízo monetário associado a estes processos. Alguns estudos realizados naquela região, como os de Bruno et al. (2011) e Paula Neto et al. (2011), indicaram

que é possível reduzir as doses de N praticadas no Cerrado da Bahia sem perdas de produtividade do cafezal em plena produção.

Neste panorama, o uso eficiente dos fertilizantes é imprescindível para garantir em longo prazo a produtividade e a lucratividade da cafeicultura do Cerrado baiano e a preservação do ambiente ao redor. As quantidades de N perdido para o ambiente, quando convertidos em perdas monetárias, mostram o quanto o agricultor paga pelo uso excessivo e desnecessário de fertilizante, e tornam-se mais um fator que pode auxiliar no planejamento da fertilização do cafezal. Neste estudo, objetivou-se estimar os dispêndios das perdas de N por lixiviação, volatilização e desnitrificação para diferentes cenários de precipitação e doses de N mineral, e discutir as vantagens econômicas da redução da dose de N para o cultivo de café no Cerrado baiano.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Origem dos dados

Os dados experimentais utilizados neste estudo foram obtidos de um experimento de campo, descrito com detalhes em Bortolotto et al. (2013) e Bruno et al. (2011, 2015), realizado no período de 2008/2009 em área de cultivo comercial de café no município de Barreiras (11°46'00"S, 45°43'32"W), e próximo do município de Luís Eduardo Magalhães, oeste da Bahia. Os dados experimentais e informações da literatura citada foram usados para ajustar, calibrar e validar os modelos SWAP (Solo, Água, Atmosfera e Planta) e ANIMO (Modelo de Nutriente na Agricultura). Estes modelos foram usados nas simulações da absorção de N pelas plantas e nos processos de lixiviação, volatilização e desnitrificação de N, e os resultados foram apresentados em Pinto (2015). Neste contexto, entende-se por N lixiviado aquele arrastado pelo fluxo de água vertical para profundidades maiores que as abrangidas pelo sistema radicular, e que, portanto, fica fora do alcance da planta e se perde em direção ao lençol freático. Por N volatilizado este estudo considera que é aquele que volta para a atmosfera na forma gasosa de amônia (NH₃) a partir do amônio (NH₄⁺) do fertilizante mineral aplicado ao solo, e por desnitrificado aquele N que, a partir do nitrato (NO₃⁻), é transportado para a atmosfera na forma de dinitrogênio (N₂) e óxido nitroso (N₂O) por ação de microrganismos.

2.2 Experimento de campo

Em um círculo de cafeeiros irrigados por pivô central foram estabelecidas 20 parcelas experimentais, com 5 tratamentos de doses de N, com 4 repetições cada. Os tratamentos se constituíram das doses de 0, 200, 400, 600 e 800 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via fertilizante ureia. Cada repetição correspondeu a uma parcela com três plantas, em que a planta central recebeu N marcado (¹⁵N) por fertirrigação em cobertura, para fazer a distinção do N do fertilizante do N do solo. Durante o período do experimento, as plantas receberam as adubações de macronutrientes (exceto N), micronutrientes, correção de acidez do solo, e aplicação de defensivos (inseticida, fungicida e herbicida) seguindo o manejo da fazenda. A irrigação era contínua ao longo do ano, feita com emissores do tipo LEPA (*Low Energy Precision Application*), com aplicações entre 2 e 4 mm a cada dois dias. Mais detalhes do manejo, além das entradas de água por irrigação e precipitações distribuídas no ano foram divulgadas em Bortolotto et al. (2012), Bruno et al. (2011) e Pinto et al. (2015).

Os teores de N total nos compartimentos folha, ramo, caule, raiz e fruto, bem como o N proveniente do fertilizante (dados isotópicos), foram obtidos de Bruno et al. (2011), além do balanço de N que está apresentado em Bruno et al. (2015). No estudo de Bortolotto et al. (2013), foram obtidas as concentrações de nitrato (NO₃⁻) na solução do solo apenas das parcelas dos tratamentos com aplicação de 400 e 800 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via ureia e as lixiviações, utilizando cálculos de drenagem foram obtidas pelo balanço hídrico de Thornthwaite e Matter (ROLIM; SENTELHAS; BARBIERI, 1998). Como 95% do sistema radicular do cafeeiro estão presentes na camada de 0 a 1 m de profundidade do solo, considera-se que todo o N que tenha ultrapassado esse limite não está mais passível de ser absorvido pela planta e, portanto, foi lixiviado.

2.3 Modelos SWAP e ANIMO

O modelo hidrológico SWAP descreve numericamente o movimento de água no solo utilizando a Equação de Richards (VAN DAM et al., 2008). As relações empíricas de van Genuchten para a relação entre o conteúdo volumétrico de água no solo e o potencial mátrico da água no solo, e a relação de Mualem para a condutividade hidráulica

também são empregadas (GENUCHTEN, 1980; MUALEM, 1976). A evapotranspiração potencial é calculada utilizando dados meteorológicos diários pelo método de Penman-Monteith modificado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAO (ROCHA et al., 2011). A evaporação do solo, calculada pela equação de Darcy, depende do gradiente de umidade e da condutividade hidráulica média entre a superfície do solo e a atmosfera. O modelo simula o funcionamento das plantas com informações básicas de índice de área foliar (IAF), densidade das raízes, coeficiente de cultura (K_c), e potenciais críticos de regulação da transpiração de acordo com o status hídrico do solo (SIMUNEK; HOPMANS, 2009). Informações detalhadas do modelo SWAP estão disponibilizadas em Pinto et al. (2015).

Associado ao SWAP, o modelo ANIMO simula o ciclo do N no solo na presença de vegetação. Este modelo emprega a equação da conservação de massas e de fluxo de solutos para descrever o movimento de N na solução do solo. As entradas de N no sistema modelado são na forma mineral, por fertilizantes e por ação da atmosfera, e na forma orgânica, por adubações orgânicas e resíduos das culturas. O N mineral é discriminado em duas formas, como nitrato (NO₃⁻) e como amônio (NH₄⁺). O modelo ANIMO considera quatro tipos principais de substâncias orgânicas: matéria orgânica fresca, matéria orgânica dissolvida, exsudatos, húmus e biomassa. Os processos de transformação da matéria orgânica, de adsorção de NH₄⁺, mineralização, imobilização e nitrificação são governados por reações de primeira ordem. A desnitrificação no modelo ANIMO é estimada por uma equação que depende de uma taxa constante de desnitrificação, concentração de nitrato na solução, e da difusão de oxigênio no solo (submodelo elaborado dentro do modelo ANIMO). As ações do pH, temperatura, aeração e umidade sobre esses processos são simuladas através de fatores de redução. A volatilização é considerada no modelo como uma perda (porcentagem da fração da dose) de NH₄⁺ do fertilizante no momento da aplicação. A absorção de N pela planta ocorre devido a três tipos de demandas: déficit, crescimento vegetativo, e absorção de luxo. Informações sobre o modelo ANIMO estão disponibilizadas em Groenendijk et al. (2014) e Kaufmann, Pinheiro e Castro (2014).

2.4 Modelagem dos processos de transporte de N

2.4.1 Calibração e validação dos modelos

O modelo ANIMO foi calibrado utilizando os valores de concentração de NO_3^- na solução do solo obtida nas parcelas do tratamento de $400 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Após a calibração, o modelo ANIMO foi validado com os valores de NO_3^- na solução do solo obtidos nas parcelas com aplicação de $800 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (PINTO, 2015). Uma vez calibrado e validado, o modelo foi utilizado em cenários de simulação de manejos de fertilizantes para o cultivo do café em diferentes cenários de precipitação e doses de N mineral, para atender aos objetivos deste estudo.

2.4.2 Cenários de precipitação

As lixiviações de N foram estimadas para os três cenários de precipitação anual utilizando-se as doses de 400 e $600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N. As quantidades de precipitação acumulada foram obtidas da série histórica: média no período de 2003-2013 (AP_{03-13}) de 957 mm , máxima anual (MaP_{30}) de 1687 mm , e mínima (MiP_{30}) de 582 mm . Os cenários de precipitação anual foram gerados a partir da série histórica de 30 anos de dados de chuva da região de Barreiras-BA, disponíveis no sistema de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A quantidade de irrigação foi de 697 mm ano^{-1} aplicada continuamente (2 mm dia^{-1}) durante o ano todo e a de precipitação foi de 1535 mm ano^{-1} , que foi próxima a máxima histórica da região. Irrigação suplementar foi programada no modelo SWAP para manter o armazenamento médio do solo na capacidade de campo (-10 kPa). O modelo ANIMO foi utilizado para gerar resultados do balanço anual de N, e os valores anuais de absorção de N pela planta, lixiviação (abaixo de 1 m de profundidade do solo), volatilização e desnitrificação foram usados no presente estudo para obtenção das perdas monetárias associadas a estes processos (Seção 2.5).

2.4.3 Cenários de manejo de fertilizantes

Os cenários de manejo de N diferiram apenas quanto à quantidade deste nutriente introduzido como ureia no sistema solo-planta (PINTO, 2015). Assim foram escolhidos quatro cenários de doses de N para simulação: 200 , 300 , 400 e $600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ fracionadas em 24 aplicações a cada 14 dias. As entradas de N na forma orgânica ($324 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N), através da atmosfera ($10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N), e as porcentagens de perdas

de NH_3 (10% da dose anual) por volatilização no instante da aplicação foram as mesmas em todos os cenários de doses de N estudadas. O balanço hídrico do modelo SWAP foi obtido utilizando um conjunto de parâmetros padrão estimados e estabelecidos experimentalmente (PINTO et al., 2015).

2.5 Avaliação dos dispêndios com fertilizantes

As taxas anuais de absorção de N do fertilizante pelas plantas, as perdas de N-NH_4^+ e N-NO_3^- por lixiviação, N-NH_4^+ por volatilização e N-NO_3^- por desnitrificação obtidas dos cenários de manejo de fertilizantes (Seção 2.4.3), assim como as taxas de lixiviação dos cenários de precipitação (Seção 2.4.2) foram convertidas em massas de N (kg ano^{-1}) para uma área irrigada de 100 ha , área representativa de um pivô central em cafezais do Cerrado. Para obter a porcentagem de nitrogênio do fertilizante do valor total de N capturado pela planta em Pinto (2015), utilizaram-se os resultados de quantidade de N derivado do fertilizante 35%, para $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N; 35% para $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N; e 55% para $600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N (BRUNO et al., 2015), sendo a média de 33% da absorção total de N no ano. A fração de nitrogênio do fertilizante contida no valor total de N lixiviado em Pinto (2015) foi calculada considerando-se os resultados de quantidade de N derivado do fertilizante na lixiviação de 4 a 13% da dose de N, obtidos em Bortolotto et al. (2012). Os resultados da massa de N foram convertidos em perdas ($\text{R\$ ano}^{-1}$) relacionados aos processos de ganho (absorção pela planta) e perda (lixiviação, volatilização e desnitrificação). Também foi obtida a razão entre o valor do total de N do fertilizante absorvido pelas plantas e o valor do total de fertilizante nitrogenado aplicado, que resultou no que se conhece como “aproveitamento econômico” do N do fertilizante pelas plantas. O gasto total com a aplicação de N ($\text{R\$ ano}^{-1}$) em um pivô de 100 ha é o resultado do produto da dose de N ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) pelo valor do N proveniente do fertilizante ($\text{R\$ kg}^{-1}$).

Na Figura 1 são apresentados os valores, em reais, do preço do fertilizante de distribuidores no estado da Bahia, Goiás e Tocantins (CONAB, 2015) no ano de 2015. Para as simulações dos gastos associados aos processos de ganhos e perdas de N, nesse estudo foram utilizados os seguintes preços da ureia: médio ($\text{R\$ } 1.386$ por t de ureia, equivalente a $\text{R\$ } 3,08$ por kg de N), máximo ($\text{R\$ } 1.640$ por t de ureia, equivalente a $\text{R\$ } 3,64$ por kg de N) e mínimo ($\text{R\$ } 1.260$ por t de ureia ou $\text{R\$ } 2,80$ por kg de N) obtidos do conjunto de preços da ureia no mês de setembro.

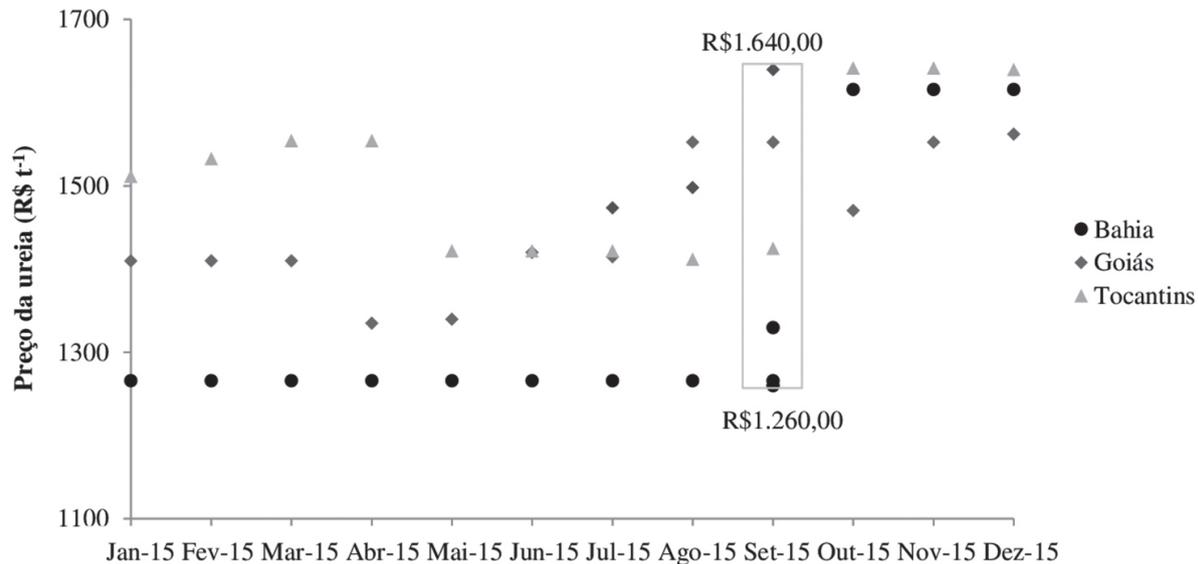


FIGURA 1 - a) Preços (R\$ t⁻¹) da ureia granulada (45% de N) de distribuidores nos estados da Bahia, Goiás e Tocantins (CONAB, 2015).

2.6 Valor bruto de produção

O valor bruto de produção neste estudo constitui a soma em dinheiro calculada como o produto da quantidade produzida de café beneficiado por hectare pelo preço do café por quilograma. Os cenários de valor bruto de produção de café em uma área de 100 ha (pivô) foram obtidos considerando a produtividade média no Cerrado da Bahia nos últimos anos (37 sacas ha⁻¹) e os preços médios mensais da saca (60 kg por saca) de café arábica de R\$ 263,20 (tipo 6 Duro) e de R\$ 191,60 (tipo 7 Bebida Rio) no ano de 2009 pela Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC, 2016).

2.7 Taxa de variação T_{cf}

A razão entre a variação do preço anual da saca de café (Figura 2) e o somatório da variação dos preços dos principais fertilizantes e corretivos (Figura 2 e 3) agrícolas usados na produção de café foi calculada por meio da taxa de variação (T_{cf}), de acordo com a equação 1.

$$T_{cf} = \frac{P \cdot \Delta p_c}{\sum_{i=1}^n (Q_i \cdot \Delta p_{f_i})}$$

em que P é a produtividade anual de café (kg ha⁻¹), Δp_c é a variação do preço do café (R\$ kg⁻¹) entre dois anos seguidos (no período

total de 2009 a 2015), Q_i é a dose do fertilizante ou corretivo agrícola i (kg ha⁻¹), Δp_{f_i} é a variação do preço (R\$ kg⁻¹) do fertilizante ou corretivo agrícola i no período analisado, e n o número total de tipos de fertilizantes agrícolas usados no cultivo em um ano. Na equação 1 as quantidades P e Q_i são fatores de peso do produto produzido (café) e utilizado no cultivo (insumos), respectivamente. Os fatores são usados para relacionar os pesos (escalas) em que o café é produzido para determinada quantidade de insumos (fertilizantes e corretivos agrícolas) utilizados.

O índice T_{cf} é a relação entre a variação do preço do café entre dois anos e a variação dos preços dos insumos utilizados na produção, no mesmo período. Quando o numerador e denominador de T_{cf} têm sinais positivos, a taxa T_{cf} superior a 1 indica que o aumento do preço da saca de café junto da produção em determinado ano foi suficiente para cobrir o aumento no preço dos fertilizantes. Se ambos têm sinais negativos, os preços da saca de café e dos fertilizantes diminuíram, e T_{cf} inferior a 1 indica que o preço do café reduziu menos que o dos fertilizantes naquele ano.

Neste estudo, utilizaram-se os valores dos preços dos insumos agrícolas da série histórica da Bahia disponibilizados pela CONAB no período de 2009-2015. O período 2009-2015 foi selecionado para as análises da variação do preço do café e

dos insumos agrícolas na Bahia, pois se refere ao intervalo de tempo entre a data das medidas experimentais realizadas em campo, descritas em Bruno et al. (2011), usadas para as simulações com os modelos, e a data dos dados mais recentes

disponibilizados pela CONAB. A análise do período indicado foi realizada para estabelecer um comportamento médio do índice T_{cf} e utiliza-lo para realizar uma projeção para o futuro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

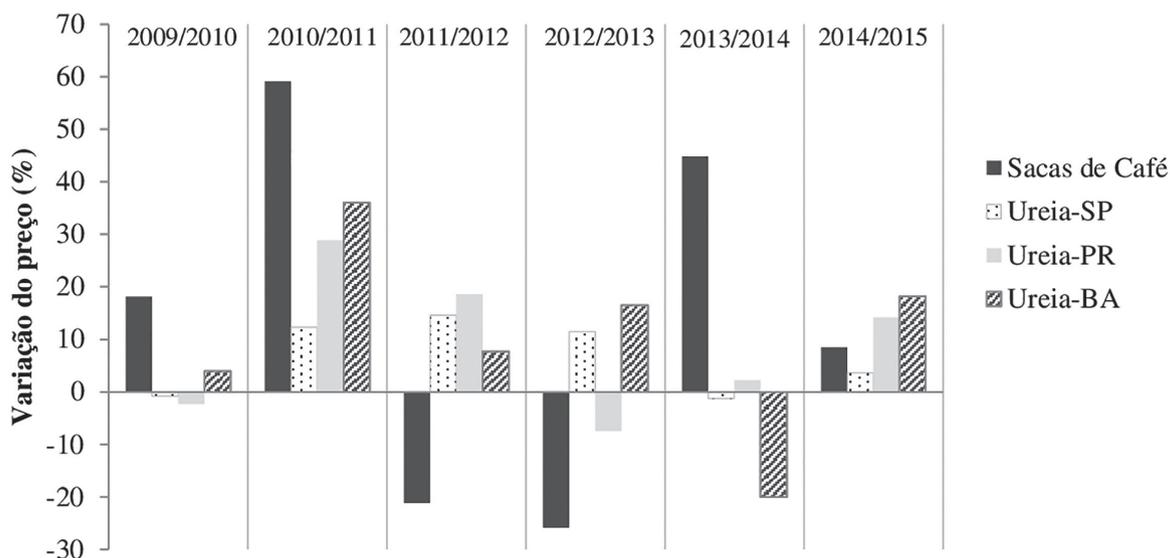


FIGURA 2 - Variações anuais (%) do preço médio do fertilizante (ureia) em regiões cafeeiras do Brasil (CONAB, 2015) e da saca de café Tipo 6 Duro (ABIC, 2015) no período entre 2009 e 2015.

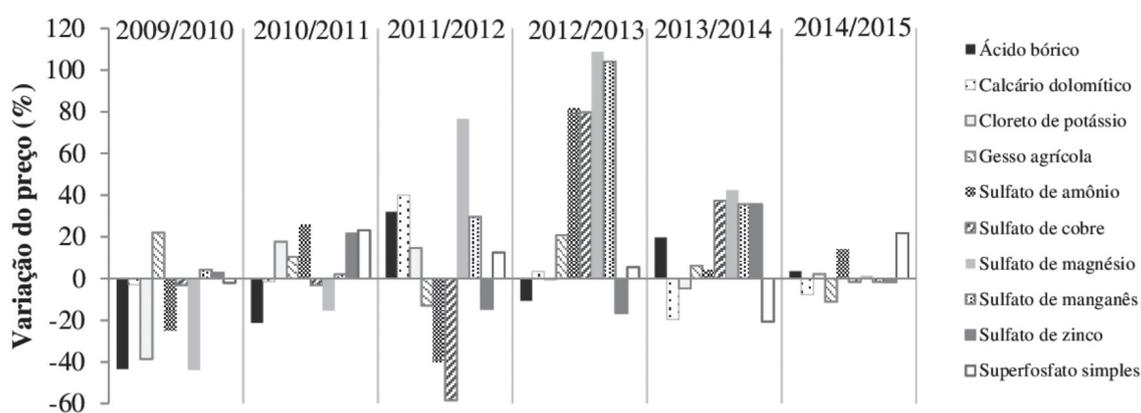


FIGURA 3 - Variações anuais (%) do preço médio de fertilizantes e corretivos agrícolas vendidos na Bahia (CONAB, 2015) no período entre 2009 e 2015.

3.1 Custos das perdas por lixiviação, volatilização e desnitrificação

Na Tabela 1 são apresentadas as estimativas dos valores médios e os intervalos de variação dos gastos totais (R\$ ano⁻¹) ao se aplicar as doses de 200, 300, 400 ou 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N usando fertilizante ureia em um cafezal com área plantada de 100 ha no Cerrado. Um produtor de café do oeste da Bahia, que comprou fertilizante ureia com base nos valores de 2015, gastou em média R\$ 1.848,00 por ha por ano (ou R\$ 184.800,00 para 100 ha por ano) com uma dose de 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N. Este valor corresponde a 67% e 51%, respectivamente, dos custos anuais por hectare de todos os fertilizantes em Luís Eduardo Magalhães, estimados em R\$ 2.752,00 (média de 2011 a 2014), pela CONAB (CONAB, 2015), e em R\$ 3.618,00, pelo projeto Campo Futuro em 2015 (FEDERAÇÃO DE AGRICULTURA E PECUÁRIA DO ESTADO DA BAHIA, 2015).

Na Tabela 2 são mostradas as distribuições dos valores monetários totais da dose de N via ureia considerando os processos de absorção pela planta (usado no crescimento vegetativo e frutos), e as perdas por lixiviação de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ e volatilização e desnitrificação. A razão entre o gasto médio com a absorção de N pelas plantas e o gasto médio com a dose de N via fertilizante resulta no aproveitamento médio do fertilizante pelas plantas, que foi de 59% (200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N), 49% (300 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N), 43% (400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N), e 35% (600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N). A dose de 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N requer gastos menores e o maior aproveitamento entre as doses avaliadas (BRUNO et al., 2015).

As perdas por lixiviação aumentaram com o aumento da dose de N, alcançando um valor mínimo anual de R\$ 6.800,00 para a dose de 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N e um máximo de R\$ 30.100,00 para a dose de 600 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 2). A diferença entre os valores médios da perda por lixiviação da dose de 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N e 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N é de R\$ 11.750,00, maior que a diferença de R\$ 6.150,00, verificada nas perdas médias de lixiviação entre as doses de 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N e de 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N. Estas variações indicam que, ao se elevar a dose de 400 para 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, perde-se o dobro do valor dispendido na elevação da dose de 200 para 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N. Os gastos com volatilização e desnitrificação não apresentaram variações tão grandes quanto os de lixiviação ao se elevar as doses de N, apesar de terem duplicado entre a menor e a maior dose de fertilizante avaliada nesse estudo (Tabela 2). As perdas anuais pelos processos de emissão de N via volatilização e desnitrificação para a atmosfera resultaram entre um mínimo para a dose de 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N e um máximo para a dose de 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N.

As perdas de N foram simuladas para um cafezal em que a dose de N foi parcelada em 24 aplicações no ano. As atuais lavouras de café, no entanto, podem ter um manejo distinto do simulado neste estudo, com menor parcelamento da dose do fertilizante nitrogenado no ano. As perdas por lixiviação, volatilização e desnitrificação dependem do manejo de fertilizante da plantação e podem vir a serem maiores ou menores com relação aos valores apresentados (Tabela 2).

A diferença entre o gasto com a aplicação de uma dose de N (Tabela 1) e o gasto com a nutrição da planta somado às perdas de lixiviação, volatilização e desnitrificação (Tabela 2) revela que, para todas as doses, parte dos gastos de aplicação destina-se a uma fração do fertilizante que fica disponível no solo e na serapilheira. Por exemplo, o gasto para aplicar a dose de 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via ureia em uma área de produção de 100 ha é de R\$ 123.200,00 por ano, dos quais R\$ 52.600,00 é o gasto médio anual para prover N para o crescimento da planta e fruto, e R\$ 20.150,00 são as perdas por lixiviação, volatilização e desnitrificação. A diferença R\$ 123.200,00 – (R\$ 52.600,00 + R\$ 20.150,00) = R\$ 50.450,00 é o valor pago por ano para armazenar N no solo e na serapilheira (total de 16,4 t de N por 100 ha por ano). Em verdade, o N armazenado pode ser compensado gradativamente, visto que os nutrientes armazenados no solo e serapilheira serão disponibilizados para as plantas no futuro, ou perdidos pelos mesmos processos de transportes avaliados neste estudo. Ao aplicar a dose de 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, o armazenamento é de 44,0 kg ha⁻¹ de N ou 4,4 g m⁻² de N, o que limita a disponibilidade de N para o futuro e pode reduzir a produtividade do cafezal se o manejo não levar esse fator em conta.

Neste estudo, avaliou-se o balanço de N em um ano em que a quantidade de precipitação (1535 mm) se aproximou da máxima histórica (1687 mm) registrada na região de Barreiras. As perdas por lixiviação (Tabela 2) são, portanto, em parte devidos ao elevado volume de água precipitada no período de 2008/2009, arrastando grandes quantidades do nutriente para fora da zona radicular. Por isso, os valores de lixiviação (para doses equivalentes) se aproximam aos resultados dos cenários de precipitação máxima (MaP₃₀) apresentados na Tabela 3.

As perdas por lixiviação devido à aplicação das doses de 400 e 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ em um pivô reduziram em aproximadamente 47% e 46%, respectivamente, se comparada aos resultados do cenário de chuva média AP03-13.

TABELA 1 - Gastos anuais associados à aplicação de fertilizante ureia em um pivô de café de 100 ha.

Dose (kg N ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Aplicação do fertilizante (R\$ ano ⁻¹)		
	Mínimo	Médio	Máximo
200	56.000,00	61.600,00	72.900,00
300	84.000,00	92.400,00	109.300,00
400	112.000,00	123.200,00	145.800,00
600	168.000,00	184.800,00	218.700,00

TABELA 2 - Gastos anuais associadas aos processos de absorção de N pela planta, lixiviação de NH₄-N e NO₃-N abaixo das raízes e perdas de N para a atmosfera por volatilização e desnitrificação devido à aplicação de fertilizante ureia em um círculo de pivô de café de 100 ha.

Dose (kg N ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Absorção (R\$ ano ⁻¹)			Lixiviação (R\$ ano ⁻¹)			Volatilização e desnitrificação (R\$ ano ⁻¹)		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
200	32.900,00	36.100,00	42.800,00	6.800,00	7.500,00	8.800,00	4.000,00	4.400,00	5.200,00
300	40.800,00	44.900,00	53.100,00	9.000,00	9.900,00	11.700,00	4.950,00	5.450,00	6.450,00
400	47.850,00	52.600,00	62.700,00	12.400,00	13.650,00	16.150,00	5.950,00	6.500,00	7.700,00
600	59.300,00	65.300,00	77.200,00	23.100,00	25.400,00	30.100,00	8.000,00	8.800,00	10.400,00

TABELA 3 - Perdas anuais associadas ao processo de lixiviação de NH₄-N e NO₃-N abaixo da zona radicular devido à aplicação da dose 400 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ e 600 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ em um círculo de pivô de café de 100 ha em regimes de precipitação anual.

Cenário de chuva*	400 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹			600 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
MiP ₃₀	1.450,00	1.600,00	1.900,00	2.200,00	2.400,00	2.850,00
AP ₀₃₋₁₃	6.500,00	7.200,00	8.500,00	13.200,00	14.550,00	17.200,00
MaP ₃₀	12.500,00	13.800,00	16.300,00	24.600,00	27.000,00	32.000,00

* MiP₃₀: Precipitação anual mínima histórica; AP₀₃₋₁₃: média no período de 2003-2013; e MaP₃₀: máxima histórica.

3.2 Valor bruto de produção e taxa de variação T_{cf}

No primeiro cenário de valor bruto de produção do café, considera-se que o grão de café vendido pelo agricultor é de qualidade tipo 6 Duro e o saldo é de R\$ 973.900,00 por pivô de 100 ha por ano. Com base neste valor, estima-se que a aplicação de uma dose de 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de irá custar de 17% a 23% do saldo estimado (2,4-3,1% dispendidos na lixiviação, 0,8-1,1% dispendidos na volatilização e desnitrificação). A aplicação de uma dose de 400 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ equivale de 12% a 15% do valor bruto de produção estimado (com 1,3-1,7% devido à lixiviação, e 0,6-0,8% devido à volatilização e desnitrificação). No segundo cenário, o valor bruto de produção estimado com a venda do grão tipo 7 Bebida Rio é de R\$ 708.830,00 por pivô de 100 ha por ano, a partir do qual 3,3-4,2% são gastos com lixiviação, e 1,1-1,5% são gastos com volatilização e desnitrificação ao se utilizar uma dose de 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N. Para uma dose de 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, no segundo cenário as porcentagens dos gastos em relação ao valor bruto com a venda de café diminuem para 1,7-2,3%, gasto com lixiviação, e 0,8-1,1% com volatilização e desnitrificação. A participação relativa das perdas pelos processos sobre o valor bruto de produção, no entanto, é susceptível a variações devido ao preço da saca do café e produtividade das plantas durante cada ano. Em 2015, a saca de café arábica tipo 6 BC-Duro chegou a R\$ 454,00 e a do tipo 7 Bebida Rio chegou a R\$ 300,00. Com base nos valores da saca de café em 2015, o valor bruto com a venda do produto estimado no presente estudo, para uma área de 100 ha e produtividade média de 37 sacas ha⁻¹, aumentaria em 73% e 57% com relação ao primeiro e segundo cenários, respectivamente, estimados com o preço da saca de café em 2009 (R\$ 263,20 para a qualidade tipo 6 Duro e de R\$ 191,60 para o tipo 7 Bebida Rio) (ABIC, 2016).

As variações do preço médio anual da ureia de 2009 a 2015 para algumas regiões do Brasil são na maioria positivas, e somadas resultaram em um aumento de preço acumulado de 40% em São Paulo, 54% no Paraná e 62% na Bahia. Seguindo essa tendência, os processos que envolvem perdas e uso do N devem também encarecer nos anos seguintes. As variações anuais do preço da saca de café são também na maioria positivas no período 2009-2015, com aumento acumulado no preço de 84%.

No estado da Bahia, as proporções da variação do preço da saca de café com relação

aos fertilizantes e corretivos agrícolas (índice T_{cf}) nos períodos 2010/2011 e 2014/2015 foram de 0,38 e 0,17 respectivamente. Em ambos os períodos, o aumento do preço da saca do café foi menor que o aumento do preço dos insumos somados. No período 2014/2015, o aumento do preço dos insumos somados é seis vezes maior que o do preço do café. Nos períodos 2011/2012 e 2012/2013, os cenários foram ainda piores, com redução do preço do café e aumento dos preços dos insumos somados, resultando em valores de T_{cf} iguais a -0,22 e -0,27, respectivamente. Nos períodos 2009/2010 e 2013/2014, houve redução dos preços dos insumos e aumento do preço da saca de café, resultando nos índices T_{cf} iguais a -0,05 e -0,46, respectivamente. Uma vantagem para a cafeicultura, levando-se em consideração apenas a redução do gasto com insumos agrícolas. As taxas T_{cf} estimadas mostram que no período 2009-2015 as variações dos preços médios anuais da saca de café entre os anos estiveram, na maior parte, em desvantagem com relação às variações dos preços dos fertilizantes e corretivos agrícolas somados. Seguindo o comportamento médio dos valores históricos de T_{cf} , o aumento dos gastos com fertilizantes excederão o aumento da renda com a venda de café nos próximos anos.

Considerações finais

O gasto com fertilização de N mineral está relacionado principalmente com a dose de N empregada, além do volume de chuva e o preço do fertilizante. Considerando um cenário de precipitação anual acima da média histórica (38% maior), e o preço médio do fertilizante ureia no período 2009-2015, a aplicação parcelada de uma dose de 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N em um pivô irá custar 185,0 mil reais, gerando perdas anuais por lixiviação de aproximadamente 25,5 mil reais, e por volatilização e desnitrificação somadas de 9,0 mil reais. A redução da dose de N aplicada no cafezal de 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N para 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N deve ser considerada pelos cafeicultores do Cerrado baiano, uma vez que, além de reduzir os gastos de aplicação de fertilizantes em 33% sem diminuir a produtividade, como mostraram outros estudos, reduziria as perdas de N por lixiviação em 46% e de volatilização e desnitrificação em 26%.

As estimativas apresentadas devem servir como uma orientação na recomendação das doses de N para o cultivo de café no Cerrado e dar margem a um plano de manejo que beneficie a produção de café, minimize o prejuízo financeiro com perdas de nitrogênio e estimule a conservação do meio ambiente.

4 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, Processo #: 2011/22320-1) pelo financiamento deste estudo; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Processo #:8313-12-1) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Processo #:302261/2011-7) pela concessão de bolsas de estudo. Somos gratos aos membros do Corpo Editorial e revisores que contribuíram de forma anônima com este manuscrito.

5 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Estatísticas:** preço pago ao produtor. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=47>>. Acesso em: 27 jul. 2016.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Principais indicadores do setor de fertilizantes.** 2015. Disponível em: <<http://anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00>>. Acesso em: 23 jan. 2016.
- BORTOLOTTO, R. P. et al. Nitrate leaching through climatologic water balance in a fertigated coffee plantation. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, p. 785-792, 2013.
- BRUNO, I. P. et al. Fertilizer nitrogen in fertigated coffee crop: absorption changes in plant compartments over time. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, p. 369-377, 2011.
- _____. Nitrogen balance and fertigation use efficiency in a field coffee crop. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 38, n. 13, p. 2055-2057, 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Custos de produção:** culturas permanentes: café arábica, série 2003 a 2015. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1556&t=2>>. Acesso em: 23 jan. 2016.
- CRUCIANI, D. E. et al. Fertirrigação nitrogenada na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) por sistema de irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, p. 63-67, 1998.
- EVANGELISTA, A. W. P. et al. Viabilidade financeira da produção de café irrigado em regiões aptas ao cultivo não irrigado. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 137-146, 2011.
- FEDERAÇÃO DE AGRICULTURA E PECUÁRIA DO ESTADO DA BAHIA. **Café:** ano 2015: boletim, custos de produção do café em Luís Eduardo Magalhães-BA. Salvador, 2015.
- GROENENDIJK, et al. Performance assessment of nitrate leaching models for highly vulnerable soils used in low-input farming based on lysimeter data. **Science of Total Environment**, v. 499, p. 463-480, 2014. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.07.002
- KAUFMANN, V.; PINHEIRO, A.; CASTRO, N.M.R. Simulating transport of nitrogen and phosphorus in a Cambisol after natural and simulated intense rainfall. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 160, p. 53-64, 2014.
- HAVLIN, J.L. et al. **Soil fertility and fertilizers:** an introduction to nutrient management. 7. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 515p.
- Lanna, G.B.M., Reis, R.P. Influência da mecanização da colheita na viabilidade econômica-financeira da cafeicultura no sul de Minas Gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 110-121, 2012.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, DC, v. 12, p. 513-522, 1976.
- Neto, A.P. et al. Changes of nutritional status during a phenological cycle of coffee under high nitrogen supply by fertigation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, p. 2414-2425, 2011. doi:10.1080/00103624.2011.607731
- Pinto, V.M. et al. Deep drainage modeling for a fertigated coffee plantation in the Brazilian savanna. **Agricultural Water Management**, v.148, p. 130-140, 2015. doi:10.1016/j.agwat.2014.09.029
- Pinto, V.M. et al. **Simulation of water and nitrogen dynamics in a Cerrado soil under coffee cultivation using SWAP and ANIMO models.** 2015. 123p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- Reis, R.P.; Richetti, A.; Lima, A.L.R. Eficiência econômica na cultura do café: um estudo no sul de Minas Gerais. **Organizações Rurais e Agroindustriais**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 50-59, 2005.
- Rolim G.S.; Sentelhas, P.C.; Barbieri, V. Spreadsheets in Excel™ environment to calculation of water balance: normal, sequential, culture, and potential, real productivity. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, p.133-137, 1998.

ROCHA et al. Estimativa da Eto pelo modelo Penman-Monteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 75-83, 2011. doi: 10.1590/S1806-66902011000100010

Silva, J.M.; Reis, R.P. Custos de produção do café na região de Lavras - MG: Estudo de casos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 6, p.1287-1294, 2001.

Simunek, J.; Hopmans, J.W. Modeling compensated root water and nutrient uptake. **Ecological Modelling**, v. 220, p.505-521, 2009.

VAN DAM et al. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. **Vadoze Zone Journal**, Madison, v. 7, p. 640-653, 2008.

VAN GENUCHTEN M.TH. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.