

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

RODRIGO BAZZARELLA PAULUCIO

**CLASSIFICAÇÃO DE PROGÊNIES DE *Eucalyptus grandis* QUANTO A AQUISIÇÃO
DE FÓSFORO**

VIÇOSA – MINAS GERAIS
2017

RODRIGO BAZZARELLA PAULUCIO

**CLASSIFICAÇÃO DE PROGÊNIES DE *Eucalyptus grandis* QUANTO A AQUISIÇÃO
DE FÓSFORO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Viçosa como parte das
exigências para a obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo. Modalidade: Trabalho Científico.

Orientador: Júlio César Lima Neves

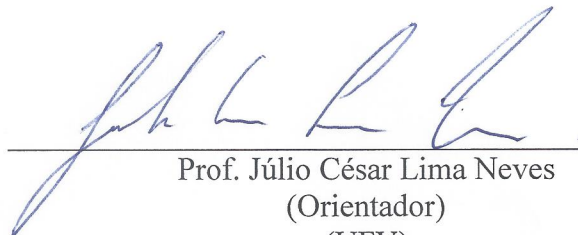
Coorientadora: Nathália Faria da Silva

RODRIGO BAZZARELLA PAULUCIO

**CLASSIFICAÇÃO DE PROGÊNIES DE *Eucalyptus grandis* QUANTO A AQUISIÇÃO
DE FÓSFORO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Viçosa como parte das
exigências para a obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo. Modalidade: Trabalho Científico.

APROVADO: 06 de junho de 2017.



Prof. Júlio César Lima Neves
(Orientador)
(UFV)

RESUMO

PAULUCIO, Rodrigo Bazzarella, Universidade Federal de Viçosa, junho de 2017.
Classificação de progênies de *Eucalyptus grandis* quanto a aquisição de fósforo.
Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientadora: Nathália Faria da Silva.

Estudos de cinética de absorção de nutrientes em solução têm sido utilizados na determinação dos parâmetros cinéticos de absorção, V_{max} , K_m e C_{min} , que compõem juntamente com características morfológicas de raiz, os parâmetros utilizados para caracterizar diferentes genótipos quanto a eficiência de absorção de determinado nutriente por uma cultura. O objetivo deste trabalho foi caracterizar diferentes progênies de *Eucalyptus grandis* quanto a aquisição de fósforo (P), por meio do influxo de P sob diferentes concentrações do nutriente em solução, e recomendar cada genótipo a sítios de implantação com características favoráveis quanto ao recurso solo. Para isso foram estimados os parâmetros V_{max} , K_m , C_{min} , e o Poder de absorção de P (α) por 11 progênies de *Eucalyptus grandis*, a partir dos resultados de experimento de cinética de absorção conjunta de P e K, e dos parâmetros morfológicos de raiz, massa de matéria seca, massa de matéria fresca e área superficial de raízes finas. A partir dos parâmetros cinéticos de absorção de P expressos em termos de área superficial de raízes finas, foram estimados os influxos de P para diferentes concentrações do nutriente em solução, englobando uma faixa decrescente de concentração, a partir de $30 \mu\text{mol/L}$ de P. Com os valores estimados de influxo de P, as progênies foram classificadas quanto à velocidade de absorção de P, em diferentes condições de disponibilidade do nutriente, envolvendo três faixas de concentrações de P, de 30 a $1 \mu\text{mol/L}$, de 30 a $7 \mu\text{mol/L}$ e de 7 a $1 \mu\text{mol/L}$ de P. Dentro das três faixas de concentrações consideradas no presente trabalho, a maior concentração, de $30 \mu\text{mol/L}$, foi associada a uma condição de mais alta disponibilidade de P na solução do solo, a concentração intermediária de $7 \mu\text{mol/L}$, foi associada a uma condição de média disponibilidade de P em solução, e a menor concentração de P, de $1 \mu\text{mol/L}$, foi associada a uma condição de mais baixa disponibilidade do nutriente na solução do solo. Em condições de campo, essas concentrações de P seriam muito baixas, sendo as associações com alta, média e baixa disponibilidade do nutriente em solução, realizada com base na magnitude desses valores de concentrações dentro da faixa utilizada no experimento de cinética de absorção, que partiu do limite máximo de $30 \mu\text{mol/L}$ de P. As progênies 2 e 5 apresentaram influxo de P superiores à média das 11 progênies, em todas as

três faixas de concentrações de P testadas, o que se deve aos valores superiores de V_{max} apresentados por ambas as progênies, e indica maior adaptação a diferentes condições de disponibilidade de P no solo. A progênie 1 apresentou influxo de P superior na faixa de 7 a $1 \mu\text{mol/L}$ de P, e a progênie 9 na concentração de $1 \mu\text{mol/L}$ de P, condições estas associadas a menor disponibilidade de P em solução, o que se deve ao menor valor de K_m apresentado por ambas as progênies, e indica maior adaptação às condições da maioria dos solos tropicais de textura mais argilosa, com menor fator intensidade de P. As progênies 3, 4, 6, 7, 8 e 11 apresentaram valores de influxo de P próximos à média das 11 progênies, nas três faixas de concentração de P testadas. A progênie 10 apresentou influxo de P inferior à média das 11 progênies nas três faixas de concentração de P, devido ao menor valor de V_{max} apresentado por essa progênie, o que indica a sua utilização em solos com melhor fertilidade natural, ou com fertilidade construída.

Palavras-chave: Cinética de Absorção de P, nutrição mineral, eficiência nutricional.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 MATERIAL E MÉTODOS	7
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
3.1 Estimativa dos Parâmetros Cinéticos de Absorção de P (Vmax, Km e Cmin)	11
Tabela 1. Equações de regressão da Q_P (μmol) em função do tempo de depleção (t em horas).	14
Tabela 2. Valores estimados de Vmax, Km, Cmin e α de 11 progênies de <i>Eucalyptus grandis</i>	17
Tabela 3. Valores médios de influxo de P em 11 progênies de <i>Eucalyptus grandis</i>	18
3.2 Influxo de P pelas 11 progênies de <i>Eucalyptus grandis</i> em diferentes concentrações de P em solução	19
Tabela 4. Recomendação de utilização das 11 progênies de <i>Eucalyptus grandis</i> em função de características favoráveis quanto ao recurso solo do sítio de implantação.....	20
4 CONCLUSÃO	22
5 REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas representam atualmente um importante ramo do agronegócio brasileiro, constituindo uma fonte de matéria prima renovável para diferentes ramos da indústria. Segundo relatório publicado por IBÁ (2016), o setor florestal brasileiro tem tido destaque no cenário mundial nos últimos anos, por possuir extensas áreas de florestas nativas e plantadas, com cerca de 7,8 milhões de hectares ocupados com espécies plantadas em 2015, área responsável pela produção de 91 % de toda a madeira utilizada para fins industriais no país.

Apesar dos bons resultados obtidos pelo setor florestal brasileiro, este tem apresentado uma tendência de aumento em seus custos de produção. Em 2015, o setor florestal apresentou uma inflação de 12,8 % pelo Índice Nacional de Custos da Atividade Florestal, valor superior em comparação a inflação nacional, de 10,7 % pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor, o que representa uma elevação superior dos custos do setor de árvores plantadas em comparação à média de aumento dos custos e preços observados no Brasil em 2015 (IBÁ, 2016).

As características da maioria dos solos tropicais predominantes no Brasil, com avançado estágio de intemperismo, baixa retenção de cátions e elevado caráter drenoso para fósforo (P), e a exigência do eucalipto quanto ao P, principalmente no início de seu desenvolvimento, fazem da adubação fosfatada um dos condicionantes de produtividade e um importante componente dos custos de produção.

Assim, frente ao aumento nos custos de produção, a utilização de materiais genéticos com características de aquisição e utilização de P adaptadas as condições do recurso solo do sítio de implantação, torna-se uma importante alternativa para a redução dos custos de produção e economia nos gastos com fertilizantes minerais.

A eficiência nutricional de um genótipo para determinado nutriente incorpora a sua eficiência de absorção e de utilização pela planta, sendo influenciada por fatores ligados ao clima, ao solo, e a planta, e que afetam também a produtividade da cultura (FAGERIA, 1998).

Na determinação da eficiência de absorção de um nutriente por determinado genótipo, estudos de cinética de absorção do nutriente em solução tem tido grande importância. Através desses experimentos são determinadas as constantes cinéticas de absorção, expressas pelo V_{max} , K_m e C_{min} . O V_{max} representa a velocidade de absorção do íon por unidade de massa, comprimento ou superfície de raiz, quando todos os sítios do carreador na membrana estão ocupados pelo íon; O K_m representa a afinidade do carreador na membrana pelo íon a

ser absorvido, ou a concentração deste em solução que condiciona metade de V_{max} ; e o C_{min} representa a concentração mínima do íon em solução (RUIZ, 1985; SILVA, 2017), a partir da qual se cessa a ocorrência de influxo líquido do íon (FERNANDES & SOUZA, 2006).

O influxo, ou a velocidade de absorção de um íon em solução, segue a cinética de Michaelis-Mentem (EPSTEIN, 1975), que se constitui a base dos estudos de depleção. A partir desses estudos, por meio de um processo gráfico-matemático, pode-se relacionar através de equações de regressão, a diminuição da quantidade do íon em solução com o tempo de contato entre a solução de depleção e o sistema radicular da planta, o que possibilita a determinação dos valores de V_{max} e K_m (RUIZ, 1985). Com as constantes cinéticas de absorção determina-se o influxo do íon pelo sistema radicular das plantas, bem como o seu poder de absorção (α), que caracterizam a eficiência de absorção de um íon por determinada progênie.

Assim, variações nos parâmetros cinéticos de absorção de P (V_{max} , K_m e C_{min}) por diferentes genótipos, podem resultar em diferenças nas taxas médias de influxo do nutriente entre as progênies de eucalipto, e possibilitar a seleção de materiais genéticos superiores, com maior influxo de P em diferentes condições de disponibilidade deste nutriente.

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar diferentes progênies de *Eucalyptus grandis* quanto a aquisição de P, através do influxo de P sob diferentes concentrações do nutriente em solução, e recomendar cada genótipo a sítios de implantação com características favoráveis quanto ao recurso solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido a partir de dados gerados em experimento de cinética de absorção conjunta de fósforo e potássio por diferentes progênes de *Eucalyptus grandis* (SILVA, 2017).

O referido experimento foi conduzido pela Pesquisadora Nathália Faria da Silva em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, utilizando mudas de 11 progênes de *Eucalyptus grandis*, e seguiu a sequência de procedimentos descritos a seguir, adaptados de SILVA (2017):

As mudas foram obtidas por meio de sementes, com germinação em sementeira de areia por cerca de 45 d. Posteriormente, as mudas tiveram o sistema radicular lavado, e foram transferidas para vasos com capacidade para 10 L, em número de duas mudas por vaso, com sistema de aeração e solução nutritiva de Clark (CLARK, 1975), adaptada por LOCATELLI et al. (1984), a qual foi submetida a monitoramento diário de pH, mantendo-o próximo a 5,8 ($\pm 0,2$), com trocas de solução semanalmente.

Após 54 d de cultivo em casa de vegetação, as mudas foram selecionadas quanto à uniformidade de raízes e parte aérea, e aclimatadas por uma semana em câmara de crescimento, com condições controladas (temperatura de aproximadamente 27 °C (± 2) e intensidade luminosa de aproximadamente 120 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), onde foram transferidas para vasos com capacidade para 2 L de solução nutritiva de Clark (CLARK, 1975), adaptada por LOCATELLI et al. (1984), com pH ajustado à faixa de 5,8 ($\pm 0,2$). Assim, na câmara de crescimento, as 11 progênes foram arranjadas em blocos ao acaso com três repetições. A aplicação de P e K foi realizada em conjunto, tendo como unidade experimental um vaso contendo duas plantas.

Após o período de aclimação, no sétimo dia, as plantas foram submetidas a um estresse nutricional induzido, mediante a troca da solução nutritiva por uma nova solução, sem a presença de P e K, procedendo-se no oitavo dia o início do estudo de cinética de absorção

conjunta de P e K. O procedimento teve início com a substituição da solução por uma solução de pré-exaustão, contendo as concentrações aproximadas de P (30 $\mu\text{mol/L}$), K (100 $\mu\text{mol/L}$), Ca (20 $\mu\text{mol/L}$) e B (2 $\mu\text{mol/L}$), utilizando como fontes o fosfato de potássio dibásico, cloreto de potássio, ácido bórico e cloreto de cálcio, ficando esta solução em contato com as plantas por 2 h. Após esse período, a solução foi novamente substituída por uma de mesma composição, denominada solução de depleção. Esta solução foi amostrada (alíquotas de 10 mL) em intervalos de 30 min, durante um período de 12 h, procedendo-se a última amostragem 24 h após a retirada da primeira alíquota da solução de depleção.

Após a última amostragem da solução de depleção, as plantas foram mensuradas quanto ao diâmetro do coleto (mm) e a altura da parte aérea (cm), colhidas e separadas em raízes e parte aérea, e submetidas a pesagem, para determinação da massa de matéria fresca. Foi também realizada a medição do volume remanescente da solução de depleção (L), em cada unidade experimental.

A determinação dos teores de P nas alíquotas amostradas foi realizada por colorimetria (BRAGA & DEFELIPO, 1974), em espectrofotômetro de absorção molecular.

O sistema radicular foi amostrado retirando-se desde sua parte superior até o final fragmentos, de forma a representar o sistema radicular total. Esses fragmentos foram acondicionados em potes plásticos com álcool 25 %, e armazenadas em geladeira para posterior avaliação do comprimento, área de superfície e diâmetro médio radicular, por meio do sistema WinRHIZO Pro 2009, acoplado a um scanner profissional Epson XL 10000 equipado com uma unidade de luz adicional (TPU).

Fonte: Adaptado de SILVA (2017) p.10-14.

Com as médias das concentrações de P nas alíquotas amostradas nas três repetições, em cada tempo de coleta, o volume inicial de 2 L da solução de depleção, as médias dos volumes remanescentes da solução de depleção após as 24 h, e as médias dos parâmetros

morfológicos obtidos a partir dos dados de massa de matéria seca de raiz, massa de matéria fresca de raiz, e área superficial de raízes finas, das três repetições de cada progênie, foram estimados os parâmetros cinéticos de absorção de P, por meio do Software Cinética, Versão 1.0 (RUIZ & FERNANDES FILHO, 1992). Para a estimativa dos parâmetros cinéticos com base na área superficial de raízes, foram consideradas as raízes finas, com diâmetro de até 2 mm.

A estimativa dos valores de V_{max} e K_m pelo Software Cinética é realizada por um processo gráfico-matemático, através do qual, a estimativa de V_{max} é realizada a partir de um modelo linear, e de K_m a partir dos modelos potencial, exponencial ou exponencial recíproco, que relacionam a diminuição da quantidade de P em solução (Q_P), em função do tempo de contato entre a solução de depleção e o sistema radicular das plantas (COMETTI et al, 2006). Assim, obteve-se o valor de V_{max} , que representa a velocidade máxima de absorção de P quando todos os sítios do carreador na membrana estão ocupados pelo íon, em termos relativos aos parâmetros morfológicos massa de matéria seca, massa de matéria fresca e área de superfície de raiz, e o valor de K_m , que é a concentração de P em solução que condiciona a metade de V_{max} , e representa a afinidade do carreador pelo íon na membrana.

O valor de C_{min} , ou a concentração mínima de P na solução externa onde se cessa o influxo líquido de P, foi obtido por meio do quociente entre a quantidade de P em solução (Q_P), e a média do volume remanescente da solução de depleção nas três repetições, após as 24 h do início da cinética de depleção. O valor de Q_P foi obtido substituindo o tempo de 24 h na equação exponencial ajustada pelo Software Cinética, para cada progênie.

Com os valores das constantes cinéticas de absorção de P, foram estimados para cada uma das 11 progênies o poder de absorção (α) e o influxo de P, conforme as **equações 1 e 2**. Para a estimativa do influxo de P, foram consideradas concentrações decrescentes do nutriente em solução, as quais variaram a taxa de 0,5 μmol , a partir de uma concentração máxima referente à 30 $\mu\text{mol/L}$ de P.

Equação 1. Poder de absorção de P (α).

$$\alpha = \frac{V_{max}}{K_m}$$

Equação 2. Influxo estimado de P.

$$\text{Influxo estimado de P} = \frac{V_{\max} \times ([P] - C_{\min})}{K_m + ([P] - C_{\min})}$$

$V_{\max} = \mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ ou $\mu\text{mol/cm}^2\cdot\text{h}$;

$K_m = \mu\text{mol/L}$;

$[P] = \mu\text{mol/L}$;

$C_{\min} = \mu\text{mol/L}$.

Foi utilizado o modelo exponencial para a escolha do K_m estimado pelo Software Cinética, bem como para a estimativa do valor da Q_P na última alíquota amostrada da solução de depleção, utilizado na determinação do valor de C_{\min} .

Os valores de V_{\max} , K_m , C_{\min} e α foram avaliados quanto ao coeficiente de variação, e a capacidade destes em diferenciar as progênies de eucalipto quanto a eficiência de absorção de P.

A partir dos valores de influxo estimados, as progênies foram classificadas quanto à velocidade de absorção de P em diferentes condições de disponibilidade do nutriente. Foram consideradas três faixas de concentrações de P, de 30 a 1 $\mu\text{mol/L}$, de 30 a 7 $\mu\text{mol/L}$ e de 7 a 1 $\mu\text{mol/L}$ de P.

Dentre os valores utilizados para definir os limites das três faixas de concentrações de P, a maior concentração, de 30 $\mu\text{mol/L}$, foi associada a uma condição de mais alta disponibilidade de P em solução, por ser a maior concentração para qual se estimou o valor de influxo de P. A concentração intermediária de 7 $\mu\text{mol/L}$, foi associada a uma condição de média disponibilidade de P em solução, e definida com base no valor médio de K_m das 11 progênies. A menor concentração de P considerada, de 1 $\mu\text{mol/L}$, foi associada a uma condição de mais baixa disponibilidade de P em solução, por se situar entre as menores concentrações de P para as quais se estimaram o influxo do nutriente. Esses valores de concentrações de P utilizadas nas três faixas seriam, em condições de solo, muito baixos, sendo as associações com alta, média e baixa concentração de P, feitas considerando a magnitude desses valores em relação as concentrações de P utilizadas no experimento de cinética de absorção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estimativa dos Parâmetros Cinéticos de Absorção de P (V_{max} , K_m e C_{min})

A variação da quantidade de P na solução de depleção (Q_P em μmol) ao longo do tempo de contato com o sistema radicular das plantas estão ilustradas na **figura 1**. As equações ajustadas pelo Software Cinética para a estimativa de V_{max} , K_m e C_{min} podem ser observadas na **tabela 1**. Procedeu-se a escolha do modelo exponencial para a estimativa de K_m e C_{min} por este ter apresentado melhor ajuste aos dados, na maioria das progêneses.

A **figura 1** ilustra o decréscimo da Q_P na solução de depleção, ao longo do tempo de contato com o sistema radicular das plantas, influência da variação da taxa de influxo médio de P de acordo com a concentração do nutriente em solução. No início do estudo, sob condição de mais alta concentração de P, observaram-se taxas de influxo muito próximas, causa do decaimento aproximadamente linear da Q_P . A partir de determinado ponto, com o avanço do tempo de depleção, a diminuição da Q_P passou a ocorrer a taxas decrescentes, indicando diminuição no influxo médio de P. Esse fato está ligado a redução da concentração de P em solução devido a absorção do nutriente pela planta (COMETTI et al., 2006), bem como à dinâmica do processo difusivo do nutriente na solução, que afeta o transporte do nutriente até a superfície radicular (NOVAIS & MELLO, 2007).

Em estudos de cinética de absorção de um íon em solução pouco concentrada, a velocidade de absorção segue a cinética de saturação, onde se observa elevado aumento na velocidade de absorção com o incremento externo do íon, passando esta a aumentar a taxas decrescentes à medida que se eleva a concentração do nutriente, até se tornar independente em relação a maiores aumentos na concentração do íon em solução (EPSTEIN, 1975). Assim, em condições de mais alta concentração de P na solução de depleção, o influxo do nutriente ocorre a taxas muito próximas, à medida que a concentração de P seja suficiente para manter o influxo próximo de V_{max} ; com o decaimento da concentração de P na solução de depleção, a taxa de influxo do nutriente é afetada, à medida que esta não seja suficiente para manter a taxa de influxo próxima de V_{max} (EPSTEIN, 1975; FERNANDES & SOUZA, 2006). Isso resulta no decréscimo da Q_P a taxas decrescentes, como observado nos modelos exponenciais na **figura 1**.

A variação observada na taxa de influxo, evidencia a importância dos parâmetros V_{max} e K_m para as condições de alta e baixa disponibilidade de P na solução do solo (fator intensidade de P), respectivamente (LIMA et al., 2005). No primeiro caso, um valor superior

de V_{max} possibilita um maior aporte do nutriente pelo sistema radicular da planta, tendo em vista condições favoráveis para a absorção. Em contrapartida, em condições de baixa disponibilidade do nutriente, o menor valor de K_m contribui para reduzir o efeito de queda na taxa de influxo de P devido a diminuição da concentração do nutriente em solução, uma vez que indica a necessidade de menor concentração de P para se atingir a metade de V_{max} , ou seja, maior afinidade pelo P em solução (EPSTEIN, 1975; FERNANDES & SOUZA, 2006).

Nesse sentido, materiais genéticos que apresentem maior valor de V_{max} e menor valor de K_m são desejáveis, por apresentarem maior taxa de influxo do nutriente, ou maior capacidade de absorção do nutriente assimilável, a fração do disponível sem limitação por transporte (ALVAREZ V., 1996), sob variadas condições de disponibilidade do nutriente na solução do solo (FERNANDES & SOUZA, 2006; LIMA et al., 2005).

Esse comportamento de rápido decréscimo da Q_p pôde ser observado, no presente trabalho, nas progênies 2 e 5, principalmente no modelo linear do gráfico de Q_p em função do tempo de depleção (**Figura 1**). Esse comportamento é vantajoso sobretudo em condições de solos tropicais, altamente intemperizados, que apresentam alto teor de óxidos de ferro e alumínio e alto fator capacidade de P (FCP), condições sob as quais menores concentrações de P são mantidas em solução, e onde valores inferiores de K_m impactam de forma positiva a taxa de influxo de P (NOVAIS & MELLO, 2007). Em contrapartida, a adubação localizada com fontes solúveis de P pode elevar momentaneamente a concentração do nutriente próximo às raízes, condição onde alto V_{max} é favorável, tendo em vista a diminuição da disponibilidade de P com o tempo de contato entre o ânion fosfato e a matriz do solo (NOVAIS et al., 2007). Em solos arenosos, o menor FCP e o maior fator intensidade de P, são condições favoráveis a plantas que apresentem maiores valores de V_{max} , por este favorecer uma rápida absorção do P assimilável em solução.

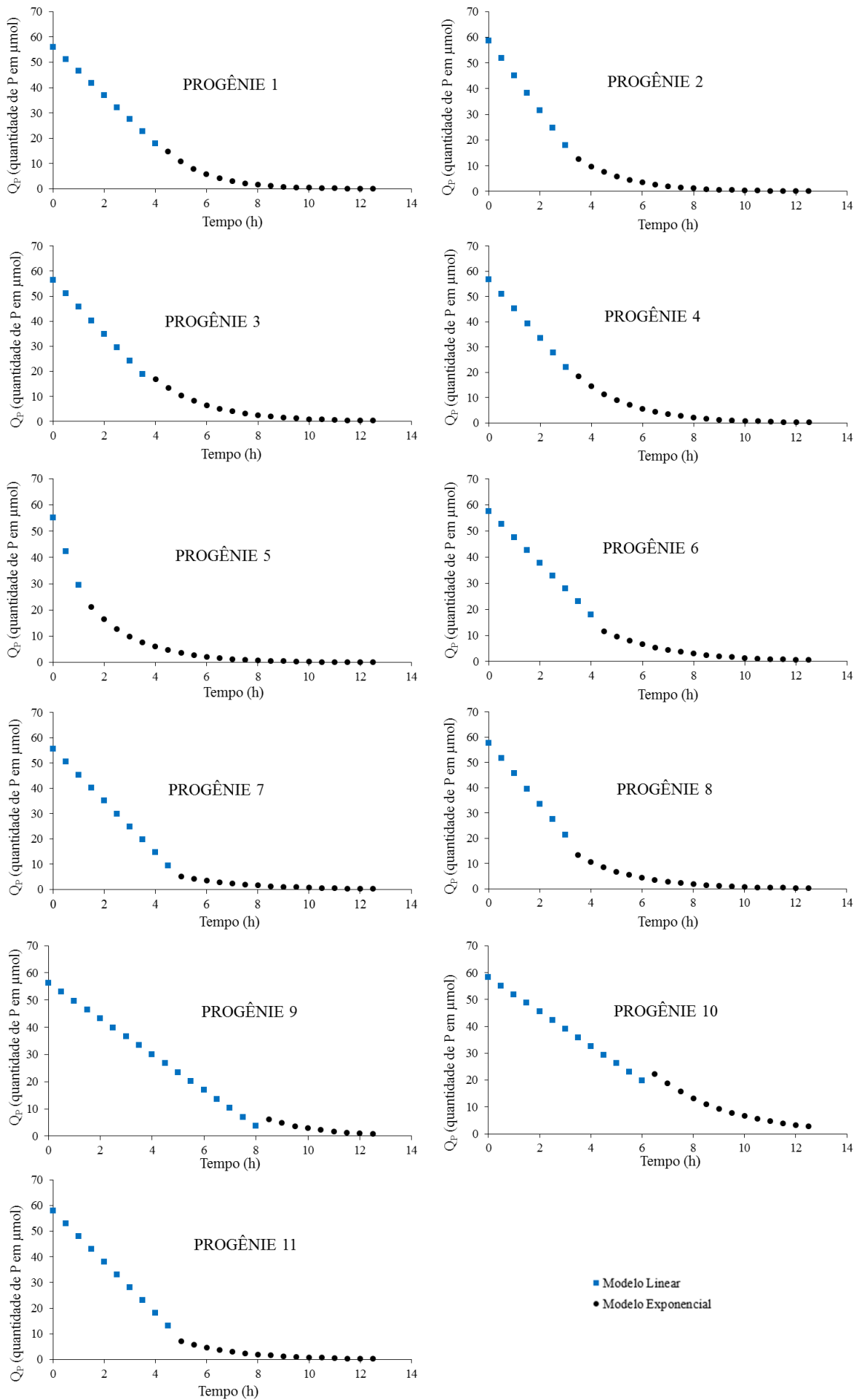


Figura 1. Gráficos do decréscimo da Q_P (μmol) em função do tempo de depleção (h).

Tabela 1. Equações de regressão da Q_p (μmol) em função do tempo de depleção (t em horas).

Progênie		Modelo	R^2
1	Linear	$Q_p = 55,9509 - 9,5077 t$	0,998
	Exponencial	$Q_p = 254,0288 \times e^{(-0,6308 t)}$	0,878
2	Linear	$Q_p = 58,5318 - 13,5050 t$	0,981
	Exponencial	$Q_p = 76,5762 \times e^{(-0,5142 t)}$	0,834
3	Linear	$Q_p = 56,3475 - 10,7321 t$	0,993
	Exponencial	$Q_p = 113,7222 \times e^{(-0,4771 t)}$	0,952
4	Linear	$Q_p = 56,7739 - 11,6207 t$	0,996
	Exponencial	$Q_p = 98,2012 \times e^{-0,4780 t}$	0,652
5	Linear	$Q_p = 55,1133 - 25,56 t$	0,914
	Exponencial	$Q_p = 44,7377 \times e^{(-0,5013 t)}$	0,893
6	Linear	$Q_p = 57,5140 - 9,8770 t$	0,998
	Exponencial	$Q_p = 64,9722 \times e^{(-0,3818 t)}$	0,782
7	Linear	$Q_p = 55,5845 - 10,2469 t$	0,983
	Exponencial	$Q_p = 33,6593 \times e^{(-0,3781 t)}$	0,497
8	Linear	$Q_p = 57,7086 - 12,1057 t$	0,999
	Exponencial	$Q_p = 63,8160 \times e^{(-0,4485 t)}$	0,940
9	Linear	$Q_p = 56,3016 - 6,5727 t$	0,974
	Exponencial	$Q_p = 489,1401 \times e^{(-0,5141 t)}$	0,729
10	Linear	$Q_p = 58,3223 - 6,4262 t$	0,990
	Exponencial	$Q_p = 215,9545 \times e^{(-0,3488 t)}$	0,547
11	Linear	$Q_p = 58,0175 - 9,9611 t$	0,994
	Exponencial	$Q_p = 59,2655 \times e^{(-0,4255 t)}$	0,537

Os parâmetros cinéticos de absorção de P e o poder de absorção de P (α) pelas 11 progênies de *Eucalyptus grandis* estão descritos na **tabela 2**. Comparando os valores dos parâmetros cinéticos quanto a variação em relação à média, os valores de Cmin foram os que apresentaram maior variação entre as progênies, seguidos de Vmax e de Km. Quanto aos valores de Vmax, estes foram expressos em termos relativos aos parâmetros fisiológicos de

raiz, massa de matéria seca, massa de matéria fresca e área superficial de raízes finas. Os valores expressos quanto à massa, tanto de matéria seca quanto de matéria fresca de raiz, apresentaram coeficientes de variação semelhantes entre as progênies (44,4 % e 44,7 %, respectivamente), e inferiores à V_{max} expressa em termos de área superficial de raízes finas (55,1 %). Assim, o valor de V_{max} expresso em relação a área superficial de raízes finas foi mais eficiente em diferenciar as progênies de eucalipto (**Tabela 2**).

Segundo NOVAIS & MELLO (2007), nas condições da maioria dos solos tropicais, caracterizados pelo forte dreno para P e alguns micronutrientes, a difusão desses íons na solução do solo torna-se um grande limitante para a sua absorção pela planta, onde, nessas condições, a taxa de crescimento de raiz torna-se muito importante para o processo de absorção. Assim, a maior variação entre as progênies quanto à superfície de raiz (CV 11,1 %), em comparação à massa seca (CV 9,0 %) e à massa fresca de raiz (CV 7,4 %), pode ter causado a maior variação observada entre as progênies quanto à V_{max} expressa em termos de área superficial de raízes finas, tendo em vista a maior área de contato entre o solo e as raízes absorventes quando estas apresentam maior área superficial de raiz, resultando em maior superfície de absorção.

O α foi estimado pela relação V_{max}/K_m . Essa relação é utilizada para caracterizar as progênies de eucalipto quanto à capacidade de absorver P, por integrar a máxima velocidade potencial de influxo de P, e a concentração necessária para se atingir a metade dessa velocidade máxima de influxo, ou a afinidade para com o P em solução. Assim, o valor de α se constitui um indicativo direto da eficiência com que a planta pode absorver o nutriente em solução (PINTO, 2009). No presente trabalho, os valores de α estimados a partir de V_{max} , em termos das três características morfológicas de raiz consideradas, apresentaram coeficientes de variação semelhantes, 23,9 % para massa de matéria seca de raiz, 22,2 % para massa de matéria fresca de raiz e 23,1 % para área superficial de raiz fina, mostrando a mesma capacidade em diferenciar as progênies de eucalipto (**Tabela 2**).

As médias dos influxos de P estimados para cada uma das 11 progênies, considerando concentrações decrescentes de P em solução, a partir de 30 $\mu\text{mol/L}$, estão descritas na **tabela 3**. A **figura 2** ilustra graficamente a variação do influxo de P, expresso por unidade de área superficial de raiz fina, em função da variação da concentração do nutriente na solução de depleção.

Os influxos de P estimados em termos de massa de matéria seca e massa de matéria fresca de raiz, apresentaram coeficientes de variação similares (31,5 % e 31,3 %, respectivamente).

respectivamente), e ligeiramente inferiores ao obtido com base na área superficial de raízes finas (39,1 %) (**tabela 3**), comportamento semelhante ao observado para os valores de V_{max} . Segundo BAPTISTA et al. (2000), a combinação de alta V_{max} e baixos K_m e C_{min} , associados a uma maior área radicular, são características desejáveis, por propiciar maior eficiência de absorção de nutrientes. Assim, considerando os valores de influxo de P expressos em termos de superfície de raiz fina, os maiores valores foram obtidos pelas progênies 2 e 5, e os menores pela progênie 10. Para a concentração de 30 $\mu\text{mol/L}$ de P, os influxos do nutriente foram 0,0033, 0,0065, e 0,0017 $\mu\text{mol/cm}^2\cdot\text{h}$ para as progênies 2, 5 e 10, respectivamente (**Figura 2**). Em termos de média, os influxos de P pelas progênies 2 e 5 foram 16,9 % e 110,8 % superiores à média das 11 progênies, respectivamente. Em contrapartida, o influxo médio de P pela progênie 10 foi 36,9 % inferior à média das 11 progênies (**Tabela 3**). Essa variação nos influxos entre as progênies pode ser explicada pela diferença quanto a V_{max} . No caso das progênies 2 e 5, estas apresentaram V_{max} de 0,0041 e 0,0093 $\mu\text{mol/cm}^2\cdot\text{h}$ respectivamente, valores 14,8 % e 160,3 % superiores à média de V_{max} pelas 11 progênies. Para a progênie 10, esta apresentou V_{max} de 0,0021 $\mu\text{mol/cm}^2\cdot\text{h}$, 41,2 % inferior à média de V_{max} das 11 progênies (**Tabela 2**).

A influência de V_{max} na taxa de influxo de P, e conseqüentemente na variação da Q_P na solução de depleção, pode ser observada na **figura 1**. Para as progênies 2 e 5, o maior valor de V_{max} resultou em taxas superiores de influxo, principalmente sob maiores concentrações de P em solução, resultando em rápida queda da Q_P , como indicado pelos maiores coeficientes angulares (em módulo) nos modelos lineares na **tabela 1**. O contrário é observado para a progênie 10, onde o menor valor de V_{max} resultou em menor taxa de influxo de P, e decréscimo menos acentuado da Q_P na solução de depleção, como indicado pelo menor coeficiente angular (em módulo) no modelo linear para a progênie 10, na **tabela 1**.

Tabela 2. Valores estimados de Vmax, Km, Cmin e α de 11 progênies de *Eucalyptus grandis*.

Progênie	Km	Vmax ⁽¹⁾	Vmax ⁽²⁾	Vmax ⁽³⁾	Cmin	$\alpha^{(4)}$	$\alpha^{(5)}$	$\alpha^{(6)}$
	$\mu\text{mol/L}$	$\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$	$\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$	$\mu\text{mol/cm}^2\cdot\text{h}$	$\mu\text{mol/L}$			
1	4,47	2,11	0,19	3,00E-03	6,07E-05	0,47	0,04	6,71E-04
2	7,31	2,27	0,24	4,10E-03	3,23E-04	0,31	0,03	5,61E-04
3	6,58	2,26	0,21	2,80E-03	1,17E-03	0,34	0,03	4,26E-04
4	6,98	2,10	0,19	3,20E-03	9,74E-04	0,30	0,03	4,58E-04
5	13,17	4,78	0,47	9,30E-03	2,47E-04	0,36	0,04	7,06E-04
6	7,32	2,01	0,18	3,10E-03	5,94E-03	0,28	0,03	4,23E-04
7	7,28	1,68	0,17	3,30E-03	3,52E-03	0,23	0,02	4,53E-04
8	7,52	2,24	0,21	3,30E-03	1,29E-03	0,30	0,03	4,39E-04
9	4,21	1,23	0,13	2,40E-03	1,94E-03	0,29	0,03	5,70E-04
10	6,14	1,19	0,12	2,10E-03	4,37E-02	0,19	0,02	3,42E-04
11	6,56	1,75	0,18	2,70E-03	1,94E-03	0,27	0,03	4,12E-04
Média	7,05	2,15	0,21	3,57E-03	5,56E-03	0,30	0,03	4,96E-04
Desvio Padrão	2,32	0,95	0,09	1,97E-03	0,01	0,07	0,01	1,15E-04
CV (%)	32,93	44,44	44,77	55,15	229,85	23,97	22,27	23,15
Faixa Normal	4,73	1,19	0,11	1,60E-03	-7,22E-03	0,23	0,02	3,82E-04
	9,37	3,10	0,30	5,54E-03	1,83E-02	0,38	0,04	6,11E-04

Km – Constante de Michaelis-Mentem; ^{(1), (2), (3)} Velocidade Máxima de Absorção de P (Vmax) expressa em termos de Massa de Matéria Seca de Raiz, Massa de Matéria Fresca de Raiz e Área Superficial de Raiz Fina, respectivamente; Cmin – Concentração mínima de P a partir da qual se observa influxo de P; ^{(4), (5), (6)} Poder de Absorção de P (α) em termos de Massa de Matéria Seca de Raiz, Massa de Matéria Fresca de Raiz e Área Superficial de Raiz Fina, respectivamente; CV (%) – Coeficiente de Variação = (Desvio Padrão/Média)*100; Faixa Normal = Média \pm Desvio Padrão.

Tabela 3. Valores médios de influxo de P em 11 progênies de *Eucalyptus grandis*.

Progênie	Influxo ⁽¹⁾	Influxo ⁽²⁾	Influxo ⁽³⁾
	$\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$	$\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$	$\mu\text{mol/cm}^2\cdot\text{h}$
1	1,48	0,14	2,11E-03
2	1,38	0,14	2,50E-03
3	1,42	0,13	1,77E-03
4	1,30	0,12	1,98E-03
5	2,31	0,23	4,51E-03
6	1,23	0,11	1,89E-03
7	1,03	0,10	2,01E-03
8	1,35	0,13	1,99E-03
9	0,88	0,09	1,71E-03
10	0,76	0,08	1,35E-03
11	1,11	0,11	1,70E-03
Média	1,30	0,13	2,14E-03
Desvio Padrão	0,41	0,04	8,36E-04
CV (%)	31,55	31,32	39,12
Faixa Normal	0,89	0,09	1,30E-03
	1,70	0,16	2,97E-03

⁽¹⁾, ⁽²⁾, ⁽³⁾ Valores médios de Influxo de P expressos em termos de Massa de Matéria Seca de Raiz, Massa de Matéria Fresca de Raiz e Área Superficial de Raiz Fina, respectivamente; CV (%) - Coeficiente de Variação = (Desvio Padrão/Média)*100; Faixa Normal = Média \pm Desvio Padrão.

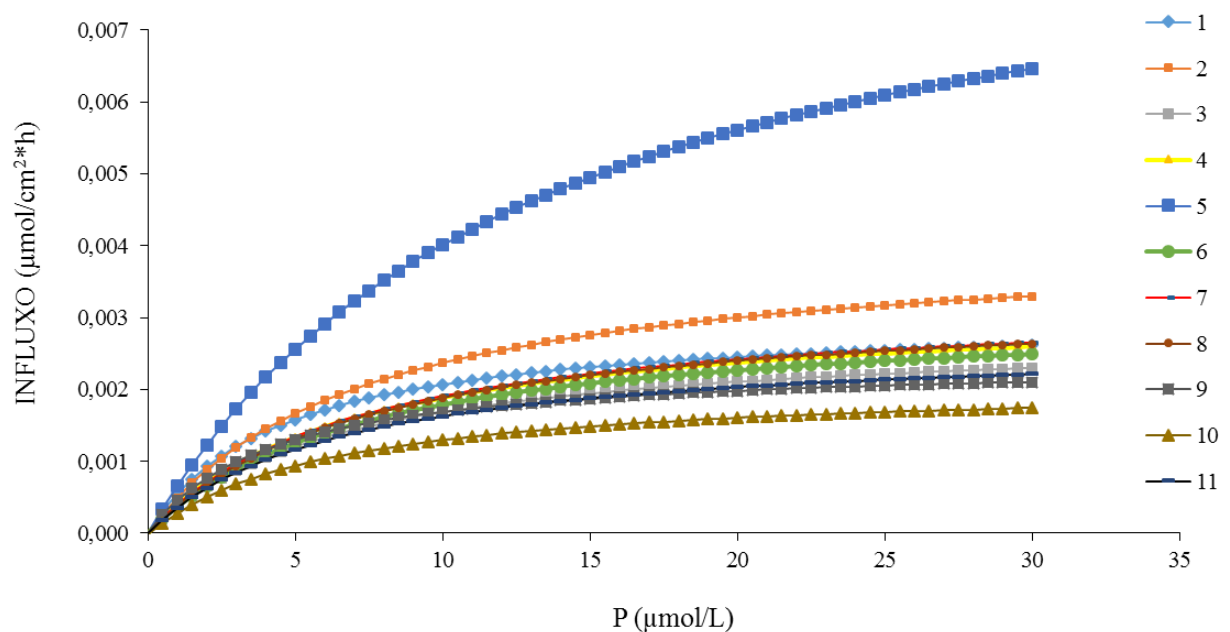


Figura 2. Influxo de P por unidade de área superficial de raiz fina ($\mu\text{mol/cm}^2\cdot\text{h}$), em função da concentração de P em solução, em 11 progênies de *Eucalyptus grandis*.

3.2 Influxo de P pelas 11 progênies de *Eucalyptus grandis* em diferentes concentrações de P em solução

A partir dos valores de influxo de P por unidade de área superficial de raízes finas estimados para cada uma das 11 progênies, estas foram comparadas em relação ao influxo obtido nas concentrações de 30 $\mu\text{mol/L}$, 7 $\mu\text{mol/L}$ e 1 $\mu\text{mol/L}$ de P, conforme a **figura 3**. As concentrações de P foram definidas com o objetivo de caracterizar cada uma das progênies em relação ao influxo de P em diferentes condições de disponibilidade do nutriente, considerando três faixas de concentrações de P, de 30 a 1 $\mu\text{mol/L}$, de 30 a 7 $\mu\text{mol/L}$ e de 7 a 1 $\mu\text{mol/L}$ de P.

Nos limites das três faixas de concentrações de P consideradas, a maior concentração, de 30 $\mu\text{mol/L}$, foi associada a uma condição de mais alta disponibilidade de P em solução, por ser a maior concentração para qual se estimou o valor de influxo de P. A concentração intermediária de 7 $\mu\text{mol/L}$, foi associada a uma condição de média disponibilidade de P em solução, e definida com base no valor médio de K_m das 11 progênies. A menor concentração de P considerada, de 1 $\mu\text{mol/L}$, foi associada a uma condição de mais baixa disponibilidade de P em solução, por se situar entre as menores concentrações de P para as quais se estimaram o influxo do nutriente.

As progênies 2 e 5 apresentaram influxo superior à média, em todas as três condições testadas. Esse comportamento se deve ao maior valor de V_{max} apresentado por essas progênies, ambos superiores ao valor médio de V_{max} (**Tabela 2**). A progênie 1 apresentou influxo de P superior à média na faixa de 7 a 1 $\mu\text{mol/L}$ de P (associada a condição de média a baixa concentração de P), sobretudo na concentração de 1 $\mu\text{mol/L}$ de P. Esse comportamento está de acordo com o valor de K_m apresentado por essa progênie, 36,6 % inferior ao valor médio de K_m das 11 progênies (**Tabela 2**). Esse menor valor de K_m contribui para reduzir a queda na taxa de influxo de P devido a menor concentração do nutriente em solução, uma vez que indica a necessidade de menor concentração de P para se atingir a metade de V_{max} . As progênies 3, 4, 6, 7, 8, 9 e 11 apresentaram a tendência de influxos próximos à média, em todas as três faixas de concentrações testadas. Neste grupo, apenas a progênie 9 apresentou influxo ligeiramente superior à média na concentração de 1 $\mu\text{mol/L}$ de P. Esse comportamento da progênie 9 na concentração de 1 $\mu\text{mol/L}$ de P, assim como para a progênie 1 na mesma concentração, se deve ao menor valor de K_m , que pela progênie 9 foi 40,3 % inferior ao valor médio de K_m das 11 progênies (**Tabela 2**). A progênie 10 apresentou influxo

inferior à média nas três faixas de concentrações de P testadas. Isto se deve ao menor valor de Vmax apresentado por esta progênie, 41,2 % inferior ao valor médio de Vmax das 11 progênies (**Tabela 2**).

Assim, pode-se recomendar as progênies para sítios de implantação com características de solo que favoreçam um maior influxo de P, como indicado pelos resultados. As progênies 2 e 5, por terem apresentado influxo superior à média sob maior variação na concentração de P em solução, podem ser utilizadas em sítios com diferentes características de solo, desde que não haja limitação quanto a impedimentos físicos e disponibilidade hídrica. A progênie 1 apresentou influxo de P superior na faixa de 7 a 1 $\mu\text{mol/L}$ de P, e a progênie 9 na concentração de 1 $\mu\text{mol/L}$ de P, concentrações estas associadas a condições de média a baixa, e baixa disponibilidade de P, respectivamente, dentro das três faixas testadas. Esses resultados sugerem desempenho superior dessas progênies em solos de textura média a argilosa, onde, em condições de solos tropicais, menores concentrações de P são mantidas em solução, o que representa o fator condicionante do melhor resultado dessas progênies em relação à média, devido ao menor valor de Km de ambas as progênies. As progênies 3, 4, 6, 7, 8 e 11 não se destacaram quanto ao influxo de P em nenhuma das três condições avaliadas, apresentando resultados semelhantes e próximos à média nas três faixas de concentração de P. A progênie 10 apresentou influxo de P inferior à média nas três concentrações avaliadas, o que sugere a sua utilização em condições de solos com melhor fertilidade e maior aporte de matéria orgânica, condições que favoreçam a retenção de água, e reduzam a adsorção específica de P.

Tabela 4. Recomendação de utilização das 11 progênies de *Eucalyptus grandis* em função de características de solo do sítio de implantação.

Progênie	Características do solo
1 e 9	Solos de textura média a argilosa, com maior fator capacidade tampão de fosfato, e menor fator intensidade de P.
2 e 5	Solos com diferentes condições de disponibilidade de P, desde que não haja limitações quanto a impedimentos físicos e disponibilidade hídrica.
3, 4, 6, 7, 8 e 11	Solos com melhor fertilidade natural, ou solos de textura média com boa disponibilidade de P para a cultura do eucalipto.
10	Solos com melhor fertilidade natural, ou solos com fertilidade construída, que apresentem maior teor de matéria orgânica e menor condição para adsorção específica de P.

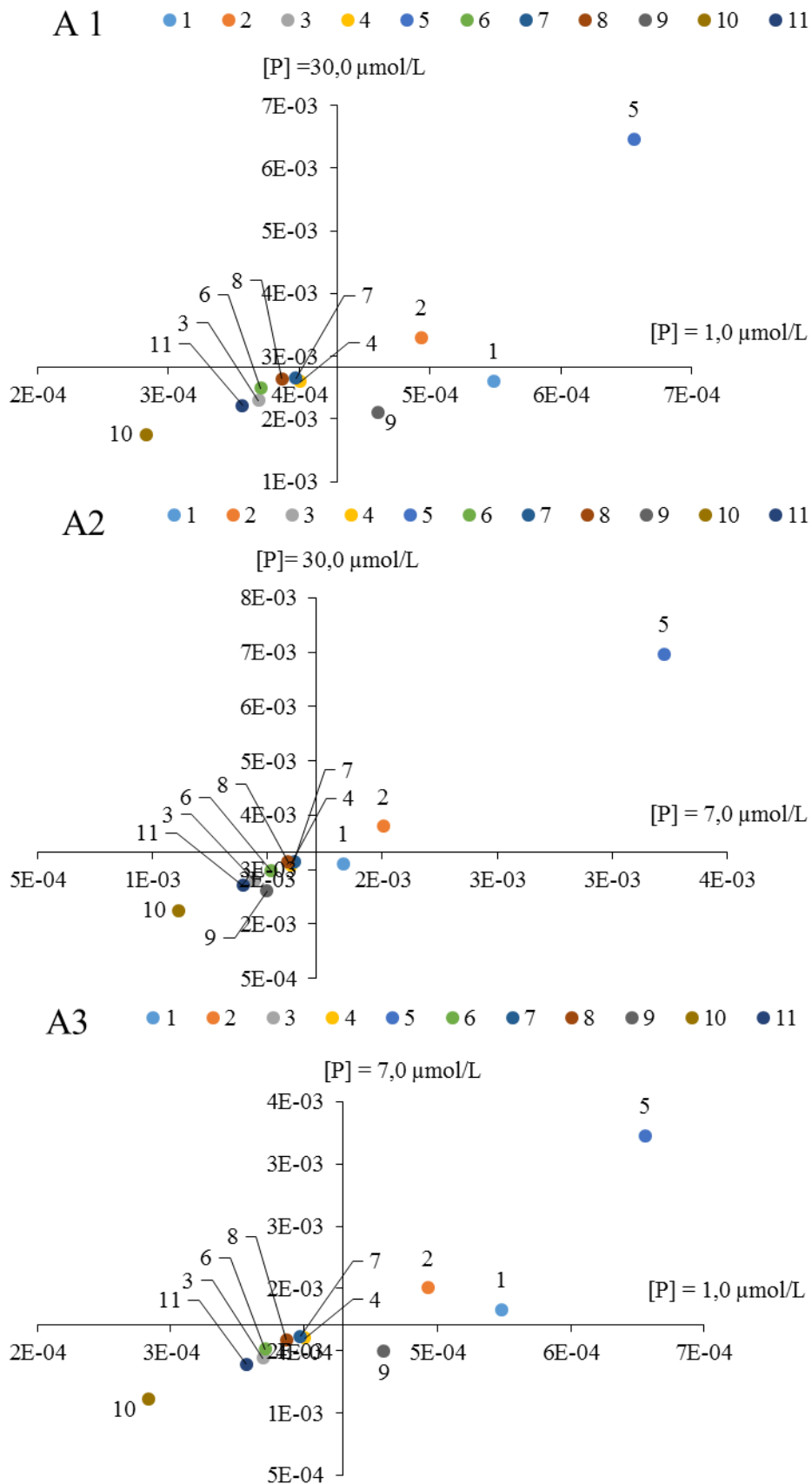


Figura 3. Gráficos de quadrantes do Influxo de P por unidade de área superficial de raízes finas, nas faixas de 30,0 a 1,0 μmol/L de P (A1), 30,0 a 7,0 μmol/L de P (A2) e 7,0 a 1,0 μmol/L de P (A3).

4 CONCLUSÃO

As progênies de *Eucalyptus grandis* apresentam variações no influxo estimado de P, de acordo com a concentração do nutriente em solução, e podem ser indicadas para diferentes condições, visando adequar cada genótipo à sítios de implantação com características favoráveis quanto ao recurso solo.

As progênies 2 e 5 são mais eficientes na aquisição de P em uma maior faixa de concentrações do nutriente.

As progênies 1 e 9 são mais eficientes do que as demais progênies na aquisição de P em condições de baixas concentrações do nutriente.

A progênie 10 é menos eficiente na aquisição de P em solução, em comparação as demais progênies avaliadas.

As progênies 3, 4, 6, 7, 8 e 11 não se destacam em relação as demais progênies, quanto a aquisição de P, em nenhuma faixa de concentração de P avaliada.

As progênies 2 e 5 são recomendadas para solos com diferentes concentrações de P em solução.

As progênies 1 e 9 são recomendadas para solos com menores concentrações de P em solução.

A progênie 10 é recomendada para solos com melhor fertilidade natural, ou fertilidade construída, com maiores teores de matéria orgânica e menor adsorção específica de P.

As progênies 3, 4, 6, 7, 8 e 11 são recomendadas para solos com textura média, com maior teor de matéria orgânica e menor adsorção específica de P, porém com capacidade tampão de fosfato superior à de solos arenosos, e com fator intensidade de P superior ao de solos argilosos.

5 REFERÊNCIAS

ALVAREZ V., V. H. Correlação e calibração de métodos de análises de solos. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F (Ed). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996, p. 615-646.

BAPTISTA, J. A.; FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Cinética de absorção de amônio e crescimento radicular das cultivares de arroz agulha e bico ganga. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1325-1330, 2000.

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 21, n. 113, p. 73-85, 1974.

COMETTI, N. N.; FURLANI, P. R.; RUIZ, H. A.; FERNANDES FILHO, E. I. Soluções nutritivas: formulação e aplicações. In: FERNANDES, M. S (Ed). **Nutrição mineral de plantas**, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006, p. 89-114.

CLARK, R. B. Characterization of phosphates of intact maize roots. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 23, n. 1, p. 458-460, 1975.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas**. Tradução e de E. MALAVOLTA. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo, 1975.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. In: FERNANDES, M. S (Ed). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006, p. 115 - 152.

IBÁ, 2016. **Indústria Brasileira de Árvores**. Relatório Anual 2016. Disponível em:< http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>. Acesso em 20 de maio de 2017.

LIMA, A. M. N.; NEVES, J. C. L.; SILVA, I. R.; LEITE, F. P. Cinética de absorção e eficiência nutricional de K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ em plantas jovens de quatro clones de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 903-909, 2005.

LOCATELLI, M; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L; NOVAIS, R. F. Efeito de formas de nitrogênio sobre o crescimento e composição mineral de mudas de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 8, n. 1, p. 53-69, 1984.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (Ed). **Fertilidade do solo**, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 133-204.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (Ed). **Fertilidade do solo**, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 471-550.

PINTO, S. I. D. C. **Cinética de absorção conjunta de fósforo, potássio, cálcio e magnésio e eficiência nutricional de macronutrientes de clones de eucalipto**. 2009, 102 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

RUIZ, H. A. Estimativa dos parâmetros cinéticos K_m e $V_{máx}$ por uma aproximação gráfico-matemática. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 32, n. 179, p. 79-84, 1985.

RUIZ, H.A; FERNANDES FILHO, E. I. Cinética: software para estimar as constantes V_{max} e K_m da equação de Michaelis-Menten. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 10., 1992, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 124-125.

SILVA, N. F. **Eficiência nutricional e seus biomarcadores em eucalipto para nitrogênio, fósforo e potássio**. 2017. 124 f. Tese (Doutorado em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.