

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E  
AMBIENTAIS

CRESCIMENTO, ESTADO NUTRICIONAL E FOTOSSÍNTESE DE *Cedrela odorata*  
L. ADUBADA COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE NITRATO E AMÔNIO

SULIANNE IDALIOR PAIÃO ROSADO

MANAUS - AM

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E  
AMBIENTAIS

SULIANNE IDALIOR PAIÃO ROSADO

CRESCIMENTO, ESTADO NUTRICIONAL E FOTOSSÍNTESE DE *Cedrela odorata*  
L. ADUBADA COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE NITRATO E AMÔNIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais da Faculdade de Ciências Agrárias - UFAM, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências Florestais e Ambientais, área de concentração Silvicultura Tropical.

**Orientador:** Prof. Dr. José Zilton Lopes Santos

MANAUS – AM

2017

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

R788c Rosado, Sulianne Idalior Paião  
Crescimento, estado nutricional e fotossíntese de Cedrela odorata  
L. adubada com diferentes proporções de nitrato e amônio /  
Sulianne Idalior Paião Rosado. 2017  
40 f.: il.; 31 cm.

Orientador: José Zilton Lopes Santos  
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) -  
Universidade Federal do Amazonas.

1. Cedro. 2. Estresse mineral. 3. Formas de N. 4. Nitrogênio. I.  
Santos, José Zilton Lopes II. Universidade Federal do Amazonas III.  
Título



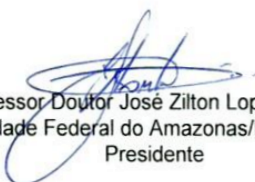
Poder Executivo  
Ministério da Educação  
Universidade Federal do Amazonas  
Faculdade de Ciências Agrárias  
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais e Ambientais - PPGCIFA





## PARECER

Defesa nº 186

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, da Faculdade de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Amazonas, após arguir da mestranda **SULIANNE IDALIOR PAIÃO ROSADO**, em relação ao seu trabalho de dissertação intitulada "**CRESCIMENTO, ESTADO NUTRICIONAL E FOTOSÍNTESE EM *Cedrela odorata* ADUBADA COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE NITRATO E AMÔNIO**", é de parecer favorável à aprovação da mestranda habilitando-a ao título de Mestre "*Magister Scientiae*" em Ciências Florestais e Ambientais, na área de concentração em **CIÊNCIAS FLORESTAIS E AMBIENTAIS (CIFA)**.

  
Professor Doutor José Zilton Lopes Santos  
Universidade Federal do Amazonas/FCA/PPGCIFA  
Presidente

  
Professora Doutora Narrúbia Oliveira de Almeida  
Universidade Federal do Amazonas/FCA/DCF  
Primeira Examinadora

  
Professor Doutor Ari de Freitas Hidalgo  
Universidade Federal do Amazonas/FCA/DPAV  
Segundo Examinador

Manaus, 06 de Março de 2017.





Prof. Dr. Marciel José Ferreira  
Coordenador do Programa de Pós Graduação em  
Ciências Florestais e Ambientais - PPG-CIFA

## **Agradecimentos**

À Deus, o alicerce da minha vida.

Ao meu marido, Luan Samarone, pela paciência, apoio e atenção que dedicou para me incentivar na execução de cada passo deste projeto.

A minha família amada, Luzia, Vander, Manuel, Suanne e Andrea, que sempre esteve presente, me dando o apoio necessário e incentivando a realização dessa dissertação.

As amigas Jennifer e Giselle, pelo privilégio da amizade, companheirismo e pela ajuda em todas as etapas deste mestrado, nos momentos de desânimo, descontração, nos desafios e coragem para seguir em frente.

Ao professor Dr. José Zilton Lopes Santos pela orientação, por todo conhecimento e experiência transferida a mim durante a produção desse estudo, e pelo apoio e confiança.

Aos professores Dr. Afrânio Ferreira Neves Junior e Dr. Marciel José Ferreira, por disponibilizar seus laboratórios e equipamentos para realização das análises.

Ao professor Dr. Alberto Carlos Martins Pinto por ceder seu laboratório para o desenvolvimento deste trabalho, pelas sugestões e amizade.

A equipe de Nutrição Mineral de Plantas (UFAM): Nonato, Tainah, Weliton e Raimundo Leite pelo apoio e em especial ao Ives pela ajuda fundamental em diversas etapas na execução deste projeto.

Aos colegas do Laboratório de Silvicultura (UFAM): Victor e Rafael.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais (PPG-CIFA) pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Obrigada a todos que, direto ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta etapa.

## RESUMO

Nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{N-NH}_4^+$ ) são as principais formas de nitrogênio (N) absorvidas pelas plantas e podem afetar de forma diferenciada o estado nutricional, crescimento e aspectos fotossintéticos de diferentes espécies. Nós testamos se diferentes proporções de  $\text{N-NO}_3^-:\text{N-NH}_4^+$  influenciam os parâmetros nutricionais, fotossintéticos e de crescimento em mudas de *Cedrela odorata*. Observamos que a espécie é responsiva a nutrição de nitrogênio, no entanto, é pouco influenciada pelas proporções das formas testadas. O uso da proporção 40% de  $\text{N-NO}_3^-$  e 60% de  $\text{N-NH}_4^+$  demonstra ter um efeito apenas benéfico ou bioestimulante na espécie, pois os parâmetros nutricionais, fotossintéticos e de crescimento são apenas levemente influenciados pelas formas de N. Concluimos que a espécie requer N na fase inicial de cultivo, podendo ser tanto na forma de  $\text{NO}_3^-$  quanto  $\text{NH}_4^+$ . Estas descobertas foram confirmadas quando mudas de *Cedrela odorata* foram cultivadas por 150 dias em casa de vegetação, sob o efeito de  $200 \text{ mg dm}^{-3}$ , em seis diferentes proporções de  $\text{N-NO}_3^-:\text{N-NH}_4^+$  (100:0; 80:20; 60:40; 40:60; 20:80 e 0:100%, respectivamente), mais um tratamento controle, sem o fornecimento de N.

**Palavras chave:** Cedro, estresse mineral, formas de N.

## ABSTRACT

Nitrate (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) and ammonium (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) are the main forms of nitrogen (N) absorbed by plants and that can affect differently the nutritional status, growth and photosynthetic aspects of different species. We tested whether different proportions of N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> influence the nutritional, photosynthetic and growth parameters in *Cedrela odorata* seedlings. We observed that this specie is responsive to nitrogen nutrition; however, it is little influenced by the proportions of the tested forms. The use of the proportion of 40% N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and 60% N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> demonstrates a beneficial or biostimulating effect on the species, since the nutritional, photosynthetic and growth parameters are only slightly influenced by the forms of N. We conclude that this specie requires N in the initial phase of cultivation, and that can be provided either as ammonium or nitrate. These findings were confirmed when seedlings of *Cedrela odorata* were cultivated for 150 days in the greenhouse, under the effect of 200 mg dm<sup>-3</sup>, using six different proportions of N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (100: 0, 80: 20, 60:40, 40:60, 20:80 and 0: 100%, respectively), plus a control treatment without the supply of N.

**Keywords:** Cedro, mineral stress, N forms.

## Lista de Figuras

**Figura 1.** Teor foliar de nitrogênio (N) (a), potássio (K) (b), cálcio (Ca) (c), magnésio (Mg) (d), fósforo (P) (e), enxofre (S) (f), ferro (Fe) (g), manganês (Mn) (h), zinco (Zn) (i), boro (B) (j) e cobre (Cu) (k) nas folhas de plantas de *Cedrela odorata* cultivadas por 150 dias sob diferentes proporções de  $N-NO_3^-:N-NH_4^+$ . As barras de erro representam erro padrão da média. Barras com as mesmas letras não são significativas em  $P > 0,1$ . 21

**Figura 2.** Fotossíntese líquida (A) (a), índice relativo a clorofila (IRC SPAD) (b), eficiência quântica máxima do fotosistema II (Fv/Fm) (c), índice de desempenho na base ABS (PIAbs) (d), índice de desempenho total (PItotal) (e) em plantas de *Cedrela odorata* cultivadas por 150 dias sob diferentes taxas de  $N-NO_3^-:N-NH_4^+$ . As barras de erro representam erro padrão da média. Barras com as mesmas letras não são significativas em  $P > 0,1$ . 23

**Figura 3.** Massa seca da parte aérea (MSPA) (a), massa seca da raiz (MSR) (b), área foliar (AF) (c) e razão da massa seca da raiz pela parte aérea (RRPA) (d) em plantas de *Cedrela odorata* cultivadas por 150 dias sob diferentes proporções de  $N-NO_3^-:N-NH_4^+$ . As barras de erro representam erro padrão da média. Barras com as mesmas letras não são significativas em  $P > 0,1$ . 25



## Sumário

<b>ABSTRACT</b> .....	7
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	13
Espécie e condições de crescimento .....	13
Delineamento experimental.....	14
Procedimentos específicos.....	14
Análise dos dados.....	18
<b>RESULTADOS</b> .....	18
Efeitos da correção, adubação básica e tratamentos nas propriedades químicas do solo	18
Teor de nutrientes nas folhas e sintomas do estado nutricional .....	19
Trocias gasosas, índice relativo de clorofila SPAD e Fluorescência da clorofila <i>a</i> .....	22
Crescimento da planta.....	24
<b>DISCUSSÃO</b> .....	25
Efeitos da correção, adubação básica e tratamentos nas propriedades químicas do solo	25
Teor de nutrientes nas folhas e sintomas do estado nutricional .....	26
Trocias gasosas, índice relativo de clorofila SPAD e Fluorescência da clorofila <i>a</i> .....	28
Crescimento da planta.....	30
<b>CONCLUSÕES</b> .....	32
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	32

## INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) recebe especial atenção dentre os nutrientes de plantas por ser um constituinte essencial de importantes biomoléculas e por sofrer grandes flutuações na rizosfera ocasionando limitações para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Shan et al., 2012). Em muitos sistemas de produção a disponibilidade de N é quase sempre um fator limitante, influenciando o crescimento da planta mais que qualquer outro nutriente (Bredemeier e Mundstock, 2000).

Ainda que as espécies nativas de regiões tropicais apresentem uma variedade de adaptações para resistir a elevada acidez e baixa fertilidade natural dos solos (Marschner, 2012), diversos estudos (Wallau et al., 2008; Gonçalves et al., 2012; Viégas et al., 2012; Nascimento et al., 2014) indicam que a tolerância à baixa fertilidade não elimina a possibilidade de resposta positiva à fertilização nitrogenada, resultando em incremento significativo de biomassa em mudas de espécies florestais.

As plantas absorvem o N preferencialmente nas formas de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Wang e Shen, 2012). A proporção entre as duas formas no substrato de crescimento é um fator que pode influenciar o processo de assimilação do N pelas plantas, com consequências no desenvolvimento e crescimento das mesmas (Nacry et al., 2013). Em geral, plantas adaptadas a solos com pH elevado tendem a absorver preferencialmente o  $\text{N-NO}_3^-$ , já aquelas de ambientes com pH baixo, na maioria das vezes, preferem o  $\text{N-NH}_4^+$  (Miller e Cramer, 2005). Deste modo, podem ocorrer prejuízos fisiológicos e metabólicos para o desenvolvimento e crescimento da planta caso a forma de N fornecida não seja a que a espécie tem maior eficiência de absorção e utilização.

Em geral, há espécies que se desenvolvem ou crescem melhor quando supridas apenas com  $\text{NH}_4^+$ ; outras somente com o  $\text{NO}_3^-$ ; enquanto outras respondem melhor quando há uma

combinação dessas duas formas. Além disso, existem espécies em que tanto  $\text{NH}_4^+$  quanto  $\text{NO}_3^-$  satisfazem suas demandas fisiológicas e metabólicas (Li et al., 2013).

No caso das espécies florestais calcífugas e calcícolas (*Pinus massoniana*, *Dicranopteris dichotoma* e *Lycopodium clavatum*); espécies da família Ericaceae, incluindo os gêneros *Azalea*, *Rhododendron*, *Erica* e *Vaccinium*; são adaptadas a solos ácidos e preferem o  $\text{NH}_4^+$ , enquanto que espécies adaptadas a solos drenados, calcários, com pH mais alto e bem aerados apresentam uma maior eficiência de absorção e utilização do  $\text{N-NO}_3^-$  (Li et al., 2013). Em relação à família Meliaceae, não há informações na literatura quanto ao tipo de solo preferido, no entanto, algumas espécies desta família, *Cedrela odorata* e *Switenia macrophylla*, ocorrem em solos caracterizados como ácidos (Gullison et al., 1996; Moreira e Fageria, 2009; Carrero et al., 2014), podendo ser um indicador de que essas espécies tem maior preferência por  $\text{NH}_4^+$ .

No caso das plantas que preferem o  $\text{N-NO}_3^-$  a  $\text{N-NH}_4^+$ , quando este entra nas células radiculares das plantas, é reduzido a nitrito ( $\text{NO}_2$ ), por meio da enzima redutase do nitrato (RN), no citosol e, em seguida, convertido a  $\text{NH}_4^+$  por meio da enzima redutase do nitrito (RNi), no plastídio. O  $\text{NH}_4^+$  é então incorporado em aminoácidos pelas enzimas sintetase da glutamina (GS) e sintase do glutamato (GOGAT), gerando glutamina (GLN), glutamato (GLU) e outros aminoácidos e seus metabólitos (Crawford, 1995; Li et al, 2013).

No caso da absorção de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$  ser maior de que a demanda metabólica da planta, ambas as formas podem ser armazenados no vacúolo, para posteriormente serem reduzidos no citosol da mesma célula ou serem translocados inalterados para a parte aérea da planta (Crawford, 1995; Li et al, 2013). No entanto, este excesso é armazenado nos vacúolos e, em alguns casos, pode resultar em desequilíbrio da regulação osmótica (Taiz e Zeiger, 2013; Li et al., 2013).

As plantas assimilam  $\text{NH}_4^+$  em aminoácidos perto dos locais de absorção ou geração, evitando altos acúmulos de  $\text{NH}_4^+$  em seus tecidos, assim estocam rapidamente qualquer excesso em seus vacúolos. Poucas espécies apresentam bom desempenho quando o  $\text{NH}_4^+$  é a única forma de N fornecida. Isso é decorrente da toxicidade ocasionada por elevados teores de  $\text{NH}_4^+$  livre nas células, que provocam alterações no pH celular e desbalanços iônicos e hormonais (Britto e Kronzucker, 2002; Li et al., 2013).

O excesso de  $\text{NH}_4^+$  perturba o metabolismo da planta no interior e no exterior das células, ocasionando a redução da velocidade fotossintética, da biomassa (raiz e caule e folhas), devido a clorose, necrose das folhas e decréscimo do sistema radicular e do caule, além da indução a deficiência de nutrientes, resultando em prejuízos para o crescimento da planta (Gerendás et al, 1997; Loque e Wirén, 2004).

Diferente do N- $\text{NH}_4^+$ , o N- $\text{NO}_3^-$  pode ser estocado pelas plantas em altos níveis e translocados de tecido a tecido, na maioria das vezes sem efeito deletério (Epstein e Bloom, 2006). Por outro lado, restrições no crescimento e desenvolvimento das plantas podem ser observados quando são utilizados adubos contendo apenas N- $\text{NH}_4^+$  ou com formas mistas de N (Britto e Kronzucker, 2002). Dessa forma, alguns pesquisadores entre eles Fageria (2005), recomendam utilizar uma proporção de 80:20 (%) de N- $\text{NO}_3^-$  e N- $\text{NH}_4^+$ , respectivamente.

A assimilação do  $\text{NH}_4^+$  demanda menos energia em comparação a  $\text{NO}_3^-$  por não precisar ser reduzido antes de ser incorporado em aminoácidos (Li et al., 2013). Deste modo, pressupõe-se que as plantas supridas com  $\text{NH}_4^+$  exijam menos energia para crescer (Bredemeier e Mundstock, 2000), refletindo em maior estímulo das atividades fotossintéticas, metabólicas e, conseqüentemente, em incremento de biomassa (Nacry et al., 2013).

Outros fatores como proporção entre  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  no meio, pH do substrato, temperatura, intensidade luminosa, concentração de carboidratos nas raízes e preferência da planta por determinada forma de N, influenciam na absorção preferencial de N (Li et al., 2013).

Guimarães et al. (2014) verificaram que o crescimento inicial de *Eucalyptus urophylla* em meio hidropônico foi afetado pelas diferentes proporções de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, com a proporção 75:25 (%) de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, respectivamente, contribuindo para o maior acúmulo de massa seca. No entanto, estas formas não influenciaram significativamente a fotossíntese líquida, trocas gasosas e estado nutricional quanto a macronutrientes. Freiburger et al. (2013) estudando o efeito de doses de N (0 - 160 mg dm<sup>-3</sup>) no crescimento inicial e estado nutricional de *Cedrela fissilis*, observaram a presença de efeito dos tratamentos nos parâmetros índice relativo de clorofila (índice SPAD) e crescimento das plantas. E, as maiores doses de N promoveram maior acúmulo de todos os nutrientes em função do incremento da produção de matéria seca.

Em solos ácidos e úmidos, como os encontrados na Amazônia, (Moreira e Fageria, 2009; Carrero et al., 2014), o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> é a forma mais abundante de N inorgânico em decorrência da acidez inibir os microrganismos nitrificantes que provocam a oxidação do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> livre (Konnerup e Brix, 2010). Entretanto, poucos estudos têm sido conduzidos visando identificar a real preferência das espécies arbóreas dessa região por formas de N, incluindo o cedro, importante espécie do setor econômico madeireiro. No presente estudo nós investigamos a hipótese de uma apropriada proporção de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> melhorar o estado nutricional, fotossíntese e o crescimento de mudas de cedro.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### *Espécie e condições de crescimento*

O cedro (*Cedrela odorata* L.), pertencente à família Meliaceae, é considerado nobre para o mercado nacional e internacional de madeira serrada (Luchi, 2011; Carrero et al., 2014) e é atualmente testada como boa substituta de espécies florestais com alto potencial madeireiro, como mogno (Almeida et al., 2010). Esta espécie ocorre na região central da Amazônia (Carrero

et al., 2014) em solos de terra firme com textura argilosa, Argissolos e Latossolos, bem drenados (Cervi et al., 2008; Quesada et al., 2011; Carrero et al., 2014). Estes solos apresentam limitações como baixa fertilidade natural, elevada acidez e teor de matéria orgânica variando de 2 a 3,1 g kg<sup>-1</sup> (Moreira e Fageria, 2009). O clima predominante na região de ocorrência da espécie é tropical equatorial, grupo Af, na classificação climatológica de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013).

Mudas no estágio de dois a quatro pares de folhas foram cultivadas em casa de vegetação com 612,3 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> de densidade de fluxo de fóton fotossintético, fotoperíodo de 12:00 h/12:00 h (dia/noite), temperatura média de 35,7°C e umidade relativa de 47%, na Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM.

#### *Delineamento experimental*

Utilizou-se o delineamento de blocos inteiramente casualizados, com cinco repetições e uma planta por unidade experimental, totalizando 35 plantas neste estudo. As plantas foram crescidas sob o efeito de 200 mg dm<sup>-3</sup>, em seis diferentes proporções, de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (100:0; 80:20; 60:40; 40:60; 20:80 e 0:100%, respectivamente), mais um tratamento controle, sem o fornecimento de N. Aos 150 dias após o transplante (DAT), foram avaliados o grau de variação nos parâmetros nutricionais, fisiológicos e morfológicos de cada unidade experimental.

#### *Procedimentos específicos*

*Caracterização, correção, adubação básica e tratamentos:* antes da aplicação dos tratamentos, o LATOSSOLO AMARELO Distrófico de textura muito argilosa (Embrapa 2006) coletado na camada de 20 - 40 cm de profundidade sob floresta secundária, foi seco ao ar, homogeneizado e peneirado em malha de 4 mm. Subamostras foram passadas em malhas de 2 mm obtendo a terra fina seca ao ar (TFSA). Esta foi caracterizada quimicamente (Embrapa 2009) e

granulometricamente de acordo com Bouyoucos (1927) e modificado por Carvalho (1985). Em seguida os solos foram corrigidos com uma mistura de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio na relação estequiométrica Ca:Mg de 4:1, adotando-se o critério de aumentar a saturação por bases (V%) a 60% e, posteriormente os solos foram incubados por 30 dias.

Após este período, foi realizada uma adubação básica, adaptada de Allen et al. (1976) e Malavolta (1980) e também conforme a caracterização química, granulometria do solo e potencial de resposta da espécie. Aplicou 100 mg de potássio (K); 455 mg de fósforo (P); 0,8 mg de boro (B); 4 mg de zinco (Zn); 1,3 mg de cobre (Cu); 3,6 mg de manganês (Mn) e 0,15 mg de molibdênio (Mo) por  $\text{dm}^{-3}$ . As quantidades foram balanceadas para que somente as proporções de nitrato:amônio variassem. Nessa mesma época os tratamentos foram aplicados, utilizando-se como fonte o sulfato de amônio e nitrato de cálcio, em seguida, os solos foram novamente incubados por 30 dias.

O corretivo e adubação básica com P foram aplicados na forma sólida (pó) enquanto a adubação básica com os demais nutrientes e os tratamentos foram realizadas na forma de solução. Todas aplicações (corretivo, adubação básica e tratamentos) foram realizadas com reagentes puro para análises (p.a.) e de forma individualizada em cada recipiente.

*Mudas e recipientes:* as mudas foram obtidas via sementes, sendo estas esterilizadas em hipoclorito de sódio na concentração de 1% (volume/volume) e posteriormente germinadas bandejas plásticas com 60 cm de comprimento x 40 cm de largura x 10 cm de altura, utilizando-se como substrato vermiculita esterilizada em hipoclorito de sódio na concentração a 0,3% (volume/volume), irrigadas frequentemente com água de torneira.

Quando as plântulas atingiram o estágio de dois a quatro pares de folhas, estas foram selecionadas quanto à altura e transplantadas para vasos de polietileno de 4  $\text{dm}^3$  com 34 cm de altura, 7,63 cm de diâmetro inferior e 15,60 cm de diâmetro superior.

*Atributos químicos do solo após aplicação da adubação básica e tratamentos:* ao final da fase de incubação e antes do transplântio das mudas, foram coletadas amostras simples de solo em cada vaso, obtendo uma amostra composta por tratamento. Em seguida as amostras foram preparadas obtendo a TFSA e caracterizadas quimicamente quanto a pH em água; matéria orgânica do solo; P; K; Ca e Mg; Al; acidez potencial (H + Al); Zn; Fe; Mn; Cu; B; S; V%; saturação por alumínio (m%); capacidade de troca de cátions a pH natural (t); capacidade de troca de cátions a pH 7 (T) (Embrapa, 2009).

*Irrigação e adubação de cobertura:* durante as fases de incubação e condução do experimento, a umidade no solo foi mantida em torno de 60% do volume total de poros, por meio de pesagem diária dos vasos e adição de água deionizada. Foram realizadas duas adubações de cobertura com taxas de 50 mg de K dm<sup>-3</sup> de solo, aos 90 e 120 DAT.

#### *Avaliação do experimento*

*Avaliação de parâmetros morfológicos:* a altura da parte aérea (ALT) foi obtida com o auxílio de uma régua graduada. A medição do diâmetro do coleto (DC) foi feita com um paquímetro digital (King Tools 0 - 200 mm) e para aferir a área foliar utilizou-se o integrador de área foliar portátil (CI 202). Posteriormente as plantas foram colhidas a 0,5 cm da superfície do solo, lavadas em água de torneira e água destilada separando-as em parte aérea (folhas + ramos + caule) e raízes. As partes foram secas em estufa de circulação forçada de ar, com temperatura de 65°C até atingirem massa constante. Após a secagem foi determinada a massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR), utilizando-se balança do tipo Mettler PM 30-K com precisão de 0,001 g. A MSR foi dividida por MSPA para obter a relação raiz parte aérea (RRPA).

*Avaliação do estado nutricional das plantas-sintomatologia:* os sintomas de deficiência nutricional foram caracterizados, descritos e fotografados conforme seu surgimento.



Complementarmente, a matéria seca foliar foi moída em moinho do tipo Willey através de peneira de 1 mm para avaliação da composição química das plantas.

Uma amostra de 0,5 g foi cuidadosamente pesada e digerida usando 5 mL de uma mistura de HNO<sub>3</sub> e HCl na relação 2:1 (v/v), utilizando macro tubos de digestão (80 mL) sobre um bloco de digestão, na temperatura de 210°C. P foi determinado por espectrofotometria visível ( $\lambda = 680$  nm) (espectrofotômetro Micronal<sup>®</sup> modelo B-580). K foi determinado por fotometria de chama (fotômetro Micronal<sup>®</sup> modelo B-462); Ca, Mg, Zn, Cu, Fe e Mn foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (GBC, modelo Avanta Sigma, Australia). Para determinação de N, amostras de 0,1 g foram digeridas em 2 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,5 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sobre bloco digestor a 200°C, e a solução digerida foi alcalinizada com excesso de uma solução de NaOH. A amônia foi destilada usando o processo semi-micro-Kjeldahl (Marconi, MA036, Brasil) e titulado usando 0,02 mol L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. S foi determinado com BaCl<sub>2</sub> em 1 mL de uma solução ácida (HCl 6 mol L<sup>-1</sup> + 20 mg L<sup>-1</sup> de S) e determinado pelo método turbimétrico ( $\lambda = 420$  nm). O B foi determinado pelo método colorimétrico curcumina ( $\lambda = 540$  nm) (Malavolta et al., 1997).

*Avaliação de parâmetros fisiológicos:* a fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs) e transpiração (E) foram obtidas entre 07:00h e 11:00h em folhas jovens completamente expandidas utilizando analisador de gás a infravermelho (IRGA - LICOR 6400), conforme metodologia descrita por Santos Júnior et al. (2006). Com dados pontuais foi obtido à densidade de fluxo de fótons (PPFD) 1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , com a câmara foliar ajustada para concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura e vapor de H<sub>2</sub>O em torno de 380±4  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ , 31±1°C e 21±1 mmol mol<sup>-1</sup>, respectivamente.

O índice relativo de clorofila (IRC-SPAD) foi medido com um medidor portátil de clorofila (modelo SPAD-502), nas mesmas folhas que foram avaliadas a fotossíntese líquida, conforme Freiburger et al. (2013).

Os parâmetros de fluorescência da clorofila *a*, eficiência quântica máxima do fotossistema II (PSII) ( $F_v/F_m$ ), índice de desempenho na base ABS ( $PI_{ABS}$ ), indicam o desempenho para a conservação de energia proveniente da absorção de fótons pelo PSII e o índice de desempenho total ( $PI_{total}$ ), que refere ao potencial de conservação potencial de energia dos fótons absorvidos pelo PSII, foram determinados por meio de um fluorômetro portátil (PEA, MK2 - 9600 - Hansatech, Norfolk, UK). As folhas selecionadas para análise foram submetidas a um período de adaptação ao escuro durante 30 minutos, utilizando cliques apropriados, sendo este período suficiente para a completa oxidação do sistema fotossintético de transporte de elétrons. Em seguida, foram expostas a um pulso de luz saturante de alta intensidade luminosa ( $3000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e comprimento de onda de 650 nm por 1 s). Assim, as respostas relacionadas aos transientes da fluorescência da clorofila *a* foram obtidas a partir de software específico (Handy PEA software - v 1,30), de acordo com equações do teste JIP (Strasser et al., 2010).

#### *Análise dos dados*

As variáveis dependentes foram ALT, DC, AF, MSPA, MSR, RRPA, teores foliares de nutrientes na folha, A, gs, E, IRC SPAD,  $F_v/F_m$ ,  $PI_{ABS}$  e  $PI_{total}$ . Os dados foram testados quanto à normalidade pelo método de Shapiro-Wilk ( $p > 0,1$ ) e posteriormente submetidos à análise de variância. Quando o F foi significativo ( $P < 0,1$ ), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tuckey.

## **RESULTADOS**

#### *Efeitos da correção, adubação básica e tratamentos nas propriedades químicas do solo.*

O solo em estudo apresenta textura muito argilosa (740 dag de argila  $\text{kg}^{-1}$  de solo) e, após o período de incubação verificamos que a correção do solo aumentou os valores médios de pH (4,1 para 4,9), Ca (0,1 para 5,34  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), Mg (0,1 para 1,12  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e V (3,7

para 65,39%). Por outro lado, na correção do solo houve redução dos valores de alumínio trocável de 1,3 para 0,1  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , saturação por alumínio de 84,3 para 1, 45% e o teor de matéria orgânica não sofreu alteração mantendo-se em torno de 1,52  $\text{g kg}^{-1}$ . Exceto o pH, que ficou abaixo da faixa considerada adequada (5,5) para o crescimento de plantas, os valores dos demais atributos ficaram dentro da faixa adequada (CFSEMG, 1999). Apesar da fonte sulfato de amônio apresentar potencial acidificante (Melém Junior, 2001), não foi observada influência desta no pH do solo.

Em relação a adubação básica, houve aumento dos valores dos nutrientes adicionados, alcançando 123,5; 396,64; 249,97; 162,00; 7,95; 8,61; 0,08 e 3,04  $\text{mg dm}^{-3}$  de K, P (extrator resina), S, Fe, Mn, Zn, B e Cu, respectivamente.

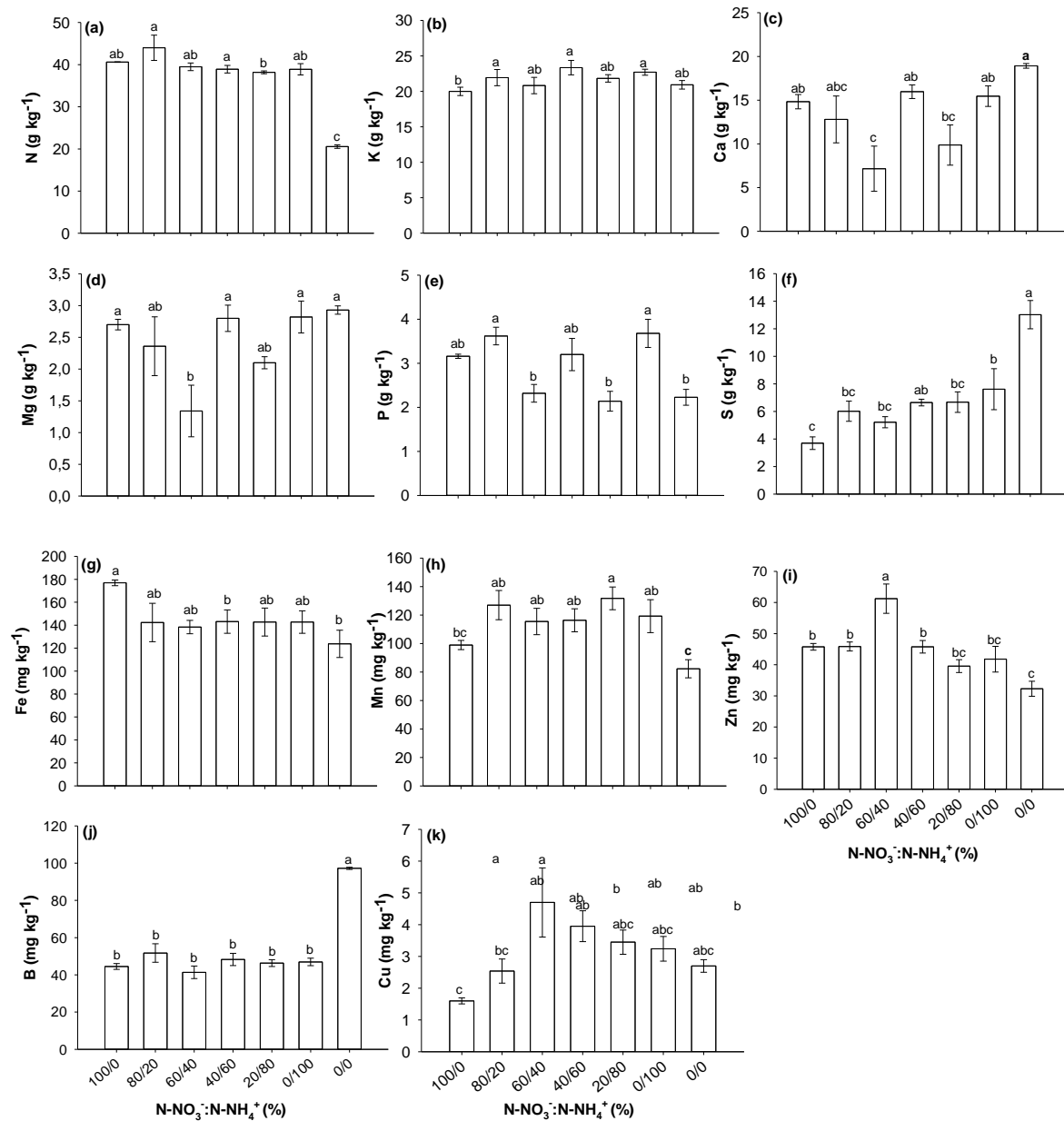
#### *Teor de nutrientes nas folhas e sintomas do estado nutricional*

As diferentes proporções de N influenciaram significativamente ( $P < 0,1$ ) os teores foliares nas plantas de cedro. Observamos que a concentração foliar de N, K, Ca, P, Mg e S foram responsivas as diferentes proporções de  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^+$ . De modo geral, os maiores valores Ca, Mg e S foram encontrados nas condições sem o fornecimento de N (0  $\text{mg dm}^{-3}$ ), enquanto os maiores valores de N e P foram apresentados na proporção 80:20 (%) de  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^+$ , enquanto o tratamento 40:60 (%) de  $\text{N-NO}_3^-$ : $\text{N-NH}_4^+$  contribuiu para os maiores valores de teores foliares de K. Os teores foliares de K (20 – 23,4  $\text{g kg}^{-1}$ ), Ca (7,2 - 18,9  $\text{g kg}^{-1}$ ), P (2,1 - 18,9  $\text{g kg}^{-1}$ ) e Mg (1,3 - 2,9  $\text{g kg}^{-1}$ ), também permaneceram dentro da faixa adequada para as plantas, segundo Marschner (2012). No entanto, a concentração do S ficou bem acima (1,4 - 1,6  $\text{g kg}^{-1}$ ) daqueles considerados adequados para o crescimento das plantas (Malavolta, 1997).

No caso específico do N, a concentração foliar foi influenciada pelas diferentes proporções de  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^+$ , o tratamento 20:80 (%) de  $\text{N-NO}_3^-$ : $\text{N-NH}_4^+$  resultou em menor valor em relação à outras proporções e o tratamento sem N apresentou o menor valor

entre todos os tratamentos (Figura 1a). Além disso, os teores de N foliar nas diferentes proporções de N nitrato e amônio situaram entre 20 e 44 g kg<sup>-1</sup>, permanecendo dentro dos níveis considerados adequados (20 - 50 g kg<sup>-1</sup> de N) para bom crescimento das plantas (Marschner 2012). No caso do tratamento sem N, o teor atingiu o valor de 20,5 g kg<sup>-1</sup> de N (Figura 1a).

Em relação aos micronutrientes, as concentrações foliares de Zn, Mn e Cu foram dependentes da proporção de N nitrato e amônio, sendo as maiores concentrações encontradas sob as seguintes condições 60:40, 20:80 e 60:40 (%) de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, respectivamente. No entanto, as proporções de N resultaram em leve efeito nas concentrações de Fe e B, não apresentando diferença entre as proporções. Os maiores teores de micronutrientes foram observados nas proporções 60:40, 20:80 e 0:100 (%) de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Os menores teores foram encontrados no tratamentos 0:0, 0: 40 e 100:0 (%) de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.



**Figura 1.** Teor foliar de nitrogênio (N) (a), potássio (K) (b), cálcio (Ca) (c), magnésio (Mg) (d), fósforo (P) (e), enxofre (S) (f), ferro (Fe) (g), manganês (Mn) (h), zinco (Zn) (i), boro (B) (j) e cobre (Cu) (k) nas folhas de plantas de *Cedrela odorata* cultivadas por 150 dias sob diferentes proporções de  $N-NO_3^-:N-NH_4^+$ . As barras de erro representam erro padrão da média. Barras com as mesmas letras não são significativas em  $P > 0,1$ .

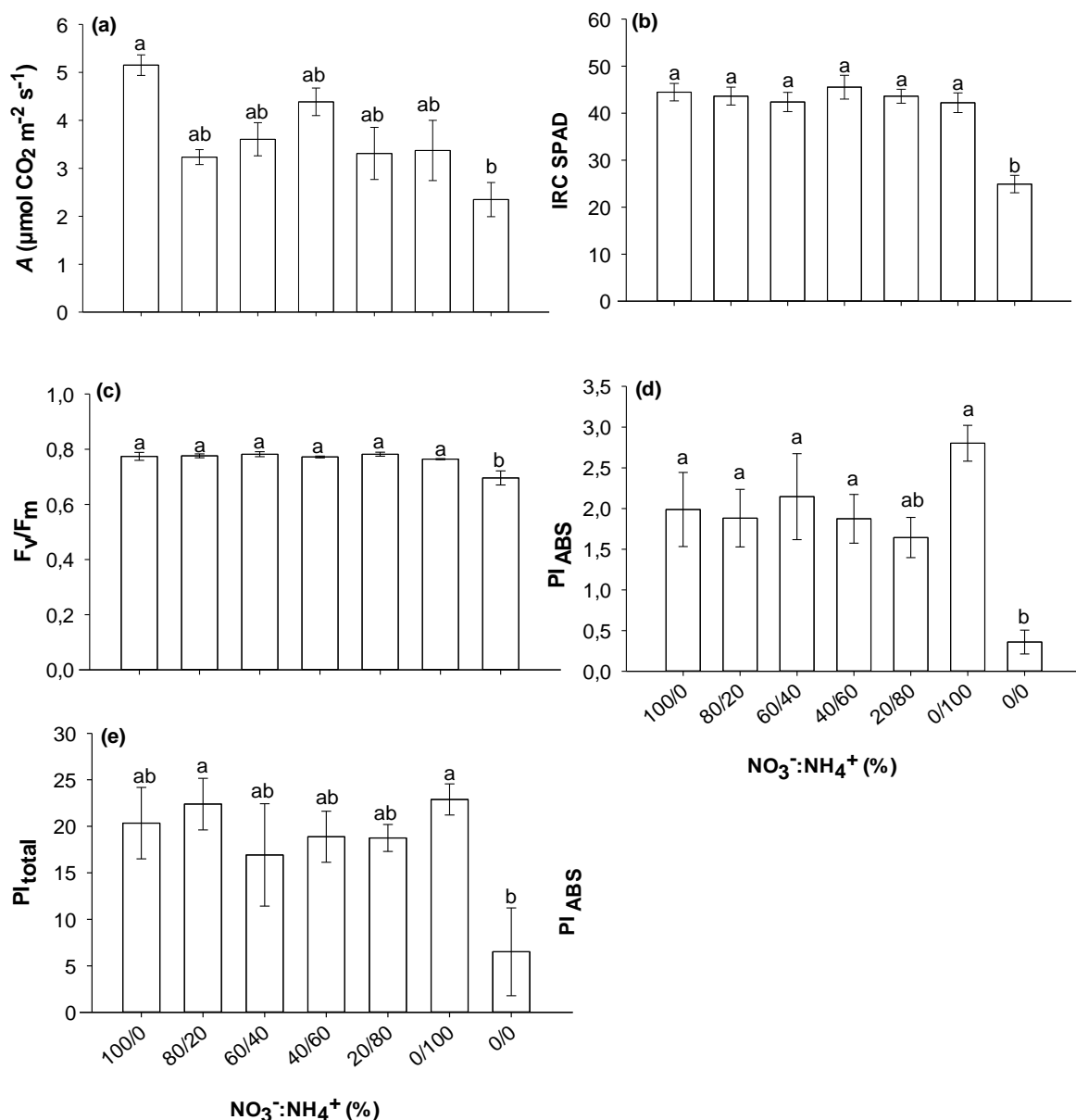
De modo geral, os sintomas de deficiência (clorose, diminuição da área foliar, menor lançamento de folhas e retardo no crescimento) tornaram-se visíveis aos 80 DAT em plantas cultivadas sem fornecimento de N ( $0\ mg\ de\ N\ dm^{-3}$ ) (Figura 2), corroborando com os resultados encontrados na concentração foliar (Figura 1). Plantas em condições de 40, 80 e 100 (%) de  $N-NH_4^+$ , equivalente a 80, 160 e 200  $mg\ dm^{-3}$  de N-amônio no substrato exibiram sintomas leves

de toxidez a partir de 103 dias na forma de uma leve clorose no limbo de folhas velhas. Observamos maior crescimento da parte aérea, folhas bem expandidas em plantas que foram supridas com proporção 40:60 (%) de  $\text{N-NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ , seguida da proporção 20:80 e 0:100 (%) de  $\text{N-NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ .

#### *Trocas gasosas, índice relativo de clorofila SPAD e Fluorescência da clorofila*

Os tratamentos influenciaram significativamente ( $P>0,1$ ) os parâmetros fotossintéticos, exceto a condutância (gs) e transpiração (E). No entanto, houve apenas ligeiro efeito das diferentes proporções de  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^+$  sobre as variáveis analisadas (Figura 3).

O tratamento 0:0 mg de  $\text{N-NO}_3^-:\text{N-NH}_4^+$  proporcionou os menores valores de todas as variáveis fotossintéticas em comparação com as diferentes proporções de  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^+$ . Apesar de não haver diferença significativa ( $P>0,1$ ) entre as diferentes proporções das formas de N, é importante observar que no caso da fotossíntese líquida, as proporções 100:0 e 40:60 (%) de  $\text{N-NO}_3^-:\text{N-NH}_4^+$  tenderam a proporcionar maiores valores, enquanto a proporção 80:20 (%) de  $\text{N-NO}_3^-:\text{N-NH}_4^+$  apresentaram os menores valores (Figura 3a). Por outro lado, os valores de  $\text{PI}_{\text{ABS}}$  (Figura 3d) tenderam ser maiores nas condições 60:40 e 0:100 (%) de  $\text{N-NO}_3^-:\text{N-NH}_4^+$ , esta última proporção tendeu proporcionar os maiores valores de  $\text{Pi}_{\text{Total}}$  (Figura 3e), juntamente com a proporção de 80:20 (%) de  $\text{N-NO}_3^-:\text{N-NH}_4^+$ .



**Figura 2.** Fotossíntese líquida (A) (a), índice relativo a clorofila (IRC SPAD) (b), eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) (c), índice de desempenho na base ABS (PI<sub>ABS</sub>) (d), índice de desempenho total (PI<sub>total</sub>) (e) em plantas de *Cedrela odorata* cultivadas por 150 dias sob diferentes taxas de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. As barras de erro representam erro padrão da média. Barras com as mesmas letras não são significativas em  $P > 0,1$ .

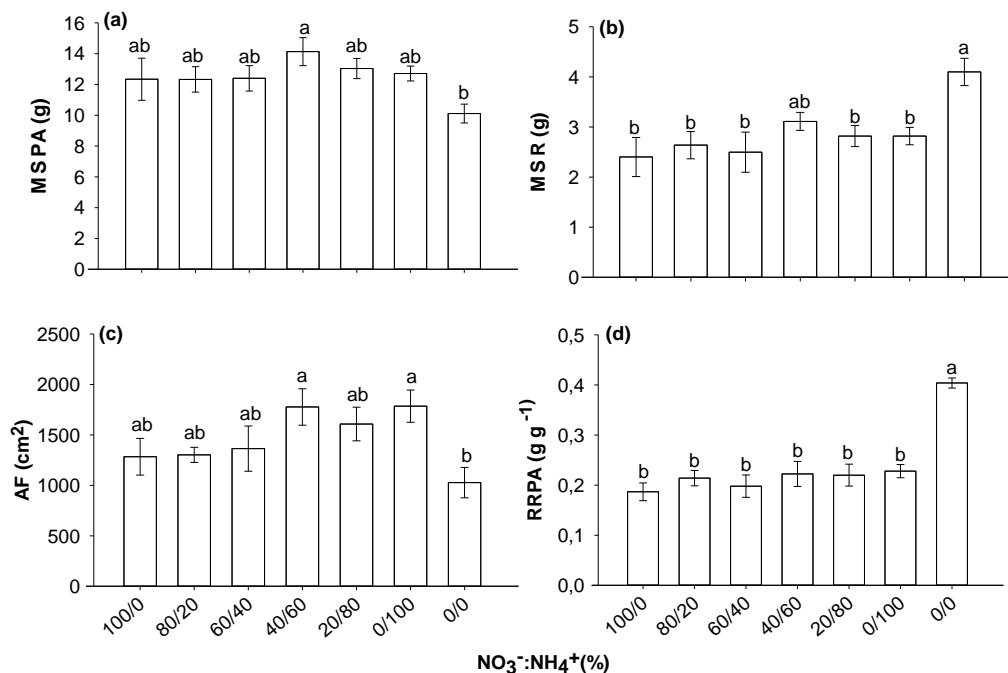
A eficiência quântica máxima do PSII (Fv/Fm), informa o estado geral da folha, se está saudável e fotossinteticamente ativa. No presente estudo, estes valores variaram entre 0,69 e 0,78, considerados adequados para espécies florestais (Figueiredo et al., 2014; Marengo et al., 2014). Por outro lado, comparando os valores de Fv/Fm, PI<sub>ABS</sub> (que reflete, o processo de funcionamento do aparato fotossintético) (Desotgiu et al. 2012) e PI<sub>total</sub> (parâmetro que está

intimamente relacionado com o resultado final da atividade da planta, crescimento ou a sobrevivência em condições de estresse) (Yusuf et al., 2010; Desotgiu et al., 2012) verificamos no tratamento  $0 \text{ mg dm}^{-3}$  N uma redução de 11,5; 87,1 e 71,6% nos valores de  $F_v/F_m$ ,  $PI_{ABS}$  e  $PI_{total}$ , respectivamente, em comparação com a proporção de  $N-NO_3^-:N-NH_4^+$  que proporcionou o maior valor das respectivas variáveis.

### *Crescimento da planta*

Os tratamentos influenciaram significativamente ( $P > 0,1$ ) os parâmetros de crescimento. No entanto, notamos apenas ligeiro efeito das proporções de N nos parâmetros de crescimento, o que corrobora com os resultados relativos aos parâmetros fotossintéticos (Figura 3a, d, e). De modo geral, houve ligeira tendência dos maiores valores da MSPA, MSR e AF serem apresentados nos tratamentos 40:60 (%) de  $N-NO_3^-:N-NH_4^+$  (Figuras 4a, b, c), que não diferenciaram do tratamento 0:100 (%) de  $N-NO_3^-:N-NH_4^+$  na variável área foliar (Figura 4c) e do tratamento  $0 \text{ mg dm}^{-3}$  de N na variável MSR (Figura 4b). No caso das variáveis MSPA e AF, os menores valores foram encontradas no tratamento sem o fornecimento de N ( $0 \text{ mg dm}^{-3}$ ) (Figura 4a, c). Por outro lado, este tratamento apresentou os maiores valores de MSR e RRPA.





**Figura 3.** Massa seca da parte aérea (MSPA) (a), massa seca da raiz (MSR) (b), área foliar (AF) (c) e razão da massa seca da raiz pela parte aérea (RPPA) (d) em plantas de *Cedrela odorata* cultivadas por 150 dias sob diferentes proporções de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. As barras de erro representam erro padrão da média. Barras com as mesmas letras não são significativas em P > 0,1.

## DISCUSSÃO

### *Efeitos da correção, adubação básica e tratamentos nas propriedades químicas do solo*

Exceto o pH, que ficou abaixo da faixa considerada adequada (5,5 - 6,2) para o crescimento de plantas, os valores dos demais atributos químicos ficaram dentro da faixa considerada adequada (CFSEMG, 1999) para o bom crescimento das plantas. Apesar da fonte sulfato de amônio apresentar potencial acidificante do solo (Melém Junior, 2001), no presente estudo não foi observado influência dos tratamentos que receberam maior proporção de N com essa fonte no solo. Nicoloso et al. (2001) observaram que mudas de *Apuleia leiocarpa* responderam significativamente à adubação com NPK, sob condições de pH do solo entre 4,6 a 4,8, em experimentos em casa de vegetação.

No caso da adubação básica, de modo geral, os valores ficaram dentro da faixa de concentração considerada adequada para o bom crescimento das plantas, conforme Allen et al.

(1976) e Malavolta (1980), exceto, a concentração de B que ficou abaixo do recomendado. No entanto, em relação a este nutriente não foi observado nenhum sintoma de deficiência nas plantas.

#### *Teor de nutrientes nas folhas e sintomas do estado nutricional*

Informações sobre o efeito das formas de N sobre a concentração de nutrientes existem para várias espécies vegetais, especialmente a culturas agrônômicas. Entretanto, para a espécie *Cedrela odorata* não existe referência para a concentrações de nutrientes na folha. Níveis adequados de nutrientes nos tecidos das plantas (Marschner, 2012), foram utilizados como comparação.

Os teores de macro e micronutrientes ficaram dentro da faixa considerada adequada para o crescimento das plantas, exceto o Cu, o qual apresentou teores abaixo da faixa considerada adequada (4 - 12 mg Kg<sup>-1</sup>) (Marschner, 2012). O teor de N pode ser melhorado com a adição de nitrato e amônio, preferencialmente que o nitrato esteja em maior proporção (Li et al., 2013). Entretanto não observamos, neste estudo, diferença no teor de N nas folhas no tratamento com 100% de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

Embora na literatura seja relatado um decréscimo de K devido à alta concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Rothstein e Cregg, 2005), esse padrão de comportamento não foi verificado nos resultados do nosso trabalho. Tsubarducas et al. (2017), abordam que isso possivelmente pode ser decorrente à existência de um mecanismo antagonístico entre K<sup>+</sup> e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> para algumas espécies de plantas, enquanto que outras espécies podem apresentar um mecanismo sinérgico entre K<sup>+</sup> e NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

Os sintomas de deficiência observados nas faixas de concentração de N, que são as consideradas adequadas para o crescimento da planta, indicam a necessidade de criar faixas específicas para essa espécie nesta fase de crescimento. Isso porque as plantas sem

fornecimento de N apresentaram sintomas de deficiência, mesmo o teor ( $20,56 \text{ mg N kg}^{-1}$ ) estando dentro da faixa adequada ( $20 - 50 \text{ mg N kg}^{-1}$ ) (Marschner, 2012). O mesmo tratamento apresentou menor ICR SPAD e A,  $F_v/F_m$ ,  $PI_{ABS}$  e  $PI_{Total}$ . Possivelmente, em razão do N ser um dos componentes fundamentais na estrutura da clorofila, onde cada átomo de Mg está ligado a quatro átomos de N (Taiz e Zeiger, 2013), mais de 50% do N contido nas folhas está envolvido em reações ou estruturas do cloroplasto (Stoking e Ongun, 1962). Assim, mesmo estando dentro da considerada faixa adequada, não foi suficiente para as plantas de cedro desenvolverem processos fundamentais relacionados a clorofila e assimilação de  $CO_2$  (Hawkesford et al., 2012, Malik e Rengel, 2013).

No presente estudo, sintomas de deficiência de nitrogênio como retardamento e menor lançamento de folhas novas, margem dos folíolos enrugadas, perda da coloração verde escuro paulatinamente para um amarelo intenso em todo limbo, nervura e pecíolo, clorose, queda das folhas velhas e amarelecimento das folhas novas foram observados no tratamento sem fornecimento de N ( $0 \text{ mg dm}^{-3}$  de N), indicando que o fornecimento abaixo da demanda metabólica da planta promove mudanças visuais e morfológicas nas plantas (Malik e Rengel, 2013). O N é constituinte das proteínas e de ácidos nucléicos e sua deficiência afeta o metabolismo, pois reduz a divisão e expansão celular, consequência da alteração ao nível molecular, o que leva a uma alteração celular a qual, finalmente, resulta em desorganização do tecido, o sintoma visual, comum para todas as espécies (Malavolta e Moraes, 2007).

Estudos com espécies florestais com o intuito de avaliar o estado nutricional e diagnosticar sintomas deficiência de nutrientes em teca (*Tectona grandis*) (Barroso et al., 2005), cedro (*Cedrela odorata* L.) (Locatelli et al., 2006), mogno (*Swietenia macrophylla*) (Wallau et al., 2008), cedro australiano (*Toona ciliata*) (Moretti, 2011) e angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa*) (Gonçalves et al., 2012) mostram sintomas de deficiência de N semelhantes aos observados no presente estudo.

Observamos sintomas semelhantes àqueles de toxidez de amônio, sendo estes mais visíveis na produção de raízes curtas, clorose e necrose foliar (Souza e Fernandes, 2006; Li et al., 2013), sendo os sintomas mais intensos observados acima de 120 mg de N-amônio.

Britto e Kronzucker (2002) relatam esses sintomas relacionados a toxidez de amônio, por este ocasionar mudanças em vários níveis de metabólitos como aminoácidos ou ácidos orgânicos e redução da fotossíntese. No entanto, mesmo as plantas apresentando supostos sintomas de toxidez de  $\text{NH}_4^+$ , não reduziram a AF e a produção de MSPA. Provavelmente esse comportamento se deve ao fato da toxidez ter sido minimizada com a adição de  $\text{NO}_3^-$  (Britto e Kronzucker, 2002; Konnerup e Brix, 2010), ou pela concentração de cátions como o  $\text{K}^+$ , promovendo uma competição entre os cátions no momento de absorção pelas células da raiz (Britto e Kronzucker, 2002; Epstein e Bloom, 2006; Li et al., 2013), ou ainda pela capacidade do cedro apresentar tolerância à nutrição de  $\text{NH}_4^+$ , uma vez que a espécie ocorre em solos ácidos, onde tende a predominar o  $\text{NH}_4^+$  (Miller e Cramer, 2005).

Foi observada redução da raiz quando o fornecimento N foi apenas por nitrato, este comportamento corrobora com Bijlsma et al (2000), que enfatiza menor custo de carbono por mol de N absorvido, uma citam quando  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$  são absorvidos concomitantemente, pelas plantas.

#### *Trocas gasosas, índice relativo de clorofila SPAD e Fluorescência da clorofila a*

Os menores valores da fotossíntese líquida no tratamento sem N, estão relacionados a utilização de assimilados pela planta, onde a deficiência de N estimula maiores proporções de carbono para a formação de amido (Rufty Junior et al., 1988). Se o acúmulo de amido no cloroplasto estiver em excesso, a fotossíntese pode ser afetada, por impedir a chegada do  $\text{CO}_2$  aos sítios de carboxilação da Rubisco (Guidi et al., 1998). Assim, ocorre um desarranjo nas

membranas dos tilacóides, prejudicando a captação de energia luminosa e reduzindo as taxas fotossintéticas.

Quanto ao IRC SPAD, esse comportamento deve estar associado ao teor de clorofila (Schadchina e Dmitrieva, 1995), responsáveis pela captura de luz usada na fotossíntese, sendo que, 50 a 70% do N total das folhas se integra a enzimas, associadas a cloroplastos (Stoking e Ongun, 1962; Chapman e Barreto, 1997) local onde está presente a clorofila. Dessa forma, a deficiência de N reduz a concentração de clorofila, sendo a fotossíntese dependente deste composto, já que a energia e a estrutura molecular para incorporação do N são supridas pelo metabolismo dos carboidratos, o qual, por sua vez, depende da fotossíntese (Larcher, 2006).

Em relação às variáveis da fluorescência da clorofila *a*, como também no caso do IRC SPAD, os menores valores foram encontrados no tratamento sem fornecimento de N, em decorrência de algum tipo de estresse, podendo ser resultado do teor de N. Isso porque o valor de  $F_v/F_m$  foi de 0,6, valor considerado abaixo da média (0,7 a 0,8) para espécies tropicais (Figueiredo et al., 2014; Marengo et al., 2014).

A luz absorvida pelo PSII é responsável pela captura e conversão da energia radiante (fotóns) em energia química (ATP - adenosina trifosfato e NADPH - Dinucleotídeo de adenina e nicotinamida fosfato), indispensável para a assimilação de carbono e para a síntese de compostos nitrogenado, como os aminoácidos (Taiz e Zeiger, 2013). O N é necessário para a formação destes e de enzimas, como a Rubisco, que agem na fixação de carbono (Larcher, 2006). No trabalho de Tsabarducas et al. (2017) também não encontraram diferenças entre os tratamentos com N na variável fluorescência da clorofila.

A escassez de N afeta a estrutura e o funcionamento do aparato fotossintético nas etapas relacionadas ao transporte de elétrons nas membranas dos tilacóides dos cloroplastos como  $PI_{total}$  e  $PI_{ABS}$  (Taiz e Zeiger, 2013). Estes parâmetros são sensíveis a estresse ou a um

desequilíbrio nutricional, especialmente, quanto a N (Gonçalves e Santos Junior, 2005; Taiz e Zeiger, 2013), como observado nos sintomas visuais.

Ausência de efeito das diferentes formas de N sobre os parâmetros fotossintéticos também foi observado no estudo de Guimarães et al. (2014) em *Eucalyptus urophylla*, exceto no IRC SPAD. Bown et al (2010) relataram que taxas mais altas de fotossíntese estavam associadas ao nitrato, em comparação com a nutrição de amônio em mudas de *Pinus radiata*. Tal comportamento não foi observado neste estudo.

O suprimento adequado de N beneficia a captura de fótons pelas moléculas de clorofila, na etapa fotoquímica da fotossíntese, evidenciado, no presente estudo, mediante as variáveis de fluorescência da clorofila *a* (Eichelmann et al. 2005). Esses parâmetros foram utilizados para investigar danos causados por vários tipos de estresses sobre a capacidade fotossintética das plantas e mais especificamente para avaliar os efeitos no aparato fotossintético (Torres Neto et al., 2005).

Esses resultados realçam que essas variáveis foram pouco influenciadas pelas proporções de  $\text{N-NO}_3^-:\text{N-NH}_4^+$ . Tsbarducas et al. (2017) menciona que a fotoinibição de PSII, provavelmente, não é responsável pela sensibilidade diferencial da forma de N. No entanto, as mesmas são dependentes do fornecimento de N. Tal premissa é confirmada pelos baixos valores observados no tratamento sem N em todas as variáveis testadas (Figura 3).

### *Crescimento da planta*

O comportamento da espécie na condição 40:60 (%) de  $\text{N-NO}_3^-:\text{N-NH}_4^+$ , provavelmente, se deve a nutrição conjunta de nitrato e amônio, o que favorece o melhor crescimento vegetal.

A assimilação de  $\text{NH}_4^+$  tem um menor gasto de energia metabólica, por não requerer a ação da redutase do nitrato, não envolvendo uma transferência de 10 protons e 8 elétrons, tendo

economia de 9% em relação a assimilação de  $\text{NO}_3^-$  (Britto e Kronzucker, 2002; Fageria, 2005) e por ser incorporado prontamente em compostos de carbono pelas rotas da sintetase da glutamina e sintase do glutamato (Bijlsma et al., 2000; Viégas e Silveira, 2002).

As plantas cultivadas com  $\text{NH}_4^+$  economizam cerca de 7,6-11,9% do custo total de crescimento na assimilação do N na raiz e 3,00 - 6,1% na parte aérea, em comparação com as plantas cultivadas com  $\text{NO}_3^-$  (Gerendás et al., 1997). Li et al. (2013) mencionam ainda que quando ambas as formas são fornecidas é maior a produção de massa seca, consequentemente, com o aumento na aérea foliar. No entanto, o tratamento 40:60 (%) de N- $\text{NO}_3^-$ :N- $\text{NH}_4^+$  não diferenciou significativamente das demais proporções.

O nitrato é considerado a principal forma de N disponível para as plantas (Li et al., 2013). Contudo, as plantas de cedro não apresentaram preferência por nenhuma das formas estudadas, apenas houve maiores valores de crescimento para as plantas cultivadas com maior proporção de amônio (60%), provavelmente, devido ao fato da espécie ocorrer em áreas onde predominam solos ácidos e, conseqüente, predomina o N- $\text{NH}_4^+$ . Britto e Kronzucker (2002) relatam que um pré-requisito para a tolerância ao  $\text{NH}_4^+$  é a tolerância das plantas a solos ácidos, uma vez que solos ricos em  $\text{NH}_4^+$  apresentam solos com pH baixo.

Os maiores valores de MSR e RRPA no tratamento sem fornecimento de N pode ser explicado como uma estratégia da planta em busca deste nutriente no substrato, o que resulta em prejuízo das reservas da parte aérea, porque ocorre uma mudança da alocação de carbono para o sistema radicular (Zonta et al., 2006). Conseqüentemente, maior o crescimento radicular de cedro contribui para maior valor de RRPA. Li et al. (2013) destacaram que a MSR tende a ter um acréscimo, quando as plantas estão em estado de estresse de N, diminuindo absorção de nutrientes e de  $\text{CO}_2$ .

Os menores valores para MSPA e AF observados na ausência de N, possivelmente, são em decorrência do N estar diretamente ligado à fotossíntese, já que grande parte do N das folhas

está alocado nas proteínas envolvidas no processo fotossintético (Larcher, 2006) e por apresentar menor teor foliar de N (Evans e Seemann, 1989). O N estimula o crescimento foliar por aumentar a divisão celular e a fotossíntese, devido à maior quantidade de componentes das reações fotoquímicas e daqueles responsáveis pela assimilação de CO<sub>2</sub> (Lawlor, 2002).

Tsabarducas et al. (2017) relatam que o peso seco das folhas foi decrescendo a medida que a concentração de nitrato aumentava, e que com as maiores concentrações de nitrato houve maior crescimento radicular, o que contrasta com nosso estudo. Apesar dos tratamentos das formas de N não apresentarem diferença significativa, o tratamento com 60% de amônio apresentou maior MSPA e MSR.

Portanto, de acordo com as análises de crescimento, parâmetros fotossintéticos e teor de nitrogênio das plantas de cedro, o tratamento no qual a espécie obteve um melhor rendimento foi a proporção 40:60 (%) de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. No entanto, dada a baixa diferença entre as demais proporções, resultados satisfatórios podem ser alcançados com ambas as formas de N.

## CONCLUSÕES

*Cedrela odorata* é responsiva a nutrição de nitrogênio, no entanto o estado nutricional, fotossíntese e o crescimento das mudas são levemente influenciados pelas formas de N.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, S.E, Terman, G.L e Clements, L.B. (1976) Greenhouse techniques for soil-plant-fertilizer research. p. 55. *Muscle Shoals: National Fertilizer Development Center*.
- Almeida, A.N.D., Angelo, H., Silva, J.C.G.L.D. e Hoeflich, V.A. (2010) Mercado de madeiras tropicais: substituição na demanda de exportação. *Acta amazônica* 40: 119-126.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M. e Sparovek, G. (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 22 (6): 711–728.



- Barroso, D.G., Figueiredo, F.A.M.M.A., Pereira, R.C., Mendonça, A.V.R. e Silva, L.C. (2005) Diagnóstico de deficiências de macronutrientes em mudas de teca. *Revista Árvore*, 29 (5): 671-679,
- Bijlsma R.J., Lambers H. e Kooijman, S. (2000) A dynamic whole-plant model of integrated metabolism of nitrogen and carbon. Comparative ecological implications of ammonium-nitrate interactions. *Plant and Soil*. 220 (1):49-69.
- Bouyoucos, G.J. (1927) The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soil. *Soil Science*. 23:343-349.
- Bown, H.E., Watt, M.S., Clinton, P.W. e Mason, E.G. (2010). Influence of ammonium and nitrate supply on growth, dry matter partitioning, N uptake and photosynthetic capacity of *Pinus radiata* seedlings. *Trees*, 24: 1097–1107.
- Bredemeier, C. e Mundstock, C.M. (2000) Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. *Ciência Rural*, Santa Maria. 30 (02): 365-372.
- Britto, D.T. e Kronzucker, H.J. (2002)  $\text{NH}_4^+$  toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of Plant Physiology*. 159, 567–584.
- Carrero, G.C., Pereira, R.S., Jacaúna, M.A. e Lima Junior, M.J. (2014) Árvores do Sul do Amazonas: guia de espécies de interesse econômico e ecológico. Manaus: *IDESAM*.
- Carvalho, M.A. (1985) Eficiência de dispersantes na análise textural de materiais de solos com horizontes B Latossólico e B textural. Lavras: ESAL. 79p. Tese de Mestrado.
- Cervi, A.C., Linsingen, L.V. e Patricio, C.P. (2008) O gênero *Cedrela* P. Browne (Meliaceae) no sul do Brasil. *Acta Biológica Paranaense*. 37 (1, 2): 105-110.
- CFSEMG – Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. (1999) Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª aproximação. p. 359. Viçosa: CFSEMG.
- Chapman, S.C. e Barreto, H.J. (1997) Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth. *Agronomy Journal*. 89 (4): 557-562.
- Crawford, N.M. (1995) Nitrate: nutrient and signal for plant growth. *The Plant Cell*, Rockville. 7: 859-868.

- Desotgiu, R., Pollastrini, M., Cascio, C., Gerosa, G., Marzuoli, R. e Bussotti, F. (2012) Chlorophyll a fluorescence analysis along a vertical gradient of the crown in a poplar (Oxford clone) subjected to ozone and water stress. *Tree physiology*. 32: 976-986
- Eichelmann, H., Oja, V., Rasulov, B., Padu, E., Bichele, I., Pettai, H., et al. (2005) Adjustment of leaf photosynthesis to shade in a natural canopy: reallocation of nitrogen. *Plant, Cell and Environment*, Oxford, 28:389-401.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2006) *Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2 ed. p. 306. Rio de Janeiro: *Embrapa Solos*.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2009) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.
- Epstein, E. e Bloom, A. (2006) Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. Londrina: Planta. 184-200.
- Evans, J.R. (1989) Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of c3 plants. *Oecologia*. 78: 9-19.
- Fageria, N.K. (2005) Soil Fertility and Plant Nutrition Research Under Controlled Conditions: Basic Principles and Methodology. *Journal of Plant Nutrition*. 28 (11): 1975-1999.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C. e Li, Y.C. (2008) The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. *Journal of Plant Nutrition*. 31: 1121-1157.
- Figueiredo, F.A.M.A., Carneiro, J.G.A., Penchel, R.M., Campostrini, E., Thiebaut, J.T.L. e Barroso, D.G. (2014) Trocas gasosas, relações hídricas e eficiência fotoquímica em mudas clonais de eucalipto com permanência prolongada em tubetes. *Scientia Forestalis*. 42 (104): 533-542.
- Freiberger, M.B., Guerrini, I.A., Galetti, G., Fernandes, D.M. e Corrêa, J.C. (2013) Crescimento inicial e nutrição de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) em função de doses de nitrogênio. *Revista. Árvore*. 37 : 385-392.

- Gerendás, J., Zhu, Z., Bendixen, R., Ratcliffe, R.G. e Sattelmacher, B. (1997) Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants. *Z. Pflanzenernahr. Bodenk.* 160: 239–251.
- Gonçalves, E.O., Paiva, H.N., Neves, J.C.L. e Gomes, J.M. (2012) Nutrição de mudas de angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (BENTH.) BRENAN) submetidas a doses de N, P, K, Ca e Mg. *Revista Árvore.* 36 (2): 219-228.
- Gonçalves, J.F.C. e Santos Junior, U.M. (2005) Utilization of the chlorophyll a fluorescence technique as a tool for selecting tolerant species to environments of high irradiance. *Brazilian Journal Plant Physiology.* 17: 307-313.
- Guidi, L., Loreface, G., Pardossi, A., Malorgio, F., Tognoni, F. e Soldatini, G.F. (1998) Growth and photosynthesis of *Lycopersicon esculentum* (L.) plants as affected by nitrogen deficiency. *Biologia Plantarum, Prague,* 40: 235-244.
- Guimarães, M.M.C., Cairo, P.A.R. e Neves, O.S.C. (2014) Crescimento de *Eucalyptus urophylla* em Meio Hidropônico com diferentes proporções de nitrato e amônio. *Floresta e Ambiente.* 21 (1):52-61.
- Gullison, R.E., Panfil, S.N., Struose, J.J. e Hubbell, S.P. (1996) Ecology and management of mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in the Chimanes Forest, Beni, Bolivia. *Botanical Journal of the Linnean Society.* 122: 9-34.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Moller, T.S. e White, P. (2012) Functions of Macronutrients. In: Marschner P. (eds). *Marschner's mineral nutrition of higher plants.* New York. p.135-189.
- Konnerup, D. e Brix, H. (2010) Nitrogen nutrition of *Canna indica*: Effects of ammonium versus nitrate on growth, biomass allocation, photosynthesis, nitrate reductase activity and N uptake rates. *Aquatic Botany.* 92: 142–148.
- Larcher, W. (2006) *Ecofisiologia Vegetal.* São Carlos: RIMA. 531p.
- Lawlor, D.W. (2002) Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to understanding production systems. *Journal of Experimental Botany.* Lancaster. 53 (370): 773-787.
- Li, S.X., Wang, Z.H. e Stewart, B.A. (2013) Responses of crop plants to ammonium and nitrate N. In: Sparks DL, ed. *Advances in agronomy.* pp. 205-398. Waltham, MA, USA: *Elsevier Academic Press.*

- Locatelli, M., Macedo, R.S. e Vieira, A.H. (2006) Caracterização de sintomas de deficiências em cedro rosa (*Cedrela odorata* L.). *EMBRAPA*, Circular Técnica, Porto Velho.
- Loque, D. e Wirén, N.V. (2004) Regulatory levels for the transport of ammonium in plant roots. *Journal of Experimental Botany*, Oxford. 55 (401): 1293-1305.
- Luchi, A.E (2011) Quantitative feature so *Cedrela odorata* L. wood (Meliaceae). *Revista Brasileira de Botânica*. 34(3): 403-410.
- Malavolta, E. (1980) Elementos de nutrição mineral de plantas. p. 251. São Paulo: *Agronômica Ceres*,
- Malavolta, E. e Moraes, M.F. (2007) Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: Yamada, T, Abdalla, SRS e Vitti, GC (Org.) Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira. pp. 189-249. Piracicaba: *International Plant Nutrition Institute - Brasil*.
- Malavolta, E., Vitti, G.C. e Oliveira, A.S. (1997) Avaliação do estado nutricional de plantas: Princípios e aplicações. p.308. Piracicaba, Potafos.
- Malik, A.I., e Rengel, Z. (2013) Physiology of Nitrogen-Use Efficiency. Sattelmacher, pp. 105–121.
- Marenco, R.A., Antezana-Vera, A.S., Gouvêa, P.R.S., Camargo, M.A.B., Oliveira, M.F. e Santos, J.K.S. (2014) Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. *Revista Ceres*. 61: 786-789.
- Marschner, H. (2012) Mineral nutrition of higher plants. p. 889 2 ed. London: Academic Press.
- Melém Junior, N., Mazza, A., Dias, C.T.S. e Briske, E.G. (2001) Efeito de fertilizantes nitrogenados na acidificação de um Argissolo vermelho amarelo latossólico distrófico cultivado com milho. *Ciência e Tecnologia*. 2 (1): 75-89.
- Miller, A.J. e Cramer, M.D. (2005) Root nitrogen acquisition and assimilation. *Plant Ecophysiology*, Paranaque. 4: 1-36.
- Moreira, A. e Fageria, N.K. (2009) Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40: 2912–2925.
- Moretti, B.S., Furtini Neto, A.E., Pinto, S.I.C., Furtini. I.V. e Magalhães, C.A.S. (2011) Crescimento nutrição mineral de mudas de Cedro Australiano (*Toona ciliata*) sob omissão de nutrientes. *Cerne*, Lavras, 17 (4): 453-463.

- Nacry, P., Bouguyon, E. e Gojon, A. (2013) Nitrogen acquisition by roots: physiological and developmental mechanisms ensuring plant adaptation to a fluctuating resource. *Plant and Soil*, 370 (1): 1–29.
- Nascimento, H.H.C., Pacheco, C.M., Lima, D.R.M., Silva, E.C. e Nogueira, R.J.M.C. (2014). Aspectos ecofisiológicos de mudas de *Hymenaea courbaril* L. em resposta a supressão de N, P e K. *Scientia Forestalis*. 103: 315-328.
- Nicoloso, F.T., et al. 2001. Nutrição mineral de mudas de grápia (*Apuleia leiocarpa*) em Argissolo Vermelho distrófico arênico: efeito da adubação NPK no crescimento. *Ciência Rural*, Santa Maria, 31 (6): 991-998.
- Quesada, C.A., Lloyd, J., Anderson, L.O., Fyllas, N.M., Schwarz, M. e Czimczik, C.I. (2011) Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*. 8.
- Rothstein, D.E. e Cregg, B.M. (2005). Effects of nitrogen form on nutrient uptake and physiology of Fraser fir (*Abies fraseri*). *Forest Ecology and Management*, 219, 69–80.
- Rufty Junior, T.W., Huber, S.C. e Volk, R.J. (1988) Alterations in leaf carbohydrate metabolism in response to nitrogen stress. *Plant Physiology*, Bethesda, 88: 725-730.
- Santos Júnior, U.M., Gonçalves, J.F.C. e Feldpausch, T.R. (2006) Growth, leaf nutrient concentration and photosynthetic nutrient use efficiency in tropical tree species planted in degraded areas in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 226: 299-309.
- Schadchina, T.M. e Dmitrieva, V.V. (1995) Leaf chlorophyll content as a possible diagnostic mean for the evaluation of plant nitrogen uptake from the soil. *Journal of Plant Nutrition*, 18:1427-1437.
- Shan, A.Y.K., Oliveira, L.E.M., Bonome, L.T.S. e Mesquita, A.S. (2012). Assimilação metabólica de nitrogênio em plântulas de seringueira cultivadas com nitrato ou amônio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 47 (6): 754-762.
- Souza, S.R. e Fernandes, M.S. (2006) IX - Nitrogênio. In: Fernandes, MS, ed. Nutrição mineral de plantas. pp. 215-252. Viçosa MG, *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*.
- Stoking, C.R. e Ongun, A. (1962) The intracellular distribution of some metallic elements in leaves. *American Journal of Botany*, 49 (3): 284-289.

- Strasser, R.J., Tsimilli-Michael, M., Giang, S. e Goltsev, V. (2010) Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)- Bioenergetics*, 1797: 1313-1326.
- Taiz, L. e Zeiger, E. (2013) Fisiologia Vegetal. 5a. ed. Tradução: Armando Molina Divan Junior et al. p. 918. Porto Alegre: Artmed.
- Torres Netto, A., et al. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves 2005. *Scientia Horticulturae*. 104 (02): 199-209.
- Tsabarucas, V., Chatzistathisa, T., Theriosa, I. e Patakas, A. (2017). How nitrogen form and concentration affect growth, nutrient accumulation and photosynthetic performance of *Olea europaea* L. (cv. 'Kalamon'). *Scientia Horticulturae* 218, 23–29.
- Viégas, I.J.M., Lobato, A.K.S., Rodrigues, M.F.S., Cunha, R.L.M., Frazão, D.A.C., Neto, C.F., et al. (2012) Visual symptoms and growth parameters linked to deficiency of macronutrients in young *Swietenia macrophylla* plants. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 10: 937-940.
- Viégas, R.A. e Silveira, J.A.G. (2002) Activation of nitrate reductase of cashew leaf by exogenous nitrite. *Tree Physiology*. 14 (1): 39-44.
- Wallau, R.L.R., Borges, A.R., Almeida, D.R. e Camargos, S.L. (2008). Sintomas de deficiências nutricionais em mudas de mogno cultivadas em solução nutritiva. *Cerne*, 14 (4): 304-310.
- Wang, B. e Shen, Q. (2012). Effects of ammonium on the root architecture and nitrate uptake kinetics of two typical lettuce genotypes grown in hydroponic systems. *Journal of Plant Nutrition*, 35:10, 1497-1508.
- Yusuf, M.A., Kumar, D., Rajwanshi, R., Strasser, R.J., Tsimilli-Michael, M., Govindjee; Sarin, N.B. (2010). Overexpression of  $\gamma$ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic *Brassica juncea* plants alleviates abiotic stress: Physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1797: 1428–1438, 2010.
- Zonta, E., Brasil, F.C., Goi, S.R. e Rosa, M.M.T. (2006). O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: Fernandes, M. S. (ed.). *Nutrição Mineral de Plantas*. pp. 07-52. Viçosa, MG: *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*.