



LEONARDO DE ALMEIDA NASCIMENTO

**MODELAGEM DA PERDA DE NITROGÊNIO POR
VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA EM FERTILIZANTES
APLICADOS NO CAFEIEIRO**

LAVRAS – MG

2022

LEONARDO DE ALMEIDA NASCIMENTO

**MODELAGEM DA PERDA DE NITROGÊNIO POR VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA
EM FERTILIZANTES APLICADOS NO CAFEIEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Tales Jesus Fernandes

Orientador

LAVRAS – MG

2022

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Nascimento, Leonardo de Almeida.

Modelagem da perda de nitrogênio por volatilização de amônia
em fertilizantes aplicados no cafeeiro / Leonardo de Almeida
Nascimento. - 2022.

68 p. : il.

Orientador: Tales Jesus Fernandes.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Regressão não linear. 2. Café. 3. Adubação nitrogenada. I.
Fernandes, Tales Jesus. II. Título.

LEONARDO DE ALMEIDA NASCIMENTO

**MODELAGEM DA PERDA DE NITROGÊNIO POR VOLATILIZAÇÃO DE
AMÔNIA EM FERTILIZANTES APLICADOS NO CAFEIEIRO**

**MODELING OF NITROGEN LOSS BY AMMONIA VOLATILIZATION IN
FERTILIZERS APPLIED TO COFFEE TREES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 21 de Fevereiro de 2022.

Prof. DSc. Joel Augusto Muniz UFLA
Prof. DSc. Sílvio de Castro Silveira FEOL

Prof. DSc. Tales Jesus Fernandes
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

Dedico esta conquista à Deus, à minha família, aos amigos e professores que caminharam comigo e veem este sonho se concretizar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por ter abençoado a minha caminhada e estado comigo nos bons e, principalmente, nos momentos difíceis, ajudando-me a superá-los.

Aos meus pais, Marina e Vicente, pelas orações, concessão de cuidado e zelo.

Ao meu irmão, Leandro, pela motivação e incentivo.

À minha esposa, Jacqueline, pelo encorajamento, acolhida e compreensão na ausência.

À minha filha, Maria Cecília, pela inocência e ternura.

Ao professor Tales, pelo aprendizado, dedicação e compreensão.

Ao núcleo de estudos em regressão não linear (NLIN), pelas discussões enriquecedoras.

À toda minha turma de mestrado, pela ajuda nas disciplinas.

Ao Gabriel, pelo companheirismo.

Ao Édipo e Victor, pelas conversas e conselhos.

À Universidade Federal de Lavras e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária, pelo ensino de qualidade.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001."

*"Atitude é uma pequena coisa que faz uma grande diferença."
(Clarice Lispector)*

RESUMO

O nitrogênio (N) é um nutriente mineral, encontrado em uma variedade de formas no solo, pode ser absorvido em diferentes formas pelas plantas em crescimento, importante no processo da fotossíntese e para a produção de proteínas nas culturas. O café é uma planta que possui uma relação de dependência com o nitrogênio, dada sua relevância nutricional para produtividade. No entanto, o nutriente não é totalmente absorvido, do solo, pela planta, assim, surge a necessidade da complementação via adubação. Porém, este fertilizante nitrogenado aplicado a lavoura de café pode ser perdido por volatilização de amônia (NH_3). O conhecimento do comportamento nutricional da cultura do café contribui para o manejo adequado, influenciando na qualidade, produtividade e minimizando as perdas econômicas. Por essa razão, neste trabalho, objetivou-se selecionar o modelo de regressão não linear mais adequado para descrever as perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia (NH_3), em sete fertilizantes convencionais e de eficiência aumentada aplicados em três parcelamentos no cafeeiro. Os dados avaliados, quanto a perda de N, são originários de experimento realizado durante a safra 2015/2016, na Agência de Inovação do Café (INOVACAFÉ) da Universidade Federal de Lavras, no delineamento em blocos casualizados com 3 repetições de 7 tratamentos (fertilizantes nitrogenados). O método de estimação usado foi o método dos mínimos quadrados (MMQ), tendo o algoritmo de convergência de Gauss-Newton como o método iterativo. Além disso, todas as análises do trabalho foram realizadas utilizando o software livre R. Através dos resultados encontrados pelos avaliadores da qualidade de ajuste: coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), desvio padrão residual (DPR), critério de informação de Akaike (AIC) e desvio médio absoluto (DMA) verificamos que todos os modelos exibiram bons ajustes, porém, o modelo Brody apresentou os melhores ajustes para descrever as perdas acumuladas de nitrogênio, por volatilização de amônia, em relação aos sete tratamentos aplicados e avaliados.

Palavras-chave: Nutriente. Café. Adubação nitrogenada. Produtividade. Regressão não linear.

ABSTRACT

Nitrogen (N) is a mineral nutrient, found in a variety of forms in the soil, it can be absorbed in different ways by growing plants, important in the process of photosynthesis and for the production of proteins in crops. Coffee is a plant that has a dependence relationship with nitrogen, given its nutritional relevance for productivity. However, the nutrient is not fully absorbed from the soil by the plant, thus, the need for complementation via fertilization arises. However, this nitrogen fertilizer applied to coffee crops can be lost by volatilization of ammonia (NH_3). Knowledge of the nutritional behavior of coffee crops contributes to proper management, influencing quality, productivity and minimizing economic losses. For this reason, in this work, the objective was to select the most adequate nonlinear regression model to describe the nitrogen losses, by volatilization of ammonia (NH_3), in seven conventional and increased efficiency fertilizers applied in three installments in the coffee tree. The data evaluated, regarding the loss of N, originate from an experiment carried out during the 2015/2016 harvest, at the Coffee Innovation Agency (INOVACAFÉ) of the Federal University of Lavras, in a randomized block design with 3 replications of 7 treatments (fertilizers nitrogenous). The estimation method used was the least squares method (MMQ), having the Gauss-Newton convergence algorithm as the iterative method. In addition, all analyzes of the work were performed using the free software R. Through the results found by the quality of fit evaluators: adjusted coefficient of determination (R_{aj}^2), residual standard deviation (DPR), criterion of information of Akaike (AIC) and mean absolute deviation (DMA) we found that all models showed good fits, however, the Brody model showed the best fits to describe the accumulated losses of nitrogen, by volatilization of ammonia, in relation to the seven treatments applied and evaluated.

Keywords: Nutrient. Coffee. Nitrogen fertilization. Productivity. Nonlinear regression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Planta do cafeeiro.	14
Figura 2.2 – Espécies de Coffea cultivadas em larga escala no Brasil.	15
Figura 2.3 – Fases do ciclo reprodutivo do cafeeiro: desenvolvimento da gema floral (G), floração (FL), frutificação (F) e maturação (M).	16
Figura 2.4 – Perda de nitrogênio por volatilização de amônia.	19
Figura 2.5 – Volatilização de amônia.	20
Figura 2.6 – Curva sigmoidal do crescimento populacional.	23
Figura 2.7 – Curva sigmoidal simétrica para o modelo Logístico.	24
Figura 2.8 – Curva sigmoidal para o modelo Gompertz.	25
Figura 2.9 – Curva sigmoidal para o modelo von Bertalanffy.	26
Figura 2.10 – Curva não sigmoidal para o modelo Brody.	27
Figura 3.1 – Croqui do coletor semiaberto de PVC.	36
Figura 3.2 – Coletor semiaberto de PVC.	37
Figura 3.3 – Precipitação, temperatura média e umidade relativa do ar, durante o período de condução do experimento no município de Lavras(MG) na safra 15/16.	38
Figura 4.1 – Representação gráfica da volatilização de amônia acumulada após a primeira adubação nitrogenada do ano safra 2015/2016.	40
Figura 4.2 – Representação gráfica das perdas acumuladas de nitrogênio e ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, em função dos dias após a primeira adubação, para os fertilizantes nitrogenados aplicados.	45
Figura 4.3 – Representação gráfica da volatilização de amônia acumulada após a segunda adubação nitrogenada do ano safra 2015/2016.	48
Figura 4.4 – Representação gráfica das perdas acumuladas de nitrogênio e ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, em função dos dias após a segunda adubação, para os fertilizantes nitrogenados aplicados.	52
Figura 4.5 – Representação gráfica da volatilização de amônia acumulada após a terceira adubação nitrogenada do ano safra 2015/2016.	54
Figura 4.6 – Representação gráfica das perdas acumuladas de nitrogênio e ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, em função dos dias após a terceira adubação, para os fertilizantes nitrogenados aplicados.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Fertilizantes nitrogenados avaliados no experimento e seus respectivos teores de N.	35
Tabela 4.1 – Valor-p para os testes Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e Breusch-Pagan aplicados aos resíduos dos modelos ajustados.	41
Tabela 4.2 – Estimativas para os parâmetros dos modelos ajustados, Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.	42
Tabela 4.3 – Avaliadores da qualidade de ajuste, coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), critério de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o desvio médio absoluto (DMA), dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.	44
Tabela 4.4 – Valor-p para os testes Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e Breusch-Pagan aplicados aos resíduos dos modelos ajustados.	49
Tabela 4.5 – Estimativas para os parâmetros dos modelos ajustados, Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.	50
Tabela 4.6 – Avaliadores da qualidade de ajuste, coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), critério de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o desvio médio absoluto (DMA), dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.	51
Tabela 4.7 – Valor-p para os testes Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e Breusch-Pagan aplicados aos resíduos dos modelos ajustados.	55
Tabela 4.8 – Estimativas para os parâmetros dos modelos ajustados, Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.	56
Tabela 4.9 – Avaliadores da qualidade de ajuste, coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), critério de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o desvio médio absoluto (DMA), dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.	58
Tabela 4.10 – Estimativas de α por adubação.	61
Tabela 4.11 – Perdas diárias máximas de $N - NH_3$ (MDL).	62
Tabela 4.12 – Comparação dos modelos entre tratamentos por adubação.	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Café e sua cadeia produtiva	14
2.2	Manejo da adubação nas lavouras	16
2.3	Nutrientes minerais	17
2.4	O nitrogênio (N)	18
2.5	Perdas de nitrogênio por volatilização	19
2.6	Modelos de regressão não linear	21
2.7	Método de estimação dos parâmetros	29
2.8	Análise de resíduos	32
2.9	Avaliadores de qualidade de ajuste	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1	Caracterização da área experimental	35
3.2	Quantificação das perdas de nitrogênio por volatilização de amônia	36
3.3	Precipitação, temperatura e umidade relativa do ar	38
3.4	Metodologia	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Primeira adubação	40
4.2	Segunda adubação	48
4.3	Terceira adubação	54
4.4	Considerações gerais	60
5	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

O café é uma bebida produzida a partir dos grãos torrados do fruto do cafeeiro e, historicamente, sempre foi de extrema importância para a economia brasileira, principalmente no período de 1800 a 1930, conhecido por ciclo do café. Atualmente, não é diferente, a cultura cafeeira tem grande contribuição para a economia do país, e não apenas com o café tradicional, mas também, com os cafés especiais, pois o Brasil é o maior exportador de café no mercado e responde por um terço da produção mundial de café (CECAFÉ, 2021).

O desempenho de uma safra de café depende de alguns fatores, principalmente, o manejo utilizado, os tratamentos culturais, fertilidade do solo, irrigação, clima da região, potencial produtivo da cultivar e adubação (SOUZA et al., 2018; LIMA et al., 2016; PEREIRA et al., 2011). Dentre estes fatores, um dos aspectos que merece atenção é o fornecimento de nutrientes à lavoura, através da adubação, para o desenvolvimento do cafeeiro, visto que a planta é extremamente exigente em nutrientes, os quais não são totalmente supridos pelo solo (PEREIRA et al., 2011). Estudos realizados sobre a utilização de fertilizantes admitem que a adubação apropriada da lavoura cafeeira, associada a outras práticas de manejo podem auxiliar na complementação nutricional da planta, contribuindo para seu desenvolvimento e produtividade (LIMA et al., 2016).

Entre os nutrientes essenciais às plantas estão o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K), no entanto, para a cultura do café, o nitrogênio é altamente exigido, sendo que, se a adubação for adequada e não houver outros fatores limitantes, o crescimento da planta ocorre de forma rápida, dando origem à formação de folhas verdes e brilhantes (MALAVOLTA, 1986). Porém, o nitrogênio apresenta dinâmica complexa em seu ciclo, pois, normalmente é perdido por volatilização de amônia (NH_3) ou lixiviação.

A volatilização de amônia é uma das principais causas da diminuição da eficiência no uso de fertilizantes nitrogenados em lavouras cafeeiras, além da lixiviação, que colabora para perda do nitrato, o qual, por sua vez, dependendo das características do solo, apresenta alta mobilidade, podendo ser lixiviado com maior facilidade e, conseqüentemente, vir a contaminar águas subterrâneas (MALAVOLTA, 1986; ANJOS; MATTIAZZO, 2000).

Estimativas precisas das emissões de amônia (NH_3) devido à fertilização com adubos nitrogenados são necessárias para identificar técnicas de redução eficientes e aprimorar as práticas agrícolas. Modelos baseados em análise de curvas de crescimento, como os de regressão não linear, podem ser usados para esse propósito, pois incorporam os efeitos de vários fatores

chave (por exemplo, liberação e perda de nitrogênio) que influenciam a volatilização de NH_3 , além, da possibilidade de interpretação prática dos parâmetros destes modelos (MINATO et al., 2020; FERNANDES et al., 2015).

Freitas et al. (2000) analisaram as perdas acumuladas de amônia a partir de adubo nitrogenado aplicado superficialmente em pastagens, ajustada ao modelo Logístico, onde verificou-se que as perdas de amônia foram estimadas satisfatoriamente pela função, já que os valores dos coeficientes de determinação foram superiores a 88,0%.

Os padrões de perdas acumuladas de nitrogênio da ureia, por meio da volatilização de amônia, foram ajustados pelo modelo Logístico, o que se mostrou uma estratégia adequada para avaliar os efeitos da quantidade de ureia aplicada em amostras de solo Planossolo Háplico eutrófico solódico e solo Chernossolo Ebânico carbonático vertissólico, em experimento realizado sob condições laboratoriais (VALE; SOUSA; SCIVITTARO, 2014).

O presente trabalho tem como objetivo selecionar o modelo de regressão não linear mais adequado para descrever as perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia (NH_3), em sete fertilizantes convencionais e de eficiência aumentada aplicados em três parcelamentos no cafeeiro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Café e sua cadeia produtiva

O cafeeiro é uma planta originária do continente africano, nativa de regiões elevadas da Etiópia (Cafa e Enária) de forma que a origem de seu nome pode estar relacionada à Cafa e, curiosamente, o fruto, a semente e a bebida receberam a denominação de café (SAMPAIO; GRANER; JUNIOR, 1967). A sua chegada ao Brasil se deu em meados de 1727, a qual é atribuída ao sargento-mor Francisco de Mello Palheta, que retornando da Guiana Francesa, trouxe consigo, para Belém do Pará o café, que se tornara um produto de alto valor comercial na época (CECAFÉ, 2021), e o país viria a ser um dos maiores fornecedores deste grão para o mundo.

Figura 2.1 – Planta do cafeeiro.



Fonte: Embrapa (2017)

O cafeeiro é uma planta perene, de clima tropical, pertencente à família das *Rubiaceae* e ao gênero *Coffea*, sendo que, no Brasil, as espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora* (conillon ou robusta), Figura 2.2, são as que se destacam no cultivo e pela grande importância econômica (CECAFÉ, 2021). As características referentes a qualidade da bebida são determinadas pela composição química dos grãos de café, a qual é precursora dos compostos que atribuem o sabor e aroma ao café pelo processo de torração, sendo que, estes compostos químicos estão expostos a influência de fatores relacionados ao ambiente, cultivo, colheita, pós-colheita e industrialização (PÁDUA, 2002).

Figura 2.2 – Espécies de *Coffea* cultivadas em larga escala no Brasil.



Coffea arabica

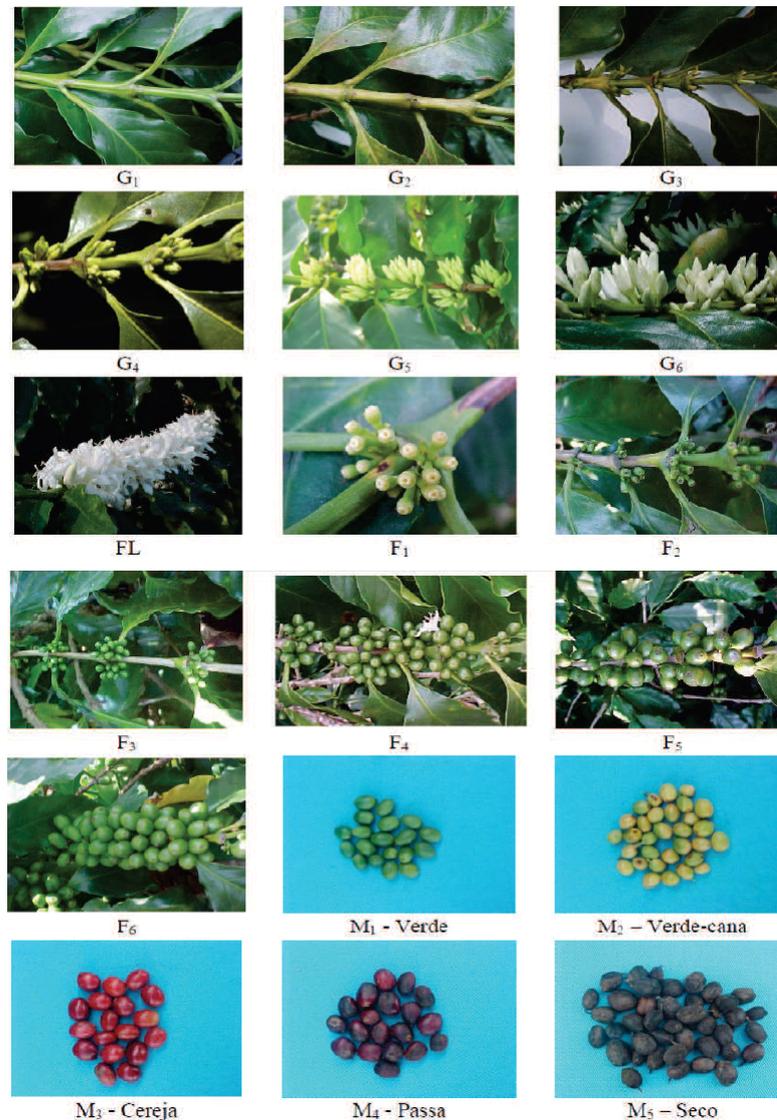


Coffea canephora

Fonte: Aquino et al. (2017)

O ciclo produtivo do cafeeiro estende-se por dois anos e compreende diferentes etapas (Figura 2.3), desde o desenvolvimento da gema floral, passando pela florada, frutificação e, encerrando-se na maturação (MORAIS et al., 2008). Cada etapa do ciclo produtivo apresenta um tempo de duração variável, em função das espécies e das condições climáticas da região, sendo que, cada etapa contém funções fisiológicas e metabólicas próprias, essenciais a formação final do fruto (LAVIOLA et al., 2007).

Figura 2.3 – Fases do ciclo reprodutivo do cafeeiro: desenvolvimento da gema floral (G), floração (FL), frutificação (F) e maturação (M).



Fonte: Moraes (2008)

2.2 Manejo da adubação nas lavouras

O manejo da adubação nas lavouras cafeeiras é um dos processos contidos na cadeia produtiva do café, o qual objetiva atender as necessidades nutricionais da planta e, consequentemente, contribuir para atingir elevada produtividade, a custos baixos, associada a qualidade do café produzido (GUIMARÃES; REIS, 2010). Práticas agrônômicas mais eficientes buscam contribuir para alcançar a excelência do sistema produtivo, desta forma, as práticas de manejo 4C, que orientam a aplicação de fertilizantes, de modo a padronizar o uso da fonte correta, dose correta, época correta e local correto, conforme as análises do solo e foliar, assim como, da capacidade produtiva da lavoura, alternada pela bienalidade (SOUZA et al., 2018).

A bienalidade é caracterizada pela alternância entre anos de alta e baixa produtividade da lavoura cafeeira, a qual possui a necessidade de vegetar, ou descansar, por um espaço de tempo para voltar a produzir em alta capacidade segundo Silva et al. (2010).

Nos anos de alta produtividade ocorre a diminuição das reservas das plantas, o que ocasiona o menor crescimento dos ramos plagiotrópicos, e por sua vez na taxa de produtividade da safra seguinte. Isso quer dizer que, em anos de alta produtividade a produção de fotossintetizados é direcionada pela planta para a formação e crescimento dos frutos, enquanto que, nos anos de baixa produtividade os fotossintetizados são destinados para a formação de novas gemas, as quais darão origem aos novos ramos (MENDONÇA et al., 2011; PEREIRA et al., 2011).

Ainda, segundo Pereira et al. (2011) o adensamento de plantio, manejo adequado da cultura, irrigação e adubação são fatores que podem contribuir na redução do ciclo bienal do café e aumentar a produtividade. Por hora será abordado o fator adubação, dada a nutrição da lavoura cafeeira ser uma das principais condições que influenciam na produtividade do café, uma vez que recebem em média 20 a 30% da adubação que deveriam receber (REIS, 2010), assim, procurou-se entender, minimamente, quais são as necessidades nutricionais da planta.

2.3 Nutrientes minerais

Arnon e Stout (1939) propuseram o termo elemento mineral ou nutriente mineral, em que estabeleceram três critérios para um elemento ser considerado essencial:

- i)* sua carência impede que a planta conclua seu ciclo de vida;
- ii)* o nutriente não pode ser substituído por outro com propriedades semelhantes;
- iii)* o benefício do elemento deve ser manifestado no metabolismo da planta, e não apenas residir no fato de melhorar as características do solo, desencadeando o crescimento da microflora.

Os nutrientes são classificados em dois grupos: macronutrientes, os quais são necessários em maiores quantidades para a planta e os micronutrientes consumidos em quantidades menores (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Os macronutrientes são o carbono (C), oxigênio (O), hidrogênio (H), estes retirados do ar e da água; nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) retirados do solo, em condições naturais. Enquanto os micronutrientes são o boro (B), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), molibdênio (Mo), cobre (Cu) e cloro (Cl).

Entre os nutrientes essenciais durante o ciclo produtivo do café estão o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K), porém, para a cultura cafeeira, o nitrogênio é extremamente exigido (MALAVOLTA, 1986).

O manejo nutricional da lavoura está associado ao uso de fertilizantes e tende diminuir as oscilações de produtividade, pois na fase inicial de crescimento o cafeeiro necessita de pequenas quantidades de nutrientes e à medida que a planta se desenvolve e alcança maturidade produtiva, a necessidade nutricional aumenta (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Deste modo, o fornecimento de fertilizantes deve ser ministrado, proporcionalmente, conforme o desenvolvimento da lavoura e, segundo o aumento da produção (SANZONOWICZ et al., 2003).

A fase de desenvolvimento do cafeeiro é influenciada pelo suprimento de nutrientes armazenado pela planta, sendo que, a cultura cafeeira necessita, fundamentalmente, da composição nutricional em suas fases pré e pós floração (CARVALHO et al., 2010). Na primeira etapa do desenvolvimento, grande parte dos nutrientes é direcionado ao crescimento da raiz, tronco, ramos e folhas; e na inicialização da frutificação (pós floração) onde nesta etapa, a cultura passa a consumir uma parte dos nutrientes absorvidos (COSTA et al., 2013).

Apesar das particularidades existentes entre cada nutriente mineral, torna-se interessante fazer considerações sobre o nitrogênio, o qual terá sua perda por volatilização avaliada neste trabalho.

2.4 O nitrogênio (N)

O nitrogênio é um dos nutrientes minerais mais consumidos pelo cafeeiro, tanto em sua formação, quanto na fase de produção (CARVALHO et al., 2010). Este nutriente atua como um importante regulador de processos fisiológicos e bioquímicos na planta (BOUGUYON; GOJON; NACRY, 2012).

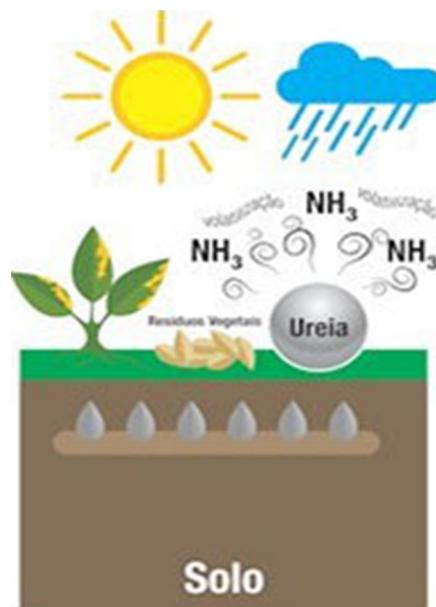
O nitrogênio está envolvido com a produtividade do café, já que proporciona aumento da área foliar, aumento do número de gemas floríferas, desenvolvimento da ramificação dos ramos plagiotrópicos, aumento na produção do amido e de outros carboidratos essenciais para formação e crescimento dos frutos (GUIMARÃES; REIS, 2010). Por sua enorme importância na produtividade, o nitrogênio é o nutriente necessário em maior quantidade, além de ser o segundo nutriente mais exportado pelos grãos (CHAGAS et al., 2016).

As plantas absorvem o nitrogênio fornecido por meio da matéria orgânica do solo, fixação biológica e por fertilizantes nitrogenados. No solo, o nutriente manifesta-se, em grande parte, na forma orgânica, o que corresponde a mais de 95% do nitrogênio total, porém, ele não é diretamente aproveitado pelas plantas, pois para que isso ocorra o nitrogênio deve ser mineralizado para produzir NH_4^+ (amônio), que por sua vez, passando pela nitrificação produzirá o NO_3^- (nitrato), ambos, íons disponíveis para absorção das plantas (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). Entretanto, as condições do solo e climáticas afetam o processo de mineralização, logo, a porção disponível para as plantas pode não ser suficiente para fornecer a quantidade de nitrogênio exigida, por elas, durante seu processo produtivo (MALAVOLTA, 1986). Assim, surge a necessidade de se utilizar os fertilizantes nitrogenados por sua comprovada importância para o cafeeiro.

2.5 Perdas de nitrogênio por volatilização

O fertilizante nitrogenado mais utilizado no Brasil é a ureia, que devido sua alta concentração de N, permite menor custo por unidade do nutriente (CHAGAS et al., 2016). No entanto, as perdas de nitrogênio para atmosfera, em sua forma gasosa, predominantemente, a amônia (NH_3), pelo processo de volatilização é uma das principais causas da redução da eficiência no uso de fertilizantes nitrogenados em lavouras cafeeiras (MEISINGER; CALDERON; JENKINSON, 2008; BARROS; NEVES; NOVAIS, 2005) (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Perda de nitrogênio por volatilização de amônia.



Fonte: Agrohemar (2021)

A volatilização de amônia, proveniente da ureia, é caracterizada pela transição do estado sólido para o gasoso, uma vez que o fertilizante nitrogenado pode ser rapidamente hidrolisado (de dois a três dias) pela ação da enzima urease, produzida por microrganismos do solo e por restos vegetais e animais, e assim, conseqüentemente, é liberado o gás carbônico e o gás amônia para atmosfera (REYNOLDS; WOLF, 1987) (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Volatilização de amônia.



Fonte: Adaptado Nutrisafra (2021)

O processo de volatilização de amônia tem suas perdas influenciadas em razão de diversos fatores, entre os principais estão: o pH do solo; umidade do solo no momento da adubação e volume de chuvas após adubação; cobertura do solo e capacidade de troca catiônica (CTC); atividade da urease, enzima responsável pela hidrólise da molécula de ureia (DOMINGHETTI, 2016).

As perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia, em fertilizantes nitrogenados aplicados em lavoura cafeeira foram quantificadas e analisadas por diversos pesquisadores, entre os quais.

Dominghetti et al. (2016) em experimento realizado sob condições de campo, em um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado com café, em delineamento experimental em blocos casualizados, com três parcelamentos, sendo avaliado seis tratamentos (ureia; nitrato de amônio; ureia + 0,15% de Cu + 0,4% de B; ureia + polímeros; ureia + enxofre elementar (S^0) + polímeros e ureia + resina plástica), observaram através do teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) que o nitrato de amônio promove a menor perda por volatilização, enquanto a ureia + polímeros causa a maior perda, independente das condições climáticas, após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados em lavoura cafeeira.

Chagas et al. (2019) avaliaram as características de crescimento, nutricionais e da eficiência agrônômica da adubação nitrogenada com diferentes tecnologias de fertilizantes nitrogenados (Ureia convencional; Nitrato de amônio; Ureia + formaldeído; Polyblen Extend®; Polyblen Montanha®; Ureia + Poliuretano; Ureia + resina plástica; Sulfato de amônio + CaCO_3 e o controle, sem aplicação de N).

Estes fertilizantes foram aplicados em mudas de café, na dosagem de 10 g *vaso*⁻¹ de N, parceladas em três aplicações com intervalo de 50 dias, em um delineamento inteiramente ao acaso, com quatro repetições. Os autores concluíram por meio do teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) que os maiores valores de altura, massa seca total de plantas, além, de área foliar, maior acúmulo de N na folha e na planta inteira foram encontrados com a aplicação do fertilizante Polyblen Extend®, o qual também proporcionou a maior eficiência agrônômica e aumento da taxa fotossintética no cafeeiro, entre as tecnologias de fertilizantes avaliadas.

Rodrigues et al. (2016) realizaram um delineamento experimental em blocos ao acaso, com cinco tratamentos (fertilizantes nitrogenados) e seis repetições, em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, no qual verificaram, com aplicação do teste de Tukey ($p \leq 0,05$), que as ureias protegidas pelo inibidor NBPT e pelos micronutrientes Cu + B proporcionaram as menores perdas por volatilização, em relação à ureia não protegida, e que, a produtividade dos cafeeiros não é prejudicada pelo uso de ureias protegidas com NBPT, Cu + B e S.

Consequentemente, alguns outros trabalhos descreveram perdas de até 33% do nitrogênio aplicado, por volatilização de amônia, na cafeicultura (BARTELEGA, 2018; SOUZA et al., 2018; FREITAS, 2017; CHAGAS et al., 2016; DOMINGHETTI, 2016), o que demonstra a importância de reduzir as perdas de nitrogênio, por ser o elemento mineral mais exigido, nutricionalmente, pela planta.

2.6 Modelos de regressão não linear

Os modelos de regressão, utilizados na análise de dados de crescimento, têm aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento (SEBER; WILD, 2003), tais como nas ciências sociais, onde há o interesse no crescimento populacional, igualmente ao crescimento da produção alimentar; na biologia o interesse na descrição do crescimento de animais, plantas e frutos; ou até mesmo na agricultura, quanto ao crescimento do volume e velocidade de produção.

Sendo assim, os modelos de regressão habilitam-se a modelagem de múltiplos fenômenos, em diferentes áreas do conhecimento. Em todas estas situações, o pesquisador é solicitado a entender o comportamento entre duas ou mais variáveis e levado a relacionar uma dessas variáveis, denominada dependente ou resposta e denotada por Y, em função de outras variáveis representadas por X e chamada independente, explicativa ou regressora (SEBER; WILD, 1989). Desta forma, o modelo de regressão pode ser representado por:

$$Y_i = f(X_i, \theta) + \varepsilon_i$$

em que, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; Y_i representa os valores observados ou variáveis dependentes; X_i são as variáveis independentes; θ é o conjunto de parâmetros do modelo; $f(\cdot)$ é uma função que acredita-se existir entre as variáveis; ε_i são os erros atribuídos ao modelo.

Conforme Draper e Smith (1998) os modelos de regressão podem ser classificados como:

i) modelos lineares: são lineares em seus parâmetros, ou seja, as suas derivadas parciais com relação aos parâmetros do modelo não dependem de nenhum parâmetro do modelo, como exemplificado a seguir:

$$f(X, \alpha, \beta) = \alpha + \beta X \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial(\alpha)} = 1 \text{ e } \frac{\partial f}{\partial(\beta)} = X$$

ii) modelos não lineares: são não lineares em seus parâmetros, ou seja, pelo menos uma de suas derivadas parciais, em relação a qualquer parâmetro, dependa de algum parâmetro do modelo, e não há transformação que o torne linear. Segue exemplo caracterizando o modelo não linear:

$$f(X, \alpha, \beta, \gamma) = \alpha + \beta e^{\gamma X} \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial(\alpha)} = 1, \frac{\partial f}{\partial(\beta)} = e^{\gamma X} \text{ e } \frac{\partial f}{\partial(\gamma)} = \beta X e^{\gamma X}$$

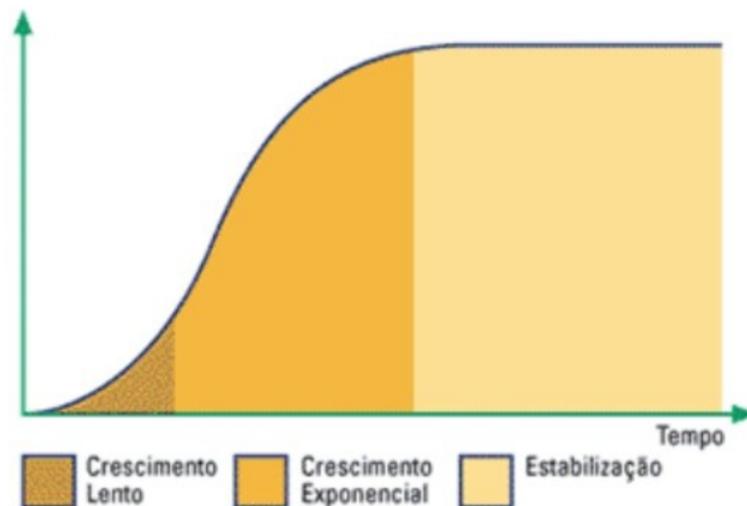
iii) modelos linearizáveis: são modelos não lineares em sua forma inicial, mas, como o próprio nome diz, podem se tornar lineares através de alguma transformação. Por exemplo, na função não linear $Y = e^{(\alpha + \beta X)}$, aplicando o logaritmo, teremos um modelo linear descrito por $\ln Y = \alpha + \beta X$.

Como vimos, os múltiplos fenômenos podem ser ajustados por modelos de regressão, entretanto, dada a característica de interesse, faz-se necessário identificar, entre os modelos classificados como de regressão, o que melhor se ajustará aos dados. Por exemplo, nos processos biológicos estudados durante um espaço de tempo maior não é possível modelar o fenômeno em estudo por meio de um modelo de regressão linear (REGAZZI, 2003). Desta forma, torna-se interessante utilizar os modelos não lineares, os quais apresentam há possibilidade da interpretação prática para os parâmetros (FERNANDES et al., 2015), além, de serem descritos por menos parâmetros do que na regressão linear.

Logo, é interessante avaliar a aplicabilidade dos modelos de regressão não linear, pelas vantagens apresentadas e por existir um grande interesse associado a análise dos dados de crescimento em distintas áreas de pesquisa, mas, principalmente nos fenômenos biológicos (SEBER; WILD, 2003).

Sob a ótica dos modelos não lineares, o termo curva de crescimento descreve a imagem de uma curva sigmoidal, em formato de "S", (exemplificada pela Figura 2.6), que representa a evolução de uma característica de interesse (por exemplo, peso, altura ou crescimento) em função do tempo. É uma curva caracterizada por um comportamento assintótico, ou seja, a taxa de crescimento atinge um máximo, ponto de inflexão, e logo em seguida decresce até estabilizar em zero. Segundo Seber e Wild (2003), este comportamento é bem ajustado por modelos de regressão não linear.

Figura 2.6 – Curva sigmoidal do crescimento populacional.



Fonte: Silva (2018)

Um modelo de regressão não linear, em sua forma mais usual, pode ser definido como:

$$Y = f(X, \theta) + \varepsilon \quad (2.1)$$

em que, \mathbf{Y} é o vetor com a variável resposta (variável dependente); \mathbf{X} é o vetor de variáveis independentes; θ é o vetor de parâmetros; $f(\cdot)$ é a função que acredita-se existir entre as variáveis; ε é o vetor de erros associado ao modelo.

Dos modelos não lineares mais utilizados em estudos de curvas de crescimento, segundo (FERNANDES et al., 2015), teremos suas características e propriedades apresentadas a seguir:

Modelo Logístico

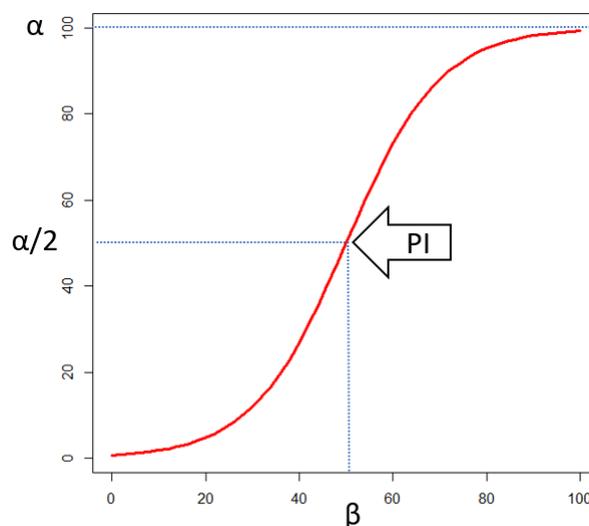
O modelo logístico (2.2) foi proposto pelo matemático Pierre François Verhulst em 1838, para estudar o crescimento de populações humanas (SEBER; WILD, 1989). Este modelo apresenta algumas parametrizações, sendo que uma delas e com interpretação prática direta para todos os parâmetros segundo Fernandes et al. (2015) é dada por:

$$Y_i = \frac{\alpha}{1 + e^{k(\beta - x_i)}} + \varepsilon_i \quad (2.2)$$

em que, Y_i representa o valor observado da variável resposta com $i = 1, 2, \dots, n$; α é a assíntota superior ou o valor assintótico máximo que a característica em estudo pode atingir; β é a abscissa do ponto de inflexão, a partir dele a curva de crescimento inicia trajetória côncava, antes convexa; κ é o índice de crescimento ou maturidade, de modo que, quanto maior for este valor, pressupõe atingir a assíntota superior precocemente; x_i é a i -ésima observação da variável explicativa; o ε_i é o erro aleatório associado à i -ésima observação, o qual pressupõe-se que seja independente e identicamente distribuído, em que $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$.

Este modelo descreve variados processos biológicos por meio da curva de crescimento (Figura 2.7). Esta curva apresenta comportamento sigmoidal, sendo que a curva cresce lentamente no início do desenvolvimento, passa por um ponto de inflexão (PI), dado pelas coordenadas $x = \beta$ e $y = \alpha/2$, em que a curva apresenta sua maior taxa de crescimento e, ponto este que delimita a simetria da função, conseguinte, a curva atingir um valor máximo para sua assíntota horizontal superior, $y = \alpha$, (MISCHAN; PINHO, 2014).

Figura 2.7 – Curva sigmoidal simétrica para o modelo Logístico.



Fonte: Do autor (2021)

Modelo Gompertz

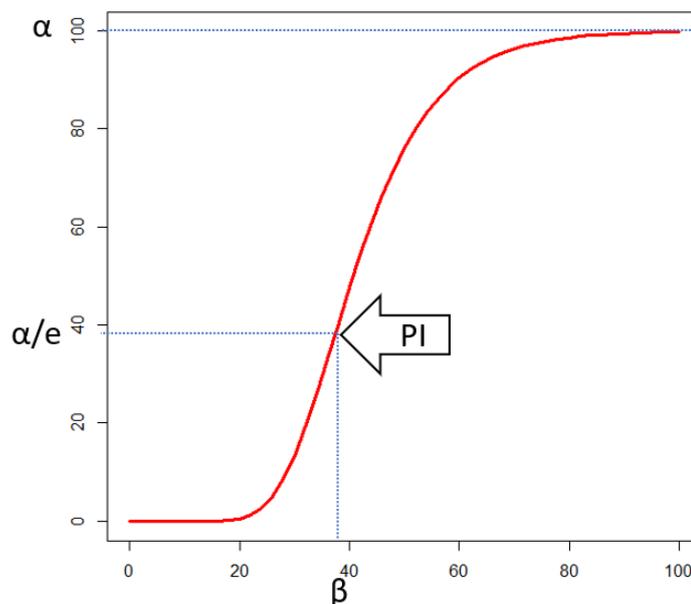
O modelo Gompertz (2.3) foi publicado por Benjamin Gompertz em 1825, para o estudo das tábuas de vida, posteriormente, passou a ser utilizado por outros pesquisadores para modelar a curva de crescimento em fenômenos biológicos. Este modelo apresenta a mesma interpretação para os parâmetros, da forma como é para o modelo logístico. Porém, sua curva sigmoidal não é simétrica em relação ao ponto de inflexão, o que o habilita aos estudos de crescimento animal (SEBER; WILD, 2003). O modelo Gompertz pode ser apresentado por diferentes parametrizações, das quais, uma delas é

$$Y_i = \alpha e^{-e^{\kappa(\beta - x_i)}} + \varepsilon_i \quad (2.3)$$

conforme Fernandes et al. (2015), em que Y_i é a i -ésima observação da variável resposta, α é o valor assintótico que pode ser interpretado como o valor máximo da característica em estudo, β é a abscissa do ponto de inflexão, κ é o índice de crescimento ou maturidade; x_i são as variáveis independentes e o ε_i é o erro aleatório associado à i -ésima observação.

Na representação da curva sigmoidal do modelo Gompertz (Figura 2.8) teremos a reta $y = \alpha$, as coordenadas do ponto de inflexão (PI) serão $x = \beta$ e $y = \alpha/e$, com $e \approx 2,7183$, em que a ordenada corresponderá a aproximadamente 37% do valor de α (MISCHAN; PINHO, 2014).

Figura 2.8 – Curva sigmoidal para o modelo Gompertz.



Fonte: Do autor (2021)

Modelo von Bertalanffy

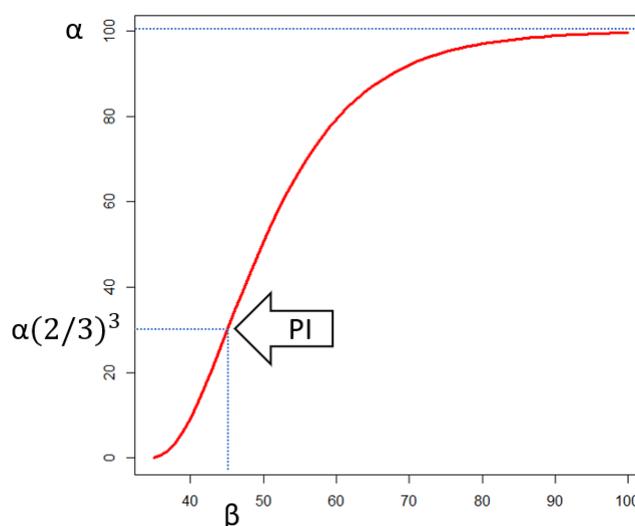
O modelo de von Bertalanffy (2.4) foi proposto por Ludwig von Bertalanffy em 1957, utilizado para descrever curvas de crescimento de peixes e crustáceos (SEBER; WILD, 2003). É um modelo não linear que apresenta um comportamento sigmoidal não simétrico em relação ao ponto de inflexão. O modelo Bertalanffy apresenta interpretação dos parâmetros semelhante à do modelo logístico, e uma de suas parametrizações é representada da seguinte forma:

$$Y_i = \alpha(1 - \beta e^{(-\kappa x_i)})^3 + \varepsilon_i \quad (2.4)$$

em que Y_i é a i -ésima observação da variável resposta, α é o valor assintótico que pode ser interpretado como o valor máximo da característica em estudo e, representado pela reta $y = \alpha$, β é a abscissa do ponto de inflexão, κ é o índice de crescimento; x_i são as variáveis independentes e o ε_i é o erro aleatório associado à i -ésima observação.

O ponto de inflexão (PI) do modelo von Bertalanffy tem como coordenadas $(\beta, (2/3)^3\alpha)$, em que a ordenada corresponderá a aproximadamente 30% do valor de α . Na Figura 2.9 temos a representação da curva sigmoidal do modelo von Bertalanffy.

Figura 2.9 – Curva sigmoidal para o modelo von Bertalanffy.



Fonte: Do autor (2021)

Modelo Brody

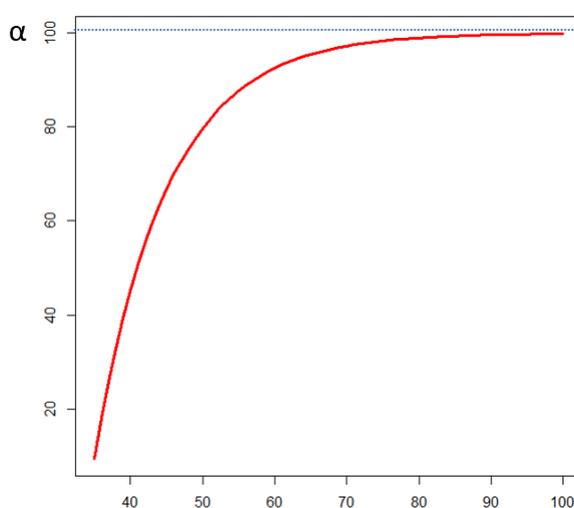
O modelo Brody (2.5) proposto por Samuel Brody em 1945, é aplicado para descrever o crescimento de organismos, onde as taxas decrescem desde o início até atingir a sua fase final assintoticamente, em que, a curva de crescimento não apresenta padrão sigmoidal, pois não

possui ponto de inflexão (MISCHAN; PINHO, 2014). Este modelo pode ser parametrizado da seguinte forma:

$$Y_i = \alpha(1 - \beta e^{-kx_i}) + \varepsilon_i \quad (2.5)$$

A interpretação dos parâmetros deste modelo é a mesma do modelo Logístico, com exceção do parâmetro β que, para esta parametrização, não possui interpretação prática, dado o fato de que a curva de crescimento não apresenta ponto de inflexão, como pode ser observado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Curva não sigmoidal para o modelo Brody.



Fonte: Do autor (2021)

Diante do exposto, cabe destacar algumas possibilidades de aplicação e análise através dos modelos de regressão não linear.

Frühauf et al. (2020) compararam o desempenho dos modelos Logístico, Gompertz, Brody e von Bertalanffy para reconstruir o crescimento diamétrico do cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), admitindo que os modelos não lineares são bem ajustados para os processos biológicos e, considerando a estrutura de erros autorregressivos de primeira ordem, verificaram que todos os modelos apresentaram bons ajustes, mas sendo o modelo Brody o de melhor qualidade de ajuste para descrever o crescimento diamétrico de cedro ao longo do tempo na região de estudo.

Soler-Guilhen et al. (2020) descreveram os padrões de germinação de sementes, de 45 acessos (em 4 grupos), da palmeira juçara (*Euterpe edulis* Mart) por meio dos modelos não lineares (Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Weibull) para examinar o comportamento desses padrões e selecionar genótipos superiores, sendo verificado que o modelo de Gompertz apre-

sentou o melhor ajuste para descrever a curva de crescimento da germinação de sementes de *Euterpe edulis*.

Em estudo realizado por Jane et al. (2020) detalharam a curva de crescimento da altura dos colmos de quatro variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), onde avaliaram que os modelos Logístico e Gompertz sem AR(1) descreveram melhor a altura dos colmos em cana planta e cana soca, respectivamente.

No estudo descrito por Silva et al. (2019) os autores caracterizaram as curvas de mineralização do CO_2 , com base na porcentagem de carbono mineralizado da palha de aveia e dejetos de suínos aplicados na superfície ou incorporados ao solo comparando o ajuste dos modelos Stanford & Smith e Cabrera. Azevedo et al. (2018) demonstraram a aplicabilidade da técnica do agrupamento multivariado de curvas, baseada na distância euclidiana e no método de otimização de Tocher em curvas ajustadas por meio de modelos lineares e não lineares, como alternativa no estudo, pós-colheita, na desidratação de raízes entre acessos de batata-doce, conduzido no delineamento em blocos ao acaso em quatro repetições, verificou-se que o modelo não-linear Brody obteve o melhor ajuste, tendo possibilitado a discriminação de acessos com maior e menor desidratação.

De acordo com Fernandes et al. (2014) o modelo Gompertz ponderado foi o que melhor descreveu o crescimento do fruto do cafeeiro, em ambas as faces de exposição ao sol, sendo que os modelos não lineares estudados descreveram de forma satisfatória a curva de crescimento do fruto do cafeeiro, fornecendo parâmetros com interpretações práticas. O modelo não linear Logístico destacou-se como mais eficiente na descrição do diâmetro de copa de plantas do cafeeiro podado, cultivadas em duas densidades de plantio e submetidas a cinco regimes de irrigação, em trabalho produzido por Pereira et al. (2016).

Uma aplicação dos modelos não lineares em crescimento de fruto pode ser visto em Silva et al. (2021), no qual, os autores avaliaram o ajuste dos modelos Gompertz e Logístico, aos dados de crescimento do coco-anão-verde, considerando descrever as etapas da análise de regressão não linear e estimar os pontos críticos das curvas de crescimento do fruto, onde verificou-se que ambos os modelos se ajustaram bem aos dados, porém, o Logístico apresentou-se mais adequado, visto que obteve os melhores valores entre os critérios de qualidade de ajuste.

De modo geral, percebe-se que vários autores têm aplicado os modelos não lineares no estudo de curvas de crescimento de animais, frutos e plantas, dada a clareza e compreensibilidade na interpretação dos parâmetros, pois em diversas situações é demandado menos

parâmetros nos modelos não lineares do que nos lineares. Assim, segundo Santos et al. (2018) os modelos de regressão não linear tem se mostrado adequados para descrever estas curvas de crescimento, pois apresentam parâmetros que podem ser interpretados biologicamente.

2.7 Método de estimação dos parâmetros

Para realizar a estimação de parâmetros em modelos não lineares aplica-se, comumente, o método dos mínimos quadrados, além do método dos momentos e da máxima verossimilhança que também podem ser utilizados.

O método dos mínimos quadrados (MMQ) tende a minimizar a soma dos quadrados dos desvios entre os valores observados e os valores preditos com a finalidade de estimar os parâmetros $(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_k)$. Para aplicação deste método não é necessário atender a nenhuma pressuposição, contudo, segundo Seber e Wild (2003) os erros devem ser independentes, identicamente distribuídos, com distribuição normal de média zero e variância homogênea para que alguma inferência venha a ser realizada sob aplicação das estimativas dos parâmetros, encontradas, do modelo.

Ainda de acordo com Seber e Wild (1989) e Draper e Smith (1998), dependendo da natureza do tipo da distribuição dos erros, o método de mínimos quadrados pode apresentar as seguintes variações:

i) modelos ordinários: a distribuição dos erros não viola nenhuma das pressuposições, isto significa que, $\varepsilon \sim N(0, I\sigma^2)$;

ii) modelos ponderados: a distribuição dos erros não atende a pressuposição de homogeneidade de variâncias (homocedasticidade), $\varepsilon \sim N(0, V\sigma^2)$, em que V é uma matriz diagonal, positiva definida, dado que os elementos da diagonal são os pesos que ponderam a variância;

iii) modelos generalizados: a distribuição dos erros não atende a pressuposição de independência e de homocedasticidade de variâncias, logo os erros são correlacionados e possivelmente heterocedásticos, $\varepsilon \sim N(0, W\sigma^2)$, em que W é uma matriz simétrica, positiva definida, cujos elementos da diagonal principal são as ponderações das variâncias dos erros e fora dela são diferentes de zero.

Considerando a equação de regressão não linear definida em 2.1, podemos reescrevê-la em notação matricial, o que contribui para ilustrar o método de mínimos quadrados, vejamos:

$$Y = f(X, \theta) + \varepsilon$$

em que

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}; \quad f(X, \theta) = \begin{bmatrix} f(X_1, \theta) \\ f(X_2, \theta) \\ \vdots \\ f(X_n, \theta) \end{bmatrix}; \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

tem-se, então, que

$$E[Y] = E[f(X, \theta) + \varepsilon] = E[f(X, \theta)] + E[\varepsilon] = E[f(X, \theta)] = f(X, \theta).$$

Assim, o resíduo é dado pela diferença entre o valor real e o valor esperado, $\varepsilon = Y - f(X, \theta)$.

O estimador para o vetor de parâmetros θ é dado pelo vetor $\hat{\theta}$ que minimiza a soma de quadrados dos resíduos (SQR), ou seja,

$$SQR(\theta) = \varepsilon' \varepsilon = [Y - f(X, \theta)]' [Y - f(X, \theta)]$$

consequentemente,

$$SQR(\theta) = [Y' - [f(X, \theta)]'] [Y - f(X, \theta)]$$

$$SQR(\theta) = Y'Y - Y'f(X, \theta) - [f(X, \theta)]'Y + [f(X, \theta)]'f(X, \theta)$$

$$SQR(\theta) = Y'Y - 2Y'f(X, \theta) + [f(X, \theta)]'f(X, \theta)$$

Esta é uma forma quadrática e seu ponto crítico é obtido derivando-se $SQR(\theta)$ em relação a θ e, igualando-se esta derivada a zero. Assim, temos

$$\frac{\partial SQR(\theta)}{\partial \theta} = -2Y' \times \frac{\partial f(X, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial [f(X, \theta)]'}{\partial \theta} \times f(X, \theta) + [f(X, \theta)]' \times \frac{\partial f(X, \theta)}{\partial \theta}$$

em que $\frac{\partial f(X, \theta)}{\partial \theta}$ é a matriz de primeiras derivadas parciais, também conhecida como matriz jacobiana. O número de colunas desta matriz está associado ao número de parâmetros do modelo, e o número de linhas é determinado pelo número de observações das variáveis independentes (tamanho da amostra). Em um experimento com n observações, considerando um modelo não linear com p parâmetros, a matriz jacobiana terá dimensões $n \times p$ e apresenta a seguinte forma:

$$\frac{\partial f(X, \theta)}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x_1, \theta)}{\partial(\theta_1)} & \frac{\partial f(x_1, \theta)}{\partial(\theta_2)} & \cdots & \frac{\partial f(x_1, \theta)}{\partial(\theta_p)} \\ \frac{\partial f(x_2, \theta)}{\partial(\theta_1)} & \frac{\partial f(x_2, \theta)}{\partial(\theta_2)} & \cdots & \frac{\partial f(x_2, \theta)}{\partial(\theta_p)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(x_n, \theta)}{\partial(\theta_1)} & \frac{\partial f(x_n, \theta)}{\partial(\theta_2)} & \cdots & \frac{\partial f(x_n, \theta)}{\partial(\theta_p)} \end{bmatrix}$$

Tendo chamado a matriz jacobiana de J , e lembrando a propriedade da transposta de matrizes $(\mathbf{A}'\mathbf{B})' = \mathbf{B}'\mathbf{A}$, temos

$$-2Y'J + 2[f(X, \hat{\theta})]'J = 0$$

$$J'f(X, \hat{\theta}) = Y'J$$

Este é o sistema de equações normais (SEN) para o modelo não linear, no qual a matriz J depende dos parâmetros pela própria definição de modelos não lineares, pois J é a matriz de derivadas parciais do modelo e, para que este seja classificado como não linear, pelo menos uma de suas derivadas parciais deve depender dos parâmetros. Sendo assim, $f(X, \theta)$ e J dependem de θ , dessa forma, não é possível encontrar uma forma fechada para a solução $\hat{\theta}$. Logo, a minimização da soma dos quadrados do resíduo produz o sistema de equações normais (SEN), o qual não possui solução explícita para os parâmetros, assim, torna-se necessário empregar métodos iterativos que permitam encontrar as estimativas dos parâmetros (DRAPER; SMITH, 1998). Ainda de acordo com estes autores, os métodos iterativos mais aplicados são o método de Gauss-Newton ou método da linearização, o método Steepest-Descent ou método do gradiente e o método de Marquardt.

O método de Gauss-Newton consiste no desenvolvimento da série de Taylor até o termo de primeira ordem da função $f(X, \theta)$, em torno do ponto θ^0 (ou até que algum critério de convergência seja aceito), o qual é um vetor de estimativas iniciais, e, assim, aplicar algum dos métodos de estimação dos parâmetros (MAZUCHELI; ACHCAR, 2002). Steepest-Descent é o método baseado no gradiente ou grau de variação dos resíduos. Já o método de Maquardat é baseado na interpolação entre os métodos de Gauss-Newton e do Gradiente. Todos estes métodos diferem-se pela forma como $\theta - \theta^0$ é calculado para promover as atualizações no vetor de parâmetros. Assim, de forma geral, os critérios básicos são:

i) Gauss-Newton: $\theta - \theta^0 = (X'X)X'\varepsilon$;

ii) Gradiente: $\theta - \theta^0 = X'\varepsilon$;

iii) Maquardat: $\theta - \theta^0 = [X'X + \delta \text{diag}(X'X)^{-1}X'\varepsilon]$ em que $(X'X)^{-}$ é uma inversa generalizada.

Entretanto, para que qualquer um destes métodos iterativos alcance a convergência para valores próximos dos reais, será necessário escolher valores iniciais apropriados para os parâmetros, visto que, desta escolha depende a rapidez da convergência e diminui a possibilidade do algoritmo convergir para mínimos locais. Mazucheli e Achcar (2002) relatam que a qualidade dos valores iniciais é mais importante do que a escolha do próprio método iterativo. Observa-se que a qualidade desses valores iniciais está associada a experiência do pesquisador e ao conhecimento de resultados obtidos de estudos anteriores.

2.8 Análise de resíduos

A análise dos resíduos, que são os erros estimados, gerados a partir das diferenças encontradas entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo é de extrema importância. Os erros devem atender aos seguintes pressupostos: apresentarem média igual a zero, serem normalmente distribuídos, homocedásticos (variância constante) e independentes (covariância igual a zero); verificando, assim, a adequabilidade do modelo, o que contribui para garantir a análise inferencial sobre os parâmetros do modelo.

2.9 Avaliadores de qualidade de ajuste

Quando se realiza o ajuste de modelos, na tentativa de encontrar o que melhor descreve um mesmo conjunto de dados, devemos compará-los por meio dos avaliadores de qualidade de ajuste e recomendar o mais adequado (SILVEIRA et al., 2011). O modelo escolhido deverá explicar adequadamente o comportamento da variável dependente envolvendo o menor número de parâmetros, contanto que, todos estes sejam interpretáveis (MOTULSKY; CHRISTOPOULOS, 2003).

Entre os avaliadores de qualidade de ajuste, comumente utilizados, estão o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), o desvio padrão residual (DPR), o critério de informação de Akaike (AIC), o desvio médio absoluto (DMA) e o índice assintótico (IA), segundo SILVA et al. (2021).

O coeficiente de determinação (R^2) pode ser calculado por:

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} \quad (2.6)$$

em que, SQR é a soma de quadrados dos resíduos, SQT a soma de quadrados total. O coeficiente de determinação assume valores entre zero e um. Quanto mais próximo de um, melhor é o ajuste do modelo, pois indica quanto da variação dos dados foi explicada pelo modelo.

Já o coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2) pode ser calculado por:

$$R_{aj}^2 = 1 - \left[\frac{(1 - R^2)(n - i)}{n - p} \right] \quad (2.7)$$

em que, R^2 é o coeficiente de determinação, n é o número de observações, i está relacionado com o ajuste do intercepto na curva, sendo igual a 1 se houver intercepto e 0 para o caso contrário, p o número de parâmetros do modelo. O R_{aj}^2 assume valores entre zero e um, e quanto mais próximo de um, melhor é o ajuste do modelo.

O desvio padrão residual (DPR) é a distância entre os valores observados e as estimativas do modelo ajustado. O modelo que apresentar o menor valor do desvio padrão residual é considerado o mais adequado. O DPR é dado por:

$$DPR = \sqrt{QMR} \quad (2.8)$$

em que, $QMR = \frac{SQR}{n-p}$, onde, QMR é o quadrado médio residual, SQR é a soma de quadrados residual, n é o tamanho da amostra e p é o número de parâmetros.

O Critério de Informação de Akaike (AIC) pode ser calculado da seguinte forma:

$$AIC_{(p)} = n \cdot \ln \left(\frac{SQR}{N} \right) + 2p \quad (2.9)$$

em que, SQR é a soma de quadrados dos resíduos, $\ln(\cdot)$ é o operador logaritmo na base e , n é o número de observações e p o número de parâmetros. O modelo que apresentar o menor valor para o AIC é considerado o melhor.

O Desvio Médio Absoluto (DMA) é definido como a média das diferenças absolutas entre os valores reais (y_i) e os valores previstos no modelo (\hat{y}_i), dividido por n (número de observações). Pode ser obtido da seguinte forma:

$$DMA = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (2.10)$$

Se $y_i = \hat{y}_i$ obtemos $DMA=0$, ou seja, é preferível o modelo que apresentar menor DMA.

O Índice Assintótico (IA) combina os critérios de Desvio Padrão Absoluto (DPA), o qual, é obtido através do quadrado médio do resíduo, o Desvio Médio Absoluto (DMA) e o coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), assim, temos:

$$IA = (DPA - DMA) - (R_{aj}^2) \quad (2.11)$$

A modelagem que apresentar o IA mais próximo de zero é considerado como o modelo de melhor ajuste.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O banco de dados utilizado é parte do experimento realizado por Chagas (2017), durante a safra 2015/2016, na Agência de Inovação do Café (INOVACAFÉ) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), situada em Lavras, MG, Brasil. O município está localizado a 910 m de altitude, na latitude 21° 14' 06" Sul e longitude de 45° 00' 00" Oeste. O clima da região é do tipo Cwa, mesotérmico com verões brandos e suaves, e período seco no inverno, segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 19,4°C, com evapotranspiração potencial (ETP) em torno de 899 a 873 mm por ano, e com precipitação média anual de aproximadamente 1472 mm. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distroférico (LVdf). A lavoura de cafeeiro pertence a cultivar Catuaí Vermelho, linhagem 144, com 6 anos de idade, espaçados por 3,7 m na entrelinha e 0,7 m entre plantas, totalizando 3.861 plantas ha^{-1} .

Chagas (2017) utilizou o delineamento em blocos ao acaso (DBC) com 7 tratamentos e 3 repetições. Cada unidade experimental apresentava 10 metros de comprimento e um total de 14 plantas, utilizando-se as 10 plantas centrais para a realização das avaliações. As parcelas foram delineadas, ao longo da linha de plantio, tendo sido adotado o sistema de bordadura dupla entre as linhas úteis do experimento. Os tratamentos estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Fertilizantes nitrogenados avaliados no experimento e seus respectivos teores de N.

Tratamentos	% N
1 - Ureia perolada	45
2 - Ureia dissolvida em água	45
3 - Sulfato de amônio	19
4 - Nitrato de amônio	31
5 - Ureia + cobre + boro	44
6 - Ureia + polímero aniônico	41
7 - Ureia + NBPT	45

Nota: para todos os fertilizantes foram aplicados 300 kg de N ha^{-1} .

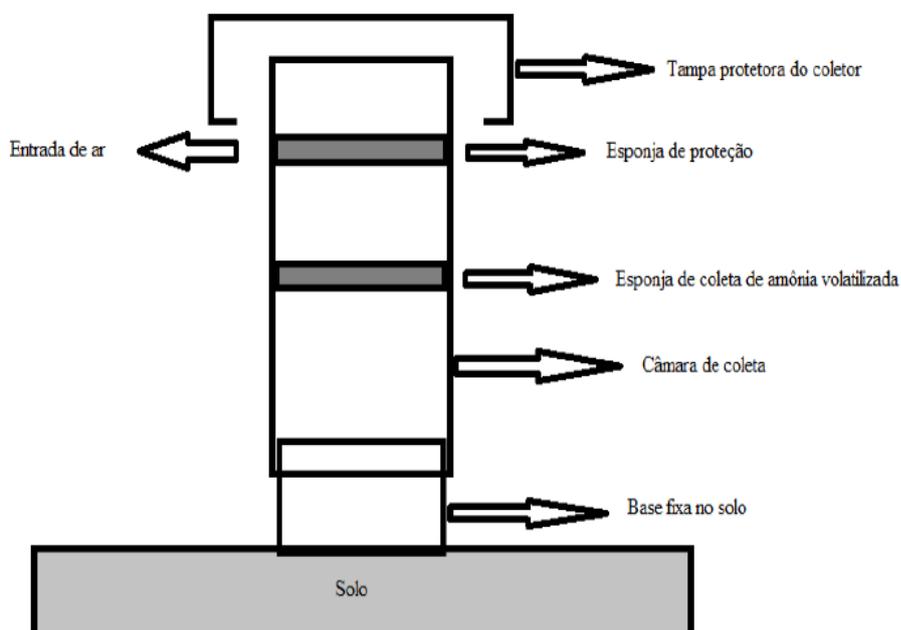
Fonte: Chagas (2017)

Para suprir a demanda por K e P foram aplicados o cloreto de potássio (KCl) e super fosfato triplo (SFT). As doses dos tratamentos foram aplicadas em três parcelamentos, sendo 100 Kg por hectare, iniciando em novembro e finalizando em março e, respeitando um intervalo de 60 dias entre as aplicações.

3.2 Quantificação das perdas de nitrogênio por volatilização de amônia

As perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia, decorrentes da aplicação via solo dos diferentes tratamentos foram quantificadas pelo método do coletor semiaberto de PVC, adaptado por Cabezas et al. (1999). As câmaras coletoras foram preparadas a partir de tubos de PVC com 20 cm de diâmetro e 50 cm de altura acoplados a uma base de PVC de 10 cm, dos quais 5 cm foram fixados no solo (Figura 3.1), sob a projeção da copa das plantas (Figura 3.2).

Figura 3.1 – Croqui do coletor semiaberto de PVC.



Fonte: Dominghetti (2016)

Figura 3.2 – Coletor semiaberto de PVC.



Fonte: Chagas et al. (2016)

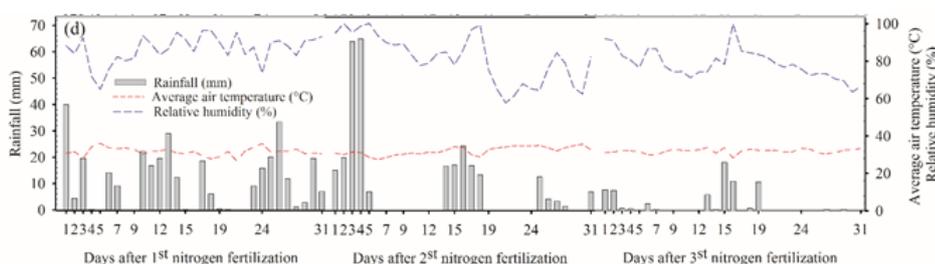
Em cada parcela experimental foram dispostos três coletores e para aplicação dos fertilizantes, dentro destas bases, foi realizado o cálculo da área total e, proporcionalmente, para a área da base de PVC. Para a coleta de amônia (NH_3) volatilizada, dentro de cada tubo de PVC, foram colocados dois discos de espuma laminada com $0,02 \text{ g cm}^{-3}$ de densidade e 2 cm de espessura cortados no mesmo diâmetro do tubo. Os discos foram posicionados dentro das câmaras a uma altura de 30 e 40 cm do solo. A esponja inferior foi previamente embebida com 80 ml de uma solução de ácido fosfórico (H_3PO_4 ; 60 mL^{-1}) e glicerina (50 mL^{-1}), para reter a amônia volatilizada. A esponja superior teve a função de proteger a esponja inferior contra possíveis contaminações do ambiente.

Foram quantificadas as perdas de nitrogênio, através das esponjas inferiores, responsáveis pela retenção da amônia volatilizada, coletadas no 1º, 2º, 3º, 4º, 5º, 7º, 9º, 12º, 15º, 19º, 24º e 31º dia após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. A solução das esponjas coletadas no campo foram extraídas por meio de filtragem em funil de Büchner com auxílio de bomba de vácuo, após cinco lavagens em extrações sequenciais com 80 mL de água deionizada cada. A partir do extrato foi retirada uma alíquota, e armazenada em câmara fria a 5^0C , para determinar o teor de N, por destilação, pelo método de Kjeldahl.

3.3 Precipitação, temperatura e umidade relativa do ar

Os dados de precipitação, temperatura média e umidade relativa do ar (Figura 3.3), foram monitorados durante todo período de realização do experimento, na estação meteorológica instalada próxima a área experimental no município de Lavras. Iniciou-se no dia 01 de novembro de 2015 até 31 de março de 2016, primordialmente nos meses de novembro, janeiro e março logo após a primeira, segunda e terceira adubação nitrogenada, respectivamente.

Figura 3.3 – Precipitação, temperatura média e umidade relativa do ar, durante o período de condução do experimento no município de Lavras(MG) na safra 15/16.



Fonte: Chagas (2017)

A precipitação na região é concentrada entre outubro a março e seguida por um período seco nos seis meses restantes.

Chagas (2017) avalia que a volatilização de amônia está diretamente relacionada com a precipitação, ou seja, ela será eficaz em reduzir as perdas de nitrogênio, se ocorrer em um período curto após aplicação da fonte de ureia.

3.4 Metodologia

Os modelos de regressão não linear ajustados aos dados foram: Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody em que, Y_i representa a perda de nitrogênio, por volatilização de amônia, acumulada em $Kgha^{-1}$, observada na i -ésima parcela de fertilizantes nitrogenados aplicados a safra e x_i o i -ésimo dia em que ocorre a perda de nitrogênio.

Quanto a interpretação prática dos parâmetros de cada um dos respectivos modelos temos: α representando a perda acumulada de nitrogênio para todos os modelos; para os modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy o parâmetro β representa o dia em que a perda de nitrogênio, por volatilização, é máxima, já para o modelo Brody este parâmetro não possui interpretação prática; e o κ representa o índice associado a velocidade da perda de nitrogênio para todos os modelos.

Para a estimação dos parâmetros dos modelos foi utilizado o método dos mínimos quadrados (MMQ), tendo o algoritmo de convergência de Gauss-Newton como o método iterativo, sendo atribuído, inicialmente, os valores iniciais para o vetor de parâmetros $\theta^0 = (\alpha^0, \beta^0, \kappa^0)$, os quais foram obtidos através da análise visual dos dados, testados e escolhidos via as ferramentas do pacote *rpanel*, do software livre R, para ajuste dos modelos de regressão não linear.

Na análise dos resíduos foram utilizados o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para verificar o pressuposto de normalidade dos resíduos, o teste de Breusch-Pagan para verificar o pressuposto de homocedasticidade das variâncias residuais e o teste de Durbin-Watson para verificar a independência dos resíduos, com todos os testes realizados ao nível de significância de 1%.

Após o ajuste dos modelos é realizada a comparação e seleção do modelo que melhor descreve os dados, através dos resultados encontrados para o coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), desvio padrão residual (DPR), critério de informação de Akaike (AIC) e desvio médio absoluto (DMA).

A estimação dos parâmetros dos modelos, análise de resíduos e a verificação da qualidade do ajuste, para seleção do melhor modelo, foram realizadas utilizando-se o software R de acesso livre (R Core Team, 2021), com a utilização dos pacotes *car*, *gridBase*, *lattice*, *lattice-Extra*, *lmtest*, *qpcR* e *rpanel*.

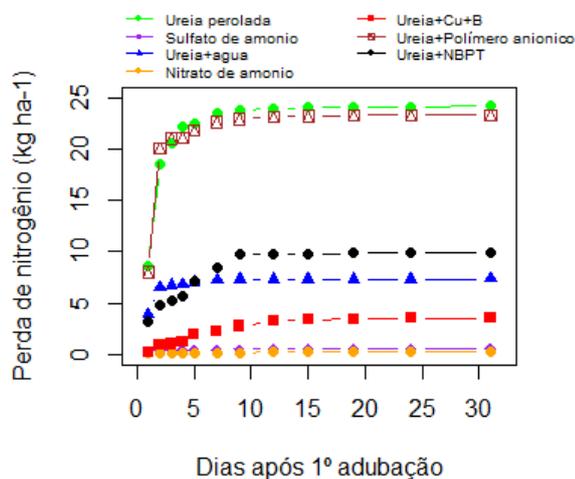
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição dos dados, bem como a análise de resíduos e os parâmetros estimados para os modelos serão apresentados para as três adubações nos tópicos a seguir, tendo como referência as variações das perdas acumuladas de amônia até os 31 dias após cada uma das três aplicações de fertilizações nitrogenadas durante o ano safra 2015/2016.

4.1 Primeira adubação

Observando a Figura 4.1 verificamos que o Nitrato de amônio, Sulfato de amônio e a Ureia + Cu + B contribuem para as menores perdas acumuladas de amônia dos fertilizantes nitrogenados, na primeira adubação, enquanto a Ureia perolada e a Ureia + polímero aniônico promovem as maiores perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia. Além disso, em alguns dos casos, pode-se verificar um comportamento sigmoidal da perda acumulada de NH_3 , em relação aos dias após a primeira adubação, o que sugere o uso da modelagem não linear.

Figura 4.1 – Representação gráfica da volatilização de amônia acumulada após a primeira adubação nitrogenada do ano safra 2015/2016.



Fonte: Dados do autor (2021)

Após o ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody realizou-se a análise de resíduos com aplicação dos testes de Shapiro-Wilk (Normalidade), Durbin-Watson (Independência) e Breusch-Pagan (Homogeneidade), dos quais, são apresentados os resultados obtidos, na Tabela 4.1, para os quatro modelos ajustados.

Tabela 4.1 – Valor-p para os testes Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e Breusch-Pagan aplicados aos resíduos dos modelos ajustados.

Tratamento	Modelo	Normalidade	valor-p	
			Independência	Homocedasticidade
Ureia perolada	Logístico	0,080	0,358	0,006 ¹
	Gompertz	0,303	0,306	0,013
	von Bertalanffy	0,449	0,280	0,012
	Brody	0,740	0,302	0,021
Sulfato de amônio	Logístico	0,553	0,922	0,039
	Gompertz	0,663	0,998	0,064
	von Bertalanffy	0,658	0,996	0,077
	Brody	0,571	0,888	0,114
Ureia + água	Logístico	0,001 ¹	0,398	0,014
	Gompertz	0,015	0,250	0,011
	von Bertalanffy	0,028	0,240	0,011
	Brody	0,088	0,192	0,012
Nitrato de amônio	Logístico	0,342	0,436	0,302
	Gompertz	0,268	0,750	0,235
	von Bertalanffy	0,270	0,842	0,211
	Brody	0,228	0,848	0,272
Ureia + Cu + B	Logístico	0,047	0,720	0,152
	Gompertz	0,807	0,346	0,033
	von Bertalanffy	0,762	0,290	0,035
	Brody	0,994	0,718	0,231
Ureia + polímero aniônico	Logístico	0,024	0,011	0,600
	Gompertz	0,021	0,006 ¹	0,611
	von Bertalanffy	0,021	0,018	0,579
	Brody	0,064	0,022	0,446
Ureia + NBPT	Logístico	0,183	0,480	0,343
	Gompertz	0,522	0,130	0,310
	von Bertalanffy	0,721	0,064	0,289
	Brody	0,717	0,018	0,264

¹significativo ao nível de 1%.

Fonte: Do Autor (2021)

De acordo com a Tabela 4.1 o modelo Logístico ajustado aos dados coletados, nos seguintes tratamentos, Ureia + água e Ureia perolada, tiveram os pressupostos de normalidade e homocedasticidade, respectivamente, não atendidos. Enquanto a independência dos resíduos não foi verificada no modelo Gompertz, ajustado aos dados do tratamento Ureia + polímero aniônico. Para os demais tratamentos e modelos ajustados os pressupostos da análise de resíduos foram atendidos, sob um nível de 1% de significância.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as estimativas dos parâmetros dos modelos que não tiveram nenhum desvio de pressuposto, com base no ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, para os dados das perdas acumuladas de nitrogênio, pela volatilização de NH_3 , nos sete tratamentos aplicados.

Tabela 4.2 – Estimativas para os parâmetros dos modelos ajustados, Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.

Tratamento	Modelo	Estimativas		
		α	β	κ
Ureia perolada	Logístico	-	-	-
	Gompertz	23,746	0,951	1,095
	von Bertalanffy	23,775	0,751	1,010
	Brody	23,837	1,466	0,853
Sulfato de amônio	Logístico	0,575	0,087	0,212
	Gompertz	0,578	1,860	0,178
	von Bertalanffy	0,580	0,216	0,167
	Brody	0,583	0,535	0,146
Ureia + água	Logístico	-	-	-
	Gompertz	7,251	0,161	0,999
	von Bertalanffy	7,251	0,371	0,987
	Brody	7,252	0,970	0,946
Nitrato de amônio	Logístico	0,262	6,130	0,242
	Gompertz	0,267	4,034	0,179
	von Bertalanffy	0,269	0,543	0,160
	Brody	0,276	1,026	0,119
Ureia + Cu + B	Logístico	3,497	5,246	0,344
	Gompertz	3,545	3,726	0,251
	von Bertalanffy	3,571	0,646	0,221
	Brody	3,651	1,143	0,161
Ureia + polímero aniônico	Logístico	22,677	1,217	2,430
	Gompertz	-	-	-
	von Bertalanffy	22,741	1,560	1,716
	Brody	22,787	2,607	1,423
Ureia+NBPT	Logístico	10,005	2,710	0,379
	Gompertz	10,097	1,372	0,283
	von Bertalanffy	10,139	0,403	0,253
	Brody	10,246	0,837	0,197

Fonte: Do Autor (2021)

Avaliada a Tabela 4.2 verificamos a significância dos valores estimados da perda acumulada assintótica máxima (α) para todos os fertilizantes nitrogenados. Ou seja, em todos os modelos ajustados (Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody) as estimativas para α tornam-se confiáveis, pois sabe-se que os valores máximo observados, quanto as perdas de N, foram 24,24; 0,58; 7,34; 0,28; 3,65; 23,38 e 10,89 Kg/ha^{-1} , respectivamente, para cada um destes fertilizantes: Ureia perolada, Sulfato de amônio, Ureia + água, Nitrato de amônio, Ureia + Cu + B, Ureia + polímero aniônico e Ureia + NBPT.

Os tratamentos Ureia perolada e Ureia + polímero aniônico perderam aproximadamente 1/4 de N aplicado (valores estimados de α), o que também foi observado por Guelfi (2017) na cultura do milho, na qual as perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização de amônia foram de 31 e 20%, respectivamente, reforçando que a utilização destes dois tratamentos, mesmo que em culturas diferentes, levaram a uma perda significativa de nitrogênio.

Para o parâmetro β que representa o ponto de inflexão, em que a concavidade da curva muda a sua trajetória de crescimento ascendente para uma trajetória de crescimento menos

acentuada e, é também, neste ponto, que a curva apresenta sua maior taxa de crescimento, observa-se que, em todos os tratamentos, as estimativas do ponto de inflexão foram baixas, em todos os quatro modelos, ou seja, a perda vertiginosa de fertilizante nitrogenado ocorreu logo após o primeiro ou segundo dias da adubação, conforme também observado por Chagas et al. (2019) e Dominghetti et al. (2016).

Ao passo, em que, os fertilizantes aplicados que tiveram o maior tempo de absorção até as maiores perdas, identificadas pelo ponto de inflexão, foram observados nos tratamentos: Nitrato de amônio e Ureia + Cu + B, ajustadas pelo modelo Logístico.

Souza et al. (2017) avaliaram que as perdas diárias de NH_3 são influenciadas significativamente por fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados e de liberação controlada aplicados em plantações de milho, e verificaram que todos os fertilizantes de liberação controlada e estabilizada, aqui o Nitrato e Sulfato de amônio e a Ureia + Cu + B, reduzem os picos de velocidade das perdas diárias de amônia, nos primeiros 3 dias, em comparação com os tratamentos a base de ureia granulada.

Dada às estimativas da velocidade de volatilização (κ) verificou-se que quanto maior são estes valores menor será o tempo para atingir a perda máxima de nitrogênio e, quanto menor são estes valores maior será o tempo para atingir a perda máxima de nitrogênio, enfatizando as características de cada fertilizante, o que colabora com Minato et al. (2020). Ou seja, quanto menor for a estimativa da velocidade de volatilização melhor, pois contribui para que as plantas conservem por mais tempo o nitrogênio aplicado, sem ocorrer a sua perda de forma drástica e repentina. Ou ainda, quanto menor for este valor, possibilita atingir a assíntota superior lentamente, o que favorece a maior absorção do nutriente.

Na Tabela 4.3, observa-se as medidas dos avaliadores de qualidade de ajuste: coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), critério de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o desvio médio absoluto (DMA).

Podemos observar com base nos avaliadores da qualidade de ajuste, que todos os modelos ajustados foram adequados para descrever a perda de nitrogênio, por volatilização de amônia. Comparativamente, o modelo Brody apresentou, ligeiramente, o maior valor para o R_{aj}^2 e, basicamente, os menores valores para o AIC, DPR e DMA. Observando que conforme característica deste modelo a perda já começa acelerada logo nos primeiros dias.

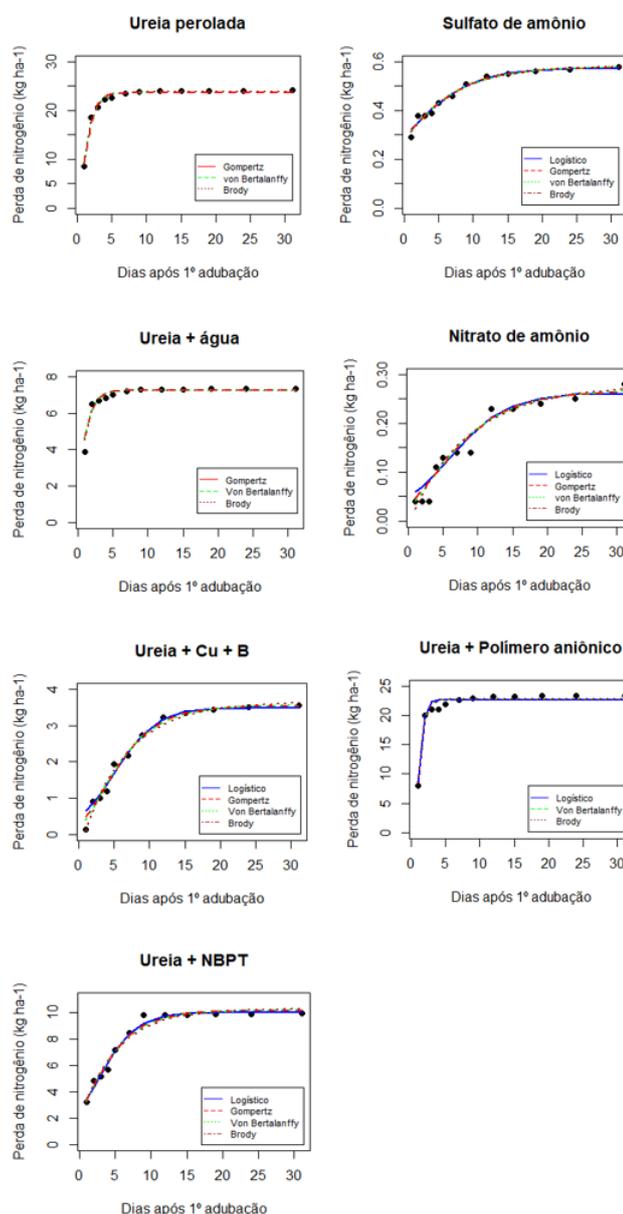
Tabela 4.3 – Avaliadores da qualidade de ajuste, coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), critério de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o desvio médio absoluto (DMA), dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.

Tratamento	Modelo	R ² aj	AIC	DPR	DMA
Ureia perolada	Logístico	-	-	-	-
	Gompertz	0,967	30,848	0,708	0,523
	von Bertalanffy	0,972	29,120	0,658	0,482
	Brody	0,980	25,015	0,553	0,395
Sulfato de amônio	Logístico	0,960	-56,773	0,016	0,010
	Gompertz	0,961	-57,014	0,016	0,010
	von Bertalanffy	0,961	-57,070	0,016	0,010
	Brody	0,961	-57,131	0,016	0,010
Ureia + água	Logístico	-	-	-	-
	Gompertz	0,792	-0,556	0,322	0,179
	von Bertalanffy	0,802	-0,998	0,304	0,173
	Brody	0,823	-1,984	0,270	0,162
Nitrato de amônio	Logístico	0,906	-52,253	0,025	0,019
	Gompertz	0,914	-53,089	0,023	0,017
	von Bertalanffy	0,917	-53,357	0,023	0,016
	Brody	0,919	-53,593	0,022	0,016
Ureia + Cu + B	Logístico	0,979	-2,209	0,209	0,113
	Gompertz	0,980	-2,637	0,168	0,106
	von Bertalanffy	0,979	-1,924	0,156	0,106
	Brody	0,971	1,588	0,163	0,115
Ureia + polímero aniônico	Logístico	0,849	37,204	0,897	0,658
	Gompertz	-	-	-	-
	von Bertalanffy	0,868	35,885	0,852	0,640
	Brody	0,881	34,873	0,817	0,614
Ureia+NBPT	Logístico	0,977	17,516	0,340	0,226
	Gompertz	0,974	19,289	0,400	0,275
	von Bertalanffy	0,972	20,168	0,426	0,293
	Brody	0,966	22,364	0,489	0,334

Fonte: Do Autor (2021)

Na Tabela 4.3 vimos a avaliação da qualidade de ajuste realizada para os modelos apropriados, ou seja, os quais tiveram os pressupostos atendidos, conforme análise de resíduos (Tabela 4.1). Desta forma, serão apresentadas as perdas acumuladas de nitrogênio e as curvas ajustadas dessas perdas, em função dos dias após a primeira adubação para cada tratamento (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Representação gráfica das perdas acumuladas de nitrogênio e ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, em função dos dias após a primeira adubação, para os fertilizantes nitrogenados aplicados.



Fonte: Do Autor (2021)

Observando a Figura 4.2, representação gráfica das perdas acumuladas de nitrogênio e ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, em função dos dias após a primeira adubação, para os fertilizantes nitrogenados aplicados, comparamos, identificamos e destacamos alguns aspectos, entre os quais estão.

Pelo fato de que as menores estimativas do critério de informação de Akaike, DPR e DMA, além, do maior coeficiente de determinação ajustado foram obtidos com o ajuste do modelo Brody, este modelo pareceu ser o mais razoável para o ajuste dos dados das perdas

acumuladas após aplicação da Ureia perolada. Para a curva ajustada as perdas acumuladas após aplicação do fertilizante Sulfato de amônio verifica-se que todos os modelos se ajustaram igualmente, demonstrado pelos valores dos avaliadores de qualidade de ajuste.

Na representação gráfica, dado que, as menores estimativas do DPR e DMA, além, do maior coeficiente de determinação ajustado foram obtidos com o ajuste do modelo Brody, é o mais adequado para descrever as perdas acumuladas após aplicação da Ureia + água. Observamos que todos os modelos se mostraram adequados para ajustar os dados das perdas acumuladas quanto aplicação do fertilizante Nitrato de amônio, dado existir uma similaridade entre os resultados dos avaliadores de qualidade de ajuste.

O modelo von Bertalanffy se mostrou mais adequado para ajustar os dados das perdas acumuladas quanto aplicação do fertilizante Ureia + Cu + B, dado exibir uma mínima vantagem entre os resultados dos avaliadores de qualidade de ajuste. Para o ajuste representativo após aplicação do fertilizante Ureia + polímero aniônico, temos que, as menores estimativas do critério de informação de Akaike, DPR e DMA, além, do maior coeficiente de determinação ajustado foram obtidos com o ajuste do modelo Brody, assim, este modelo mostrou ser o mais adequado para o ajuste dos dados das perdas acumuladas, após aplicação deste fertilizante nitrogenado.

Já para o ajuste dos dados das perdas acumuladas, após aplicação da Ureia + NBPT, o ajuste do modelo Logístico mostrou-se mais adequado, dada as menores estimativas do critério de informação de Akaike, DPR e DMA, além, do maior coeficiente de determinação ajustado. Da mesma forma Vale, Sousa e Scivittaro (2014) utilizaram o modelo Logístico para estimar as perdas de amônia após aplicação do fertilizante Ureia + NBPT, sugerindo assim, devido as características deste modelo, o qual possui ponto de inflexão mais tardio, que a aplicação de NBPT aumenta a proteção do N, desta forma, minimizando a perda logo após a aplicação.

Dominghetti et al. (2016) avaliaram as perdas de nitrogênio por volatilização, em fertilizantes utilizados no cultivo de café, e pelo teste Skott-Knott verificaram que a aplicação do Nitrato e Sulfato de amônia contribuíram para as menores perdas, da mesma forma que ocorreu entre os tratamentos aplicados sobre a safra 15/16 e avaliados neste trabalho.

O modelo Brody mostrou se adequado para estimar as perdas de nitrogênio após aplicação dos fertilizantes Ureia perolada, Ureia + água e Ureia + polímero aniônico, visto que, a perda inicia-se acelerada desde os primeiros dias, ou seja, o modelo não apresenta ponto de inflexão. Desta forma Frühauf et al. (2020) verificaram que o modelo Brody apresentou-se como

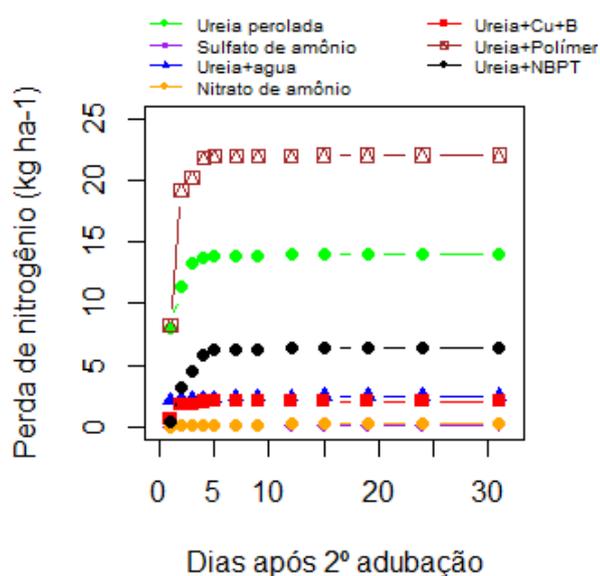
o melhor para descrever o crescimento diamétrico de cedro ao longo do tempo e em estudo conduzido por Azevedo et al. (2018) avaliaram que este mesmo modelo apresentou-se como a melhor opção para a discriminação de acessos com maior e menor desidratação de raízes entre acessos de batata-doce. Ambos casos caracterizados pelo crescimento acelerado, do objeto de estudo, logo no início do ciclo.

De acordo com os modelos ajustados (Tabela 4.2) e sabendo que foram aplicados 100 Kg de N por hectare, a volatilização média máxima de amônia, calculada a partir do parâmetro α , diminuiu da seguinte forma: Ureia perolada (23,78 kg N ha^{-1}), Ureia + polímero aniônico (22,73 kg N ha^{-1}), Ureia + NBPT (10,12 kg N ha^{-1}), Ureia + água (7,25 kg N ha^{-1}), Ureia + Cu + B (3,56 kg N ha^{-1}), Sulfato de amônio (0,58 kg N ha^{-1}) e Nitrato de amônio (0,27 kg N ha^{-1}). Desta forma, Ureia + Cu + B, Sulfato de amônio e Nitrato de amônio promoveram as menores perdas de nitrogênio na forma de amônia ($N - NH_3$), com diminuição percentual de perda em 85,2, 97,8 e 99,1%, respectivamente, em comparação com a perda promovida pela Ureia perolada.

4.2 Segunda adubação

Avaliando a Figura 4.3 verificamos que o Nitrato de amônio, Sulfato de amônio, Ureia + Cu + B e Ureia + água contribuem para as menores perdas acumuladas de amônia dos fertilizantes nitrogenados, na segunda adubação, enquanto a Ureia + polímero aniônico e a Ureia perolada promovem as maiores perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia.

Figura 4.3 – Representação gráfica da volatilização de amônia acumulada após a segunda adubação nitrogenada do ano safra 2015/2016.



Fonte: Dados do autor (2021)

Após o ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody realizou-se a análise de resíduos, cujo os resultados para os quatro modelos serão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valor-p para os testes Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e Breusch-Pagan aplicados aos resíduos dos modelos ajustados.

Tratamento	Modelo	valor-p		
		Normalidade	Independência	Homocedasticidade
Ureia perolada	Logístico	0,149	0,148	0,018
	Gompertz	0,077	0,256	0,011
	von Bertalanffy	0,112	0,326	0,009 ¹
	Brody	0,146	0,452	0,007 ¹
Sulfato de amônio	Logístico	0,981	0,774	0,707
	Gompertz	0,490	0,900	0,979
	von Bertalanffy	0,342	0,882	0,987
	Brody	0,537	0,986	0,785
Ureia + água	Logístico	0,313	0,338	0,041
	Gompertz	0,309	0,306	0,042
	von Bertalanffy	0,314	0,252	0,042
	Brody	0,320	0,252	0,043
Nitrato de amônio	Logístico	0,004 ¹	0,538	0,146
	Gompertz	0,006 ¹	0,376	0,148
	von Bertalanffy	0,007 ¹	0,320	0,149
	Brody	0,007 ¹	0,156	0,141
Ureia + Cu + B	Logístico	0,000 ¹	0,598	0,011
	Gompertz	0,000 ¹	0,522	0,008 ¹
	von Bertalanffy	0,000 ¹	0,472	0,007 ¹
	Brody	0,000 ¹	0,344	0,008 ¹
Ureia + polímero aniônico	Logístico	0,000 ¹	0,944	0,740
	Gompertz	0,000 ¹	0,686	0,484
	von Bertalanffy	0,000 ¹	0,524	0,391
	Brody	0,000 ¹	0,300	0,235
Ureia+NBPT	Logístico	0,000 ¹	0,318	0,002 ¹
	Gompertz	0,105	0,068	0,005 ¹
	von Bertalanffy	0,036	0,108	0,011
	Brody	0,000 ¹	0,356	0,145

¹significativo ao nível de 1%.

Fonte: Do Autor (2021)

Neste parcelamento tivemos grandes desvios de pressupostos, ficando a modelagem comprometida para alguns fertilizantes. Possíveis causas são a grande quantidade de chuvas que caíram logo após a aplicação da segunda adubação (Figura 3.3). Conforme observado por Cabezas, Korndorfer e Motta (1997a) a precipitação causa grande variação no ambiente, pois a água reduz a volatilização de amônia caso seja em quantidade suficiente para dissolver a concentração de oxidrilas que foram produzidas na reação de hidrólise, contribuindo para incorporação da ureia no solo.

Conforme apresentado na Tabela 4.4, não foram observados desvios de pressupostos para os fertilizantes Sulfato de amônio e Ureia + água. Para todos os demais fertilizantes observou-se desvio de pressupostos em algum modelo, possibilitando apenas o ajuste dos modelos Logístico e Gompertz para Ureia perolada e von Bertalanffy para Ureia + NBPT. Nos demais cenários não foi possível a modelagem devido ao desvio dos pressupostos de regressão.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as estimativas dos parâmetros, com base no ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, para os dados das perdas acumuladas

de nitrogênio, pela volatilização de NH_3 , nos tratamentos Ureia perolada, Sulfato de amônia, Ureia + água, Ureia + NBPT.

Tabela 4.5 – Estimativas para os parâmetros dos modelos ajustados, Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.

Tratamento	Modelo	Estimativas		
		α	β	κ
Ureia perolada	Logístico	13,970	0,785	1,264
	Gompertz	13,980	0,489	1,098
	von Bertalanffy	-	-	-
	Brody	-	-	-
Sulfato de amônio	Logístico	0,058	7,057	0,155
	Gompertz	0,061	3,938	0,107
	von Bertalanffy	0,062	0,413	0,092
	Brody	0,066	0,839	0,062
Ureia + água	Logístico	2,450	-6,930	0,243
	Gompertz	2,450	-7,542	0,234
	von Bertalanffy	2,450	0,055	0,230
	Brody	2,451	0,159	0,224
Nitrato de amônio	Logístico	-	-	-
	Gompertz	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-
	Brody	-	-	-
Ureia + Cu + B	Logístico	-	-	-
	Gompertz	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-
	Brody	-	-	-
Ureia + polímero aniônico	Logístico	-	-	-
	Gompertz	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-
	Brody	-	-	-
Ureia+NBPT	Logístico	-	-	-
	Gompertz	-	-	-
	von Bertalanffy	6,371	1,695	0,999
	Brody	-	-	-

Fonte: Do Autor (2021)

Pela Tabela 4.5 verifica-se a significância dos valores estimados da perda acumulada assintótica máxima (α) para todos os fertilizantes nitrogenados. Logo, em todos os modelos ajustados (Logístico , Gompertz, von Bertalanffy e Brody) as estimativas para α tornam-se confiáveis, pois sabe-se que os valores máximo observados, quanto as perdas de N, foram 13,99; 0,06; 2,45 e 6,38 Kg/ha^{-1} , respectivamente, para cada um destes fertilizantes: Ureia perolada, Sulfato de amônio, Ureia + água e Ureia + NBPT.

Mesmo em fertilizantes que perdem mais nitrogênio por volatilização, neste cenário perderam menos, por exemplo, a perda de N no tratamento Ureia perolada foi de apenas 13,97% do total aplicado, correspondendo a quase metade da perda no primeiro parcelamento (23,78%). Tal fato pode ser explicado pelas chuvas que ocorreram imediatamente após a aplicação dos fertilizantes. Conforme Cabezas, Korndorfer e Motta (1997b) o umedecimento do solo, poste-

riormente a aplicação da ureia, facilita a absorção de nitrogênio pelas plantas e desta forma a perda por volatilização é minimizada.

Para o parâmetro β observa-se que, em todos os quatro tratamentos, as estimativas do ponto de inflexão foram baixas, para todos os quatro modelos, ou seja, a perda acentuada de amônia ocorreu logo após os primeiros dias da adubação, ao passo que, as perdas postergadas, identificadas pelo ponto de inflexão, foram observadas no tratamento Sulfato de amônio e estimadas pelo modelo Logístico. A medida que para as estimativas da velocidade de volatilização (κ) verificou-se que, de forma geral, os valores encontrados são relativamente baixos.

Na Tabela 4.6 observa-se as medidas dos avaliadores de qualidade de ajuste: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), critério de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o desvio médio absoluto (DMA).

Tabela 4.6 – Avaliadores da qualidade de ajuste, coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), critério de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o desvio médio absoluto (DMA), dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.

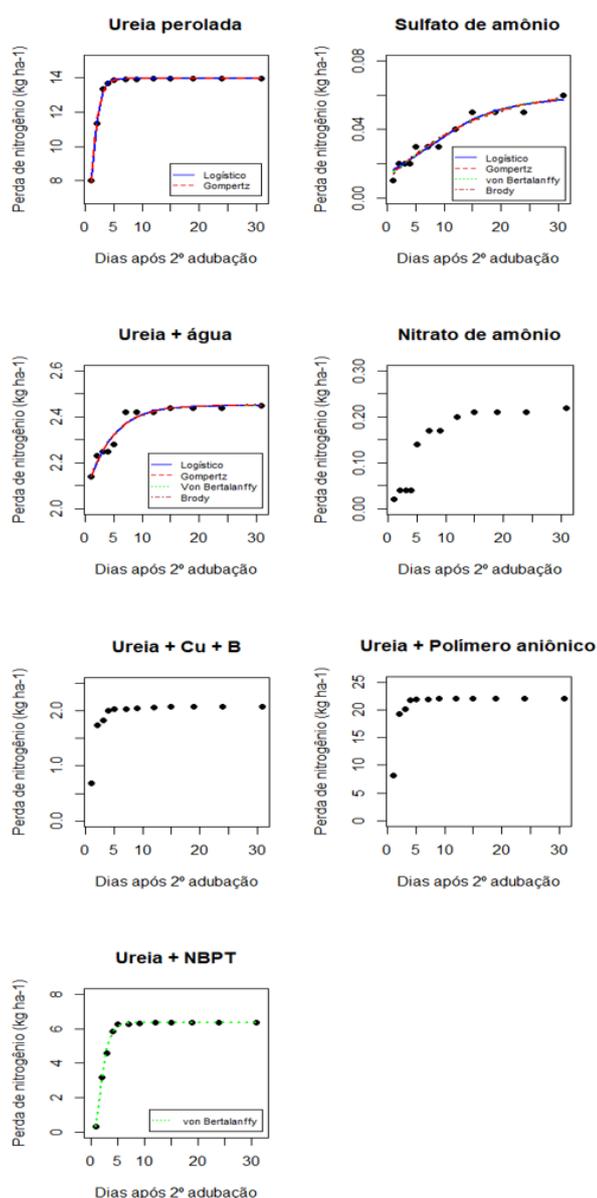
Tratamento	Modelo	R ² aj	AIC	DPR	DMA
Ureia perolada	Logístico	0,995	-19,764	0,089	0,051
	Gompertz	0,992	-13,550	0,115	0,061
	von Bertalanffy	-	-	-	-
	Brody	-	-	-	-
Sulfato de amônio	Logístico	0,941	-93,885	0,004	0,002
	Gompertz	0,943	-94,178	0,003	0,002
	von Bertalanffy	0,943	-94,181	0,003	0,002
	Brody	0,942	-93,992	0,003	0,002
Ureia + água	Logístico	0,929	-46,967	0,028	0,017
	Gompertz	0,928	-46,781	0,028	0,017
	von Bertalanffy	0,927	-46,718	0,028	0,017
	Brody	0,926	-46,589	0,029	0,017
Nitrato de amônio	Logístico	-	-	-	-
	Gompertz	-	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-	-
	Brody	-	-	-	-
Ureia + Cu + B	Logístico	-	-	-	-
	Gompertz	-	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-	-
	Brody	-	-	-	-
Ureia + polímero aniônico	Logístico	-	-	-	-
	Gompertz	-	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-	-
	Brody	-	-	-	-
Ureia+NBPT	Logístico	-	-	-	-
	Gompertz	-	-	-	-
	von Bertalanffy	0,966	-12,896	0,152	0,077
	Brody	-	-	-	-

Fonte: Do Autor (2021)

Podemos observar com base nos avaliadores da qualidade de ajuste (Tabela 4.6) que todos os modelos ajustados foram adequados para descrever a perda de nitrogênio, por volatilização de amônia.

Na Tabela 4.6 temos a avaliação da qualidade de ajuste realizada para os modelos apropriados, ou seja, os quais tiveram os pressupostos atendidos, conforme análise de resíduos (Tabela 4.4). Desta forma, serão apresentadas as perdas acumuladas de nitrogênio e as curvas ajustadas dessas perdas, em função dos dias após a segunda adubação, para cada tratamento (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Representação gráfica das perdas acumuladas de nitrogênio e ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, em função dos dias após a segunda adubação, para os fertilizantes nitrogenados aplicados.



Fonte: Do Autor (2021)

Observando a Figura 4.4, representação gráfica das perdas acumuladas de nitrogênio e ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, em função dos dias após a segunda adubação, para os fertilizantes nitrogenados aplicados, comparamos, identificamos e destacamos alguns aspectos, entre os quais estão:

Pelo fato, de que, as menores estimativas do DPR e DMA, além, do maior coeficiente de determinação ajustado foram obtidos com o ajuste do modelo Logístico, este modelo pareceu ser o mais razoável para o ajuste dos dados das perdas acumuladas, após aplicação da Ureia perolada. Para a curva ajustada as perdas acumuladas após aplicação do fertilizante Sulfato de amônio verifica-se que todos os modelos se ajustaram igualmente, o que foi demonstrado pelos valores dos avaliadores de qualidade de ajuste.

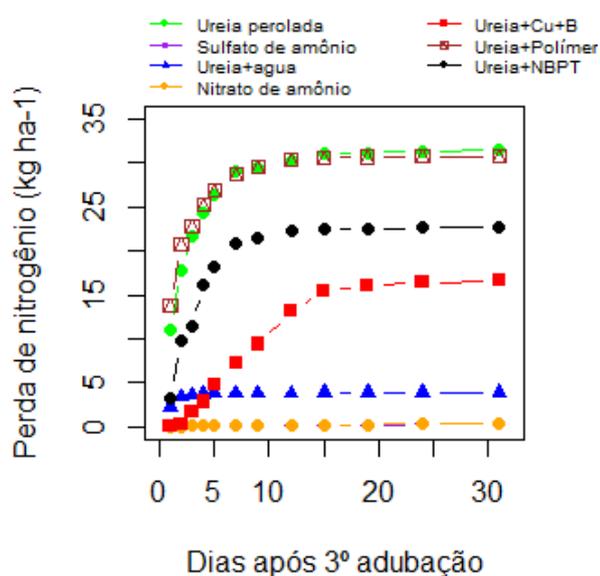
Já para o ajuste dos dados das perdas acumuladas, após aplicação da Ureia + NBPT, o ajuste do modelo von Bertalanffy mostrou-se mais adequado neste caso.

De acordo com os modelos ajustados e sabendo que foram aplicados 100 Kg de N por hectare, a volatilização média máxima de amônia diminuiu da seguinte forma: Ureia perolada ($13,97 \text{ kg N ha}^{-1}$), Ureia + NBPT ($6,37 \text{ kg N ha}^{-1}$), Ureia água ($2,45 \text{ kg N ha}^{-1}$) e Sulfato de amônio ($0,06 \text{ kg N ha}^{-1}$). A aplicação dos fertilizantes Ureia + água e Sulfato de amônio contribuíram para minimizar as perdas de nitrogênio na forma de amônia ($N - NH_3$), com diminuição percentual de 82,7 e 99,5%, respectivamente, em comparação com a perda alcançada pelo uso da Ureia perolada.

4.3 Terceira adubação

A Figura 4.5 apresenta a descrição da perda acumulada de N por volatilização de NH_3 . O padrão permanece semelhante ao observado nas primeiras adubações, sendo que o Nitrato e Sulfato de amônio continuam contribuindo para as menores perdas acumuladas de amônia, enquanto os demais fertilizantes promovem as maiores perdas.

Figura 4.5 – Representação gráfica da volatilização de amônia acumulada após a terceira adubação nitrogenada do ano safra 2015/2016.



Fonte: Dados do autor (2021)

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados da análise de resíduos dos ajustes dos modelos em estudo.

Tabela 4.7 – Valor-p para os testes Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e Breusch-Pagan aplicados aos resíduos dos modelos ajustados.

Tratamento	Modelo	valor-p		
		Normalidade	Independência	Homocedasticidade
Ureia perolada	Logístico	0,002 ¹	0,034	0,009 ¹
	Gompertz	0,004 ¹	0,058	0,033
	von Bertalanffy	0,006 ¹	0,064	0,085
	Brody	0,056	0,104	0,748
Sulfato de amônio	Logístico	0,348	0,624	0,701
	Gompertz	0,306	0,580	0,745
	von Bertalanffy	0,322	0,522	0,735
	Brody	0,283	0,494	0,662
Ureia + água	Logístico	0,751	0,168	0,010
	Gompertz	0,728	0,144	0,011
	von Bertalanffy	0,696	0,146	0,012
	Brody	0,587	0,112	0,014
Nitrato de amônio	Logístico	0,123	0,602	0,025
	Gompertz	0,470	0,880	0,059
	von Bertalanffy	0,621	0,860	0,080
	Brody	0,819	0,420	0,264
Ureia + Cu + B	Logístico	0,291	0,022	0,135
	Gompertz	0,745	0,278	0,383
	von Bertalanffy	0,809	0,322	0,182
	Brody	0,007 ¹	0,000 ¹	0,483
Ureia + polímero aniônico	Logístico	0,000 ¹	0,422	0,017
	Gompertz	0,000 ¹	0,632	0,038
	von Bertalanffy	0,000 ¹	0,764	0,052
	Brody	0,000 ¹	0,928	0,100
Ureia+NBPT	Logístico	0,249	0,528	0,008 ¹
	Gompertz	0,038	0,052	0,013
	von Bertalanffy	0,030	0,024	0,033
	Brody	0,000 ¹	0,388	0,145

¹significativo ao nível de 1%.

Fonte: Do Autor (2021)

Observando os resultados apresentados na Tabela 4.7 vemos que para os modelos ajustados aos dados coletados para o tratamento Ureia + polímero aniônico tiveram o pressuposto de normalidade não atendido, além, dos modelos Logístico, Gompertz e vom Bertalanffy ajustados aos dados do tratamento Ureia perolada; o modelo Brody nos tratamentos Ureia + Cu + B e Ureia + NBPT que também não tiveram a normalidade atendida. A independência dos resíduos não foi atendida no modelo Brody ajustado aos dados do tratamento Ureia + Cu + B. Enquanto a homocedasticidade dos resíduos não foi verificada no modelo Logístico ajustado aos dados do tratamento Ureia perolada e Ureia + NBPT. Para os demais tratamentos e modelos ajustados os pressupostos da análise de resíduos foram atendidos, sob um nível de significância de 1%.

Na Tabela 4.8 são apresentadas as estimativas dos parâmetros, com base no ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, para os dados das perdas acumuladas de nitrogênio, pela volatilização de NH_3 , para os tratamentos Ureia perolada, Sulfato de amônia, Ureia + água, Nitrato de amônia, Ureia + Cu + B e Ureia + NBPT.

Tabela 4.8 – Estimativas para os parâmetros dos modelos ajustados, Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.

Tratamento	Modelo	Estimativas		
		α	β	κ
Ureia perolada	Logístico	-	-	-
	Gompertz	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-
	Brody	31,086	0,873	0,348
Sulfato de amônio	Logístico	0,307	6,520	0,085
	Gompertz	0,336	1,961	0,055
	von Bertalanffy	0,353	0,322	0,045
	Brody	0,418	0,740	0,025
Ureia + água	Logístico	3,810	0,605	1,161
	Gompertz	3,814	0,317	1,020
	von Bertalanffy	3,816	0,408	0,975
	Brody	3,819	0,969	0,890
Nitrato de amônio	Logístico	0,264	6,500	0,460
	Gompertz	0,270	5,074	0,287
	von Bertalanffy	0,273	0,963	0,244
	Brody	0,287	1,153	0,137
Ureia + Cu + B	Logístico	16,520	8,178	0,364
	Gompertz	16,797	6,460	0,249
	von Bertalanffy	16,936	1,096	0,213
	Brody	-	-	-
Ureia + polímero aniônico	Logístico	-	-	-
	Gompertz	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-
	Brody	-	-	-
Ureia+NBPT	Logístico	22,377	2,879	0,698
	Gompertz	22,471	2,058	0,529
	von Bertalanffy	22,513	0,737	0,475
	Brody	-	-	-

Fonte: Do Autor (2021)

Através da Tabela 4.8 verifica-se a significância dos valores estimados da perda acumulada assintótica máxima (α) para todos os fertilizantes nitrogenados. Logo, em todos os modelos ajustados (Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody) as estimativas para α tornam-se confiáveis, pois sabe-se que os valores máximo observados, quanto as perdas de N, foram 31,45; 0,41; 3,89; 0,28; 16,97 e 22,64 Kg/ha^{-1} , respectivamente, para cada um destes fertilizantes: Ureia perolada, Sulfato de amônio, Ureia + água, Nitrato de amônio, Ureia + Cu + B e Ureia + NBPT.

Os valores observados representam as maiores perdas, em relação as demais adubações, para os tratamentos Ureia perolada, Nitrato de amônio, Ureia + Cu + B e Ureia + NBPT. Vejamos na Figura 3.3 que nesta terceira adubação, para o período, foi o que ocorreu a menor quantidade de precipitação após aplicação. Portanto, corrobora com a hipótese de que a chuva diminui as perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia, segundo Dominghetti (2016) e Souza et al. (2017).

Para o parâmetro β observa-se que, em quase todos os tratamentos, as estimativas do ponto de inflexão foram baixas, em todos os quatro modelos, ou seja, a perda, vertiginosa, de fertilizante nitrogenado ocorreu no intervalo de três dias após a adubação, conforme também observado por Chagas et al. (2019) e Souza et al. (2018). Ao passo, em que, as perdas mais tardias, identificadas pela estimativa do ponto de inflexão, a qual é maior, foram observadas nos tratamentos: Sulfato de amônio, Nitrato de amônio e Ureia + Cu + B, ajustadas pelo modelo Logístico, além, dos tratamentos Nitrato de amônio e Ureia + Cu + B, ajustadas pelo modelo Gompertz.

Quanto às estimativas da velocidade de volatilização (κ) verificou-se que, de forma geral, os valores encontrados são baixos, porém, para o tratamento Ureia + água os valores encontrados ajudam a explicar a volatilização de amônia, além do próprio blend.

Na Tabela 4.9, observa-se as medidas dos avaliadores de qualidade de ajuste: coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), critério de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o desvio médio absoluto (DMA), para os modelos que tiveram os pressupostos atendidos.

Tabela 4.9 – Avaliadores da qualidade de ajuste, coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), critério de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o desvio médio absoluto (DMA), dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody.

Tratamento	Modelo	R ² aj	AIC	DPR	DMA
Ureia perolada	Logístico	-	-	-	-
	Gompertz	-	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-	-
	Brody	0,994	13,072	0,423	0,286
Sulfato de amônio	Logístico	0,974	-76,981	0,008	0,005
	Gompertz	0,972	-76,197	0,008	0,006
	von Bertalanffy	0,971	-75,876	0,008	0,006
	Brody	0,969	-75,148	0,008	0,006
Ureia + água	Logístico	0,926	-19,098	0,094	0,069
	Gompertz	0,938	-20,959	0,087	0,063
	von Bertalanffy	0,942	-21,648	0,084	0,061
	Brody	0,949	-23,139	0,079	0,057
Nitrato de amônio	Logístico	0,886	-41,835	0,030	0,022
	Gompertz	0,883	-41,276	0,033	0,021
	von Bertalanffy	0,882	-40,836	0,034	0,021
	Brody	0,835	-38,473	0,040	0,026
Ureia + Cu + B	Logístico	0,997	15,283	0,673	0,424
	Gompertz	0,993	26,327	0,427	0,299
	von Bertalanffy	0,990	31,654	0,444	0,299
	Brody	-	-	-	-
Ureia + polímero aniônico	Logístico	-	-	-	-
	Gompertz	-	-	-	-
	von Bertalanffy	-	-	-	-
	Brody	-	-	-	-
Ureia+NBPT	Logístico	0,981	23,931	0,887	0,517
	Gompertz	0,991	14,720	0,714	0,392
	von Bertalanffy	0,993	11,881	0,666	0,350
	Brody	-	-	-	-

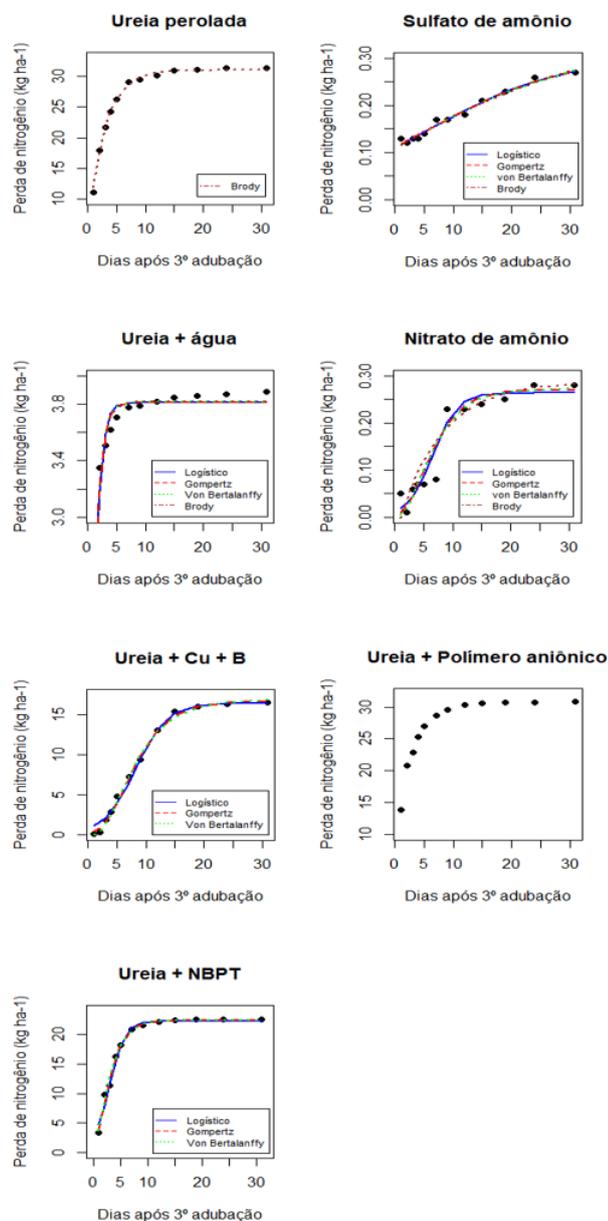
Fonte: Do Autor (2021)

Observando a Figura 4.6, representação gráfica das perdas acumuladas de nitrogênio e ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, em função dos dias após a terceira adubação, para os fertilizantes nitrogenados aplicados, comparamos, identificamos e destacamos alguns aspectos, entre os quais estão:

O modelo Brody foi o único que se ajustou aos dados das perdas acumuladas após aplicação da Ureia perolada. Para a curva ajustada as perdas acumuladas após aplicação do fertilizante Sulfato de amônio, verifica-se que todos os modelos se ajustaram igualmente, assim, demonstrado pelos valores dos avaliadores de qualidade de ajuste.

Na representação gráfica, dado que, as menores estimativas do DPR e DMA, além, do maior coeficiente de determinação ajustado foram obtidos com o ajuste do modelo Brody, sugere-se que este modelo satisfaz o ajuste dos dados das perdas acumuladas após aplicação da Ureia + água. Observamos que todos os modelos se mostraram adequados para ajustar os

Figura 4.6 – Representação gráfica das perdas acumuladas de nitrogênio e ajuste dos modelos Logístico, Gompertz, von Bertalanffy e Brody, em função dos dias após a terceira adubação, para os fertilizantes nitrogenados aplicados.



Fonte: Do Autor (2021)

dados das perdas acumuladas quanto aplicação do fertilizante Nitrato de amônio, dado existir uma similaridade entre os resultados dos avaliadores de qualidade de ajuste.

Excetuando o modelo Brody, pois este não atendeu aos pressupostos, todos os demais modelos se mostraram adequados para ajustar os dados das perdas acumuladas quanto aplicação do fertilizante Ureia + Cu + B, dado existir uma similaridade entre os resultados dos avaliadores de qualidade de ajuste. Para o ajuste representativo após aplicação do fertilizante Ureia + po-

límero aniônico não tivemos nenhum modelo que se ajustou aos dados das perdas acumuladas de nitrogenado.

Já para o ajuste dos dados das perdas acumuladas, após aplicação da Ureia + NBPT, o ajuste do modelo von Bertalanffy mostrou-se mais adequado, dada as menores estimativas do critério de informação de Akaike, DPR e DMA, além, do maior coeficiente de determinação ajustado.

De acordo com os modelos ajustados (Tabela 4.8) e sabendo que foram aplicados 100 Kg de N por hectare, a volatilização média máxima de amônia diminuiu da seguinte forma: Ureia perolada ($31,08 \text{ kg N ha}^{-1}$), Ureia + NBPT ($22,47 \text{ kg N ha}^{-1}$), Ureia + Cu + B ($16,79 \text{ kg N ha}^{-1}$), Ureia + água ($3,81 \text{ kg N ha}^{-1}$), Sulfato de amônio ($0,35 \text{ kg N ha}^{-1}$) e Nitrato de amônio ($0,27 \text{ kg N ha}^{-1}$). Os tratamentos Ureia + água, Sulfato de amônio e Nitrato de amônio favoreceram alcançar as menores perdas de nitrogênio na forma de amônia ($N - NH_3$) em 87,7, 99,0 e 99,3%, respectivamente, em comparação com a perda promovida pela Ureia perolada.

4.4 Considerações gerais

Os fertilizantes nitrogenados convencionais, Nitrato e Sulfato de amônio, deram boa resposta quanto a minimização da perda de nitrogênio, por volatilização de amônia, após as três adubações. Já o uso da ureia revestida, com polímero ou resina, como um fertilizante de liberação controlada pode diminuir a volatilização e sincronizar a liberação de nutrientes de acordo com a demanda da cultura, melhorando assim a eficiência do uso de nitrogênio (MINATO et al., 2020; GUELFY, 2017). Porém, este comportamento não foi observado no tratamento Ureia + polímero aniônico, diferentemente do que ocorreu com os tratamentos Ureia + Cu + B e Ureia + NBPT (fertilizantes nitrogenados estabilizados), onde a ureia tratada com estes aditivos colaborou para reduzir as perdas de N.

Observamos na Tabela 4.10, dada as estimativas de α , que na segunda adubação ocorreram as menores perdas de nitrogênio entre todos os fertilizantes, a este fato, associa-se a precipitação ocorrida após esta adubação. O volume expressivo de chuvas no início do segundo período (Figura 3.3) favoreceu a absorção deste nutriente pelas plantas, pois as perdas foram significativamente menores em todos os fertilizantes, nos quais foi possível esta comparação, indicando serem influenciados pela chuva, conforme também observado por Chagas (2017).

Tabela 4.10 – Estimativas de α por adubação.

Tratamento	Modelo	Estimativas de α^1 / adubação		
		1 ^a	2 ^a	3 ^a
Ureia perolada	Logístico	-	13,970	-
	Gompertz	23,746	13,980	-
	von Bertalanffy	23,775	-	-
	Brody	23,837	-	31,086
Sulfato de amônio	Logístico	0,575	0,058	0,307
	Gompertz	0,578	0,061	0,336
	von Bertalanffy	0,580	0,062	0,353
	Brody	0,583	0,066	0,418
Ureia + água	Logístico	-	2,450	3,810
	Gompertz	7,251	2,450	3,814
	von Bertalanffy	7,251	2,450	3,816
	Brody	7,252	2,451	3,819
Nitrato de amônio	Logístico	0,262	-	0,264
	Gompertz	0,267	-	0,270
	von Bertalanffy	0,269	-	0,273
	Brody	0,276	-	0,287
Ureia + Cu + B	Logístico	3,497	-	16,520
	Gompertz	3,545	-	16,797
	von Bertalanffy	3,571	-	16,936
	Brody	3,651	-	-
Ureia + polímero aniônico	Logístico	22,677	-	-
	Gompertz	-	-	-
	von Bertalanffy	22,741	-	-
	Brody	22,787	-	-
Ureia+NBPT	Logístico	10,005	-	22,377
	Gompertz	10,097	-	22,471
	von Bertalanffy	10,139	6,371	22,513
	Brody	10,246	-	-

¹kg ha⁻¹N – NH₃

Fonte: Do Autor (2021)

A partir dos parâmetros estimados para o modelo Logístico, Minato et al. (2020) aplicaram a equação $MDL = \kappa * (\alpha/4)$, sendo α o valor assintótico e κ o índice relativo, usada para obter a perda máxima diária (MDL-Maximum Daily Loss) de nitrogênio na forma de amônia ($N - NH_3$). Este valor representa o quanto de N foi perdido no dia do ponto de inflexão, cuja estimativa é obtida pelo parâmetro β do modelo. Assim, aplicando esta regra, temos a perda máxima diária para os três parcelamentos, apresentada na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Perdas diárias máximas de $N - NH_3$ (MDL).

Tratamento	Primeira			Adubação Segunda			Terceira		
	α^1	κ	MDL ²	α^1	κ	MDL ²	α^1	κ	MDL ²
Ureia perolada	-	-	-	13,970	1,264	4,415	-	-	-
Sulfato de amônio	0,575	0,212	0,030	0,058	0,155	0,002	0,307	0,085	0,007
Ureia + água	-	-	-	2,450	0,243	0,149	3,810	1,161	1,106
Nitrato de amônio	0,262	0,242	0,016	-	-	-	0,264	0,460	0,030
Ureia + Cu + B	3,497	0,344	0,301	-	-	-	16,520	0,364	1,503
Ureia + polímero aniônico	22,667	2,430	13,770	-	-	-	-	-	-
Ureia+NBPT	10,005	0,379	0,948	-	-	-	22,377	0,698	3,905

Nota: ¹kg ha⁻¹N - NH₃; ²kg ha⁻¹ dia N - NH₃.

Fonte: Do Autor (2021)

Para os resultados evidenciados na Tabela 4.11, aplicada a equação $MDL = \kappa * (\alpha/4)$, avaliamos que a dinâmica da perda diária máxima de nitrogênio reflete a perda de N observada nas três adubações, dado os tratamentos Sulfato e Nitrato de amônio apresentarem as menores perdas, enquanto os tratamentos Ureia perolada e Ureia + polímero aniônico as maiores perdas.

Minato et al. (2020) afirmam que a dissolução do fertilizante oferece condições favoráveis para a volatilização, desta forma, segundo Vale, Sousa e Scivittaro (2014) o aumento na atividade da enzima urease implica na volatilização de nitrogênio na forma de amônia, que acumulada, pode ser observada pelo modelo sigmoidal. Após atingir a perda máxima (estimada pelo parâmetro α), o fluxo de volatilização de NH_3 diminuiu ao longo do tempo devido à redução gradual do pH e à estabilização do N (MINATO et al., 2020).

A Tabela 4.12 exhibe os modelos mais adequados por tratamento e parcela da adubação.

Tabela 4.12 – Comparação dos modelos entre tratamentos por adubação.

Tratamento	Adubação		
	Primeira	Segunda	Terceira
Ureia perolada	Brody	Logístico	Brody
Sulfato de amônio	Todos	Todos	Todos
Ureia + água	Brody	Todos	Brody
Nitrato de amônio	Todos	Nenhum	Todos
Ureia + Cu + B	von Bertalanffy	Nenhum	Gompertz
Ureia + polímero aniônico	Brody	Nenhum	Nenhum
Ureia+NBPT	Logístico	von Bertalanffy	von Bertalanffy

Fonte: Do Autor (2021)

Percebemos entre os modelos indicados o que mais aparece é o Brody, sugerindo que as maiores perdas de N acontecem logo nos primeiros dias, após aplicação do fertilizante, conforme corroborado por Chagas et al. (2019), Bartelega (2018), Freitas (2017), Dominghetti et al. (2016).

A partir da mensuração do quantitativo da perda de nitrogênio por hectare, estimada nas três adubações, com utilização da regressão não linear, habilita-se a possibilidade de realizar o planejamento operacional alinhado ao financeiro, uma vez que o aumento na eficiência da adubação e a minimização dos custos de produção são boas práticas para garantir a sustentabilidade do negócio. Esta, fomentada pelas tecnologias para fertilizantes, com capacidade de poderem reduzir as perdas de nitrogênio, além do próprio custo, que de modo geral, varia em função das matérias-primas, tecnologias de produção e logística de distribuição, visto que os preços aumentam progressivamente na seguinte ordem: convencionais, estabilizados, blends e de liberação lenta, até os fertilizantes de liberação controlada (GUELF, 2017). Dessa forma, sugere-se que, apropriando-se destas informações técnicas, permitirá ao cafeicultor ter outro viés de avaliação com o propósito de alcançar o melhor custo/benefício produtivo e ambiental.

5 CONCLUSÃO

O modelo Brody apresentou os melhores ajustes para descrever as perdas acumuladas de nitrogênio, por volatilização de amônia, em relação aos sete tratamentos aplicados e avaliados.

Com base nas estimativas do parâmetro α verificamos que os fertilizantes Nitrato e Sulfato de amônio apresentaram as menores perdas de nitrogênio, ao passo que Ureia perolada e Ureia + polímero aniônico contribuem com as maiores perdas de nitrogênio, ao longo das três adubações no cafeeiro.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, A. d.; MATTIAZZO, M. Lixiviação de íons inorgânicos em solos repetidamente tratados com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 24, n. 4, p. 927–938, 2000.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant physiology**, American Society of Plant Biologists, v. 14, n. 2, p. 371, 1939.
- AZEVEDO, A. M. et al. Agrupamento multivariado de curvas na desidratação em raízes de batata-doce. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 3, 2018.
- BARROS, N. F. de; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. de. Fertilidade de solos, nutrientes e produção florestal. 2005.
- BARTELEGA, L. Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta, controlada e blends para o cafeeiro. Universidade Federal de Lavras, 2018.
- BOUGUYON, E.; GOJON, A.; NACRY, P. Nitrate sensing and signaling in plants. In: ELSEVIER. **Seminars in cell & developmental biology**. [S.l.], 2012. v. 23, n. 6, p. 648–654.
- CABEZAS, A. L. et al. Calibration of a semi-open static collector for determination of ammonia volatilization from nitrogen fertilizers. **Communications in soil science and plant analysis**, Taylor & Francis, v. 30, n. 3-4, p. 389–406, 1999.
- CABEZAS, W.; KORNDORFER, G.; MOTTA, S. Volatilização de n-nh₃ na cultura de milho: I. efeito da irrigação e substituição parcial da ureia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 21, p. 481–487, 1997.
- CABEZAS, W.; KORNDORFER, G.; MOTTA, S. Volatilização de n-nh₃ na cultura de milho:: II. avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, SciELO Brasil, v. 21, n. 3, p. 489–496, 1997.
- CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. Nitrogênio e enxofre. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes. Piracicaba: IPNI-Brasil**, p. 5–46, 2010.
- CARVALHO, J. d. et al. Sintomas de desordens nutricionais em cafeeiro. **Semiologia do Cafeeiro: Sintomas de desordens nutricionais, fitossanitária e fisiológicas**. Lavras MG, p. 30–66, 2010.
- CECAFÉ. História do café. 2021. Acesso em 30 março 2021. Disponível em: <<https://www.cecafe.com.br/sobre-o-cafe/historia-do-cafe/>>.
- CHAGAS, W. F. T. Tecnologias de fertilizantes nitrogenados na cafeicultura. Universidade Federal de Lavras, 2017.
- CHAGAS, W. F. T. et al. Volatilização de amônia de blends com ureia estabilizada e de liberação controlada no cafeeiro. **Ciência e Agrotecnologia**, SciELO Brasil, v. 40, n. 5, p. 497–509, 2016.
- CHAGAS, W. F. T. et al. Nitrogen fertilizers technologies for coffee plants. **Coffee Science, Lavras**, v. 14, n. 1, p. 55–66, 2019.

- COSTA, R. A. et al. Produtividade e renda do cafeeiro submetido à aplicação de fertilizantes minerais e aminoácidos via foliar. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, 2013.
- DOMINGHETTI, A. W. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e convencionais na cultura do cafeeiro. Universidade Federal de Lavras, 2016.
- DOMINGHETTI, A. W. et al. Nitrogen loss by volatilization of nitrogen fertilizers applied to coffee orchard. **Ciência e Agrotecnologia**, SciELO Brasil, v. 40, n. 2, p. 173–183, 2016.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. v. 326.
- FERNANDES, T. J. et al. < b> parameterization effects in nonlinear models to describe growth curves. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 37, n. 4, p. 397–402, 2015.
- FERNANDES, T. J. et al. Seleção de modelos não lineares para a descrição das curvas de crescimento do fruto do cafeeiro. Editora UFLA, 2014.
- FREITAS, A. R. et al. Estimacão de perdas acumuladas de nutrientes em pastagens por meio da funo logística. In: IN: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 37., 2000, VIÇOSA . . . **Embrapa Pecuária Sudeste-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. [S.l.], 2000.
- FREITAS, T. Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberao lenta ou controlada na cultura do cafeeiro: eficiência e custos. Universidade Federal de Lavras, 2017.
- FRÜHAUF, A. C. et al. Nonlinear models in the study of the cedar diametric growth in a seasonally dry tropical forest. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 1–8, 2020.
- GUELFY, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberao lenta ou controlada. **Informaes Agronmicas**, v. 157, p. 1–14, 2017.
- GUIMARÃES, P.; REIS, T. Nutrio e adubao do cafeeiro. **Café Arábica: do plantio  colheita**. Lavras, Epamig, p. 343–414, 2010.
- JANE, S. A. et al. Adjusting the growth curve of sugarcane varieties using nonlinear models. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 50, n. 3, 2020.
- LAVIOLA, B. G. et al. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: cálcio, magnésio e enxofre. **Revista brasileira de ciência do solo**, SciELO Brasil, v. 31, n. 6, p. 1451–1462, 2007.
- LIMA, L. C. d. et al. Crescimento e produtividade do cafeeiro irrigado, em funo de diferentes fontes de nitrogênio. Editora UFLA, 2016.
- MALAVOLTA, E. Nutrio, adubao e calagem para o cafeeiro. **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**, Potafos Piracicaba, p. 165–275, 1986.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.; OLIVEIRA, A. **Avaliao do estado nutricional de plantas: Princípios e aplicaes**, Potafs, Piracicaba. 1997.
- MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J. A. Algumas consideraes em regressão não linear. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 24, p. 1761–1770, 2002.

- MEISINGER, J. J.; CALDERON, F.; JENKINSON, D. Soil nitrogen budgets. **Nitrogen in agricultural systems**, Wiley Online Library, v. 49, p. 505–562, 2008.
- MENDONÇA, R. et al. Abordagem sobre a bienalidade de produção em plantas de café. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, 2011.
- MINATO, E. A. et al. Controlled-release nitrogen fertilizers: characterization, ammonia volatilization, and effects on second-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 44, 2020.
- MISCHAN, M. M.; PINHO, S. d. Modelos não lineares: funções assintóticas de crescimento. **São Paulo: Cultura Acadêmica**, 2014.
- MORAIS, H. et al. Escala fenológica detalhada da fase reprodutiva de coffeea arabica. **Bragantia**, SciELO Brasil, v. 67, n. 1, p. 257–260, 2008.
- MOTULSKY, H.; CHRISTOPOULOS, A. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression: a practical guide to curve fitting. graphpad software. **Inc., San Diego, CA**, 2003.
- PÁDUA, F. R. M. d. Composição e qualidade de diferentes tipos de café torrado e moído durante o armazenamento. Universidade Federal de Lavras, 2002.
- PEREIRA, A. A. et al. Modelagem do diâmetro de copa do cafeeiro podado cultivado em diferentes densidades e regimes hídricos. Editora UFLA, 2016.
- PEREIRA, S. P. et al. Crescimento, produtividade e bienalidade do cafeeiro em função do espaçamento de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, SciELO Brasil, v. 46, n. 2, p. 152–160, 2011.
- R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. *Revista Ceres*, 2003.
- REIS, P. R. **Café arábica: do plantio à colheita**. [S.l.]: Epamig, 2010.
- REYNOLDS, C.; WOLF, D. Effect of soil moisture and air relative humidity on ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil science**, LWW, v. 143, n. 2, p. 144–152, 1987.
- RODRIGUES, J. d. O. et al. Volatilização de amônia de ureias protegidas na cultura do cafeeiro conilon. **Coffee Science, Lavras**, v. 11, n. 4, p. 530–537, 2016.
- SAMPAIO, A. d.; GRANER, E.; JUNIOR, C. G. Em manual do cafeicultor. **Manual do Cafeicultor**, 1967.
- SANTOS, A. L. P. dos et al. Estudos comparativo de três diferentes modelos não lineares para a característica ganho de peso em bovinos de corte, da raça nelore comparative study of three different nonlinear models for the characteristic weight gain in beef cattle of the nellore. 2018.
- SANZONOWICZ, C. et al. Adubação nitrogenada em café decotado num latossolo de cerrado. Embrapa Cerrados, 2003.

- SEBER, G.; WILD, C. Nonlinear regression john wiley & sons. **New York**, 1989.
- SEBER, G. A.; WILD, C. J. Nonlinear regression. hoboken. **New Jersey: John Wiley & Sons**, 2003.
- SILVA, É. M. Modelos de regressão na descrição do crescimento de frutos de amora preta. Universidade Federal de Lavras, 2018.
- SILVA, E. M. et al. Description of the carbon mineralization of swine manure and oat straw in the soil through nonlinear models. **Revista Agrogeoambiental**, v. 11, n. 2, p. 71–86, 2019.
- SILVA, É. M. d. et al. Avaliação dos pontos críticos do modelo não linear mais adequado no ajuste aos dados de crescimento de frutos de coqueiro-anão-verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, SciELO Brasil, v. 43, n. 1, 2021.
- SILVA, F. M. d. et al. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em ijaci, minas gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, SciELO Brasil, v. 34, n. 3, p. 625–632, 2010.
- SILVA, W. S. et al. Eucalyptus grandis x eucalyptus urophylla growth curve in different site classifications, considering residual autocorrelation. **REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA**, v. 39, n. 1, p. 122–138, 2021.
- SILVEIRA, F. G. d. et al. Análise de agrupamento na seleção de modelos de regressão não-lineares para curvas de crescimento de ovinos cruzados. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 41, n. 4, p. 692–698, 2011.
- SOLER-GUILHEN, J. H. et al. Euterpe edulis seed germination parameters and genotype selection. **Acta Scientiarum. Agronomy**, SciELO Brasil, v. 42, 2020.
- SOUZA, J. A. et al. Nitrogen dynamics in a latosol cultivated with coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 22, n. 6, p. 390–395, 2018.
- SOUZA, T. L. d. et al. Ammonia and carbon dioxide emissions by stabilized conventional nitrogen fertilizers and controlled release in corn crop. **Ciência e Agrotecnologia**, SciELO Brasil, v. 41, p. 494–510, 2017.
- VALE, M. L. C. d.; SOUSA, R. O. d.; SCIVITTARO, W. B. Evaluation of ammonia volatilization losses by adjusted parameters of a logistic function. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 38, n. 1, p. 223–231, 2014.