

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**MARLLON FIALHO DE CASTRO**

**RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E CRESCIMENTO DE EUCALIPTO EM  
ÁREAS MINERADAS DE BAUXITA**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**2017**

**MARLLON FIALHO DE CASTRO**

**RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E CRESCIMENTO DE EUCALIPTO EM  
ÁREAS MINERADAS DE BAUXITA**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira

Coorientadores: Judyson de Matos Oliveira

Lucas de Carvalho Gomes

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**2017**

**MARLLON FIALHO DE CASTRO**

**RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E CRESCIMENTO DE EUCALIPTO EM  
ÁREAS MINERADAS DE BAUXITA**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

APROVADO: 01 de dezembro de 2017

---

Judyson de Matos Oliveira  
(Coorientador)  
(UFV)

---

Lucas de Carvalho Gomes  
(Coorientador)  
(UFV)

---

Prof. Igor Rodrigues de Assis  
(UFV)

---

Prof. José Antônio Saraiva Grossi  
(UFV)

---

Prof. Teógenes Senna de Oliveira  
(Orientador)  
(UFV)

## RESUMO

A compactação do solo tem sido um grande problema para o setor florestal e práticas para melhorar a qualidade física do solo são essenciais para se obter uma boa produtividade. Assim o objetivo deste trabalho foi de avaliar a influência da resistência do solo à penetração (RP) no crescimento desuniforme de árvores de eucalipto em áreas mineradas de bauxita. O experimento foi montado no delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas e com três repetições. As parcelas foram compostas por adubação padrão da empresa (AE), adubação orgânica (AC), adubação química (AQ) e uma mistura da adubação orgânica com a química (C+Q). Foram realizadas análises de agrupamento de acordo com a altura, o diâmetro a altura do peito e a biomassa das árvores do experimento, separando-as em três grupos de crescimento (árvores maiores, médias e menores). As análises de RP foram realizadas a diferentes distâncias (0,5; 0,75; 1,0 e 1,5 m) do tronco das árvores pré-selecionadas, nas profundidades de 0 a 0,60 m. Amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica também foram coletadas nas devidas profundidades. Nas condições do estudo não houve correlação entre os valores de umidade e RP. De modo geral, os resultados de RP não apresentaram diferença significativa entre os grupos de crescimento e entre as adubações, para as diferentes distâncias de coleta e para cada profundidade analisada, exceto para a AE, a uma distância de 0,5 m das árvores. Os valores médios de RP em subsuperfície foram altos, acima de 5,0 MPa. O grupo de crescimento das árvores maiores apresentou em média 114 t/ha a mais que os grupos de menor crescimento. A RP não foi um bom indicador para explicar a diferença de crescimento entre as árvores de eucalipto.

Palavras-chave: Compactação, mineração de bauxita, análise de agrupamento.

## ABSTRACT

Soil compaction has been a considerable problem for the forest sector and practices to improve soil physical quality are essential for good productivity. The objective of this work was to evaluate the influence of soil penetration resistance (PR) on the uneven growth of eucalyptus trees in mined areas of bauxite. A randomized block design with subdivided plots and three replicates was used in the experiment. The plots were composed by company fertilization (AE), organic fertilization (AC), chemical fertilization (AQ) and a blend of organic fertilization with chemical (C + Q). Grouping analyzes were performed according to height, diameter at breast height and biomass of the trees, separating them into three growth groups (larger, medium and smaller trees). PR analyzes were made at different distances (0.5, 0.75, 1.0, and 1.5 m) from the trunks of pre-selected trees, at depths of 0 to 0.60 m. Soil samples for determination of gravimetric moisture were also collected in due depths. In this study conditions there was no correlation between the values of humidity and PR. In general, the results of PR did not show a significant difference for the distances, between growth groups and for the fertilization, for each analyzed depth, except for AE. The mean values of subsurface PR were high, above 5.0 MPa. The growth group of the larger trees presented on average 114 t / ha more than the lower growth groups. It was concluded that PR was not a good indicator to explain the difference growth between trees.

Index terms: Penetration resistance, bauxite mining, cluster analysis

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	6
2. Material e métodos .....	9
2.1. Área experimental.....	9
2.2. Avaliação das propriedades dendrométricas do eucalipto.....	11
2.3. Amostragem da resistência do solo à penetração .....	13
3. Resultados.....	15
4. Discussão .....	19
5. Conclusão .....	21
Referências .....	22

## 1 Introdução

A atividade mineradora causa grandes danos ambientais nas áreas de sua atuação, a adoção de técnicas antrópicas é um meio de anteceder a recuperação desses locais, evitar o agravamento dos impactos ambientais causados e de tornar o solo novamente agricultável (SILVA; CORRÊA, 2008). Quase sempre o processo de mineração causa supressão da vegetação, exposição do solo aos processos erosivos, alterações dos recursos hídricos e perda da qualidade do solo. As áreas afetadas pela mineração podem possuir déficits de até 99 % nos teores de C e N totais e da biomassa microbiana e na atividade enzimática do solo (PULROLNIK et al., 2009; BORGES, 2013).

Na extração de bauxita o perfil do solo é totalmente desconfigurado, a vegetação existente é removida e o *topsoil* remanescente é armazenado em grandes pilhas até finalização do processo de extração dessa rocha. Um dos problemas após o processo de mineração é o recapeamento das áreas, pois muitas vezes o *topsoil* fica por muito tempo armazenado em pilhas, podendo ocorrer a mistura entre os horizontes A e B. Esses fatores resultam em grande perda da qualidade da recuperação posterior (BIRNBAUM et al., 2017; MELLONI; SIQUEIRA; MOREIRA, 2003). Outro problema é a distribuição deste material na área, pois sabendo-se que esta camada reposta possui maiores teores de matéria orgânica, maior fertilidade e melhor qualidade biológica (FERREIRA; VIEIRA, 2017), a formação de camadas desuniformes podem causar um desenvolvimento irregular da vegetação.

Espécies arbóreas nativas ou exóticas tem papel fundamental no processo de recuperação de áreas mineradas, pois elas atuam na reativação da ciclagem biogeoquímica do sistema e melhoram a qualidade física do solo, restabelecendo a agregação do solo (ALMEIDA; SÁNCHEZ, 2005). Alves et al. (2007) constataram que o consórcio de espécies arbóreas com leguminosas e espécies forrageiras podem melhorar significativamente a qualidade física do solo, reduzindo a sua densidade e melhorando a infiltração de água.

O uso de espécies arbóreas tem como vantagem o menor revolvimento do solo após sua implantação, possibilitando uma maior proteção física do solo contra ações climáticas e o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade (BARBOSA et al., 2017; HONDA; DURIGAN, 2017; CARNEIRO et al., 2008). O eucalipto é uma planta que apresenta algumas características desejáveis para a recuperação de áreas degradadas, já que possui grande adaptabilidade a diversos ambientes, apresenta rápido crescimento e produz uma considerável

quantidade de serapilheira, chegando a mais de 7 t/ha em áreas mineradas de bauxita em recuperação (SOUZA; DAVIDE, 2001).

A implantação do eucalipto em áreas degradadas, assim como de outras espécies vegetais, exige diversos tratamentos culturais para ter um desenvolvimento satisfatório (BARTIERES et al., 2016). Problemas no desenvolvimento da cultura do eucalipto estão ligados a diversos fatores, como má qualidade das mudas, adversidades climáticas ou problemas relacionados ao solo. Em áreas mineradas, com alto nível de degradação, amenizar problemas químicos e físicos do solo é de suma importância e um bom preparo do solo se torna essencial para evitar grandes problemas erosivos e garantir uma boa produtividade (PIRES et al., 2006).

Os atributos físicos do solo podem ser limitantes ao desenvolvimento de espécies arbóreas. RIBEIRO et al. (2010) constataram que a compactação do solo proporcionou uma diminuição na matéria seca das raízes e no crescimento de plantas de eucalipto. Problemas físicos de solo tem se tornado cada vez mais frequentes em áreas produtoras de eucalipto, pois o processo de preparo do solo e colheita envolve máquinas pesadas que compactam o solo e prejudicam o desenvolvimento radicular da cultura (FILHO et al., 2014). Tais problemas tem levado a grandes perdas econômicas, pois há um aumento na densidade do solo e na resistência à penetração com consequentes perdas na produtividade (DEDECEK; GAVA, 2005; SILVA et al., 2007).

A resistência à penetração tem sido utilizada como indicadora da qualidade física do solo e pode ser um indicativo do grau de impedância do solo ao desenvolvimento das raízes das plantas (LIMA et al., 2010). Esse indicador é correlacionado com a densidade radicular no perfil do solo e com o crescimento da parte aérea, mostrando que solos com elevados valores de resistência à penetração são menos aptos para o desenvolvimento das plantas (BEULTER; CENTURION, 2004; DE SÁ et al., 2016). Em áreas mineradas essa situação não é diferente, Stumpf et al. (2016) também demonstraram que a resistência à penetração possui uma elevada correlação com a presença de raízes no solo. Em condições restritivas é de se esperar que reflexos ocorram na parte aérea, o que foi observado em experimento de longa duração conduzido em área minerada de bauxita localizada na Zona da Mata Mineira quando feita avaliação dendrométrica (altura, diâmetro a altura do peito e biomassa) de plantas clonais de eucalipto após 56 meses de idade.

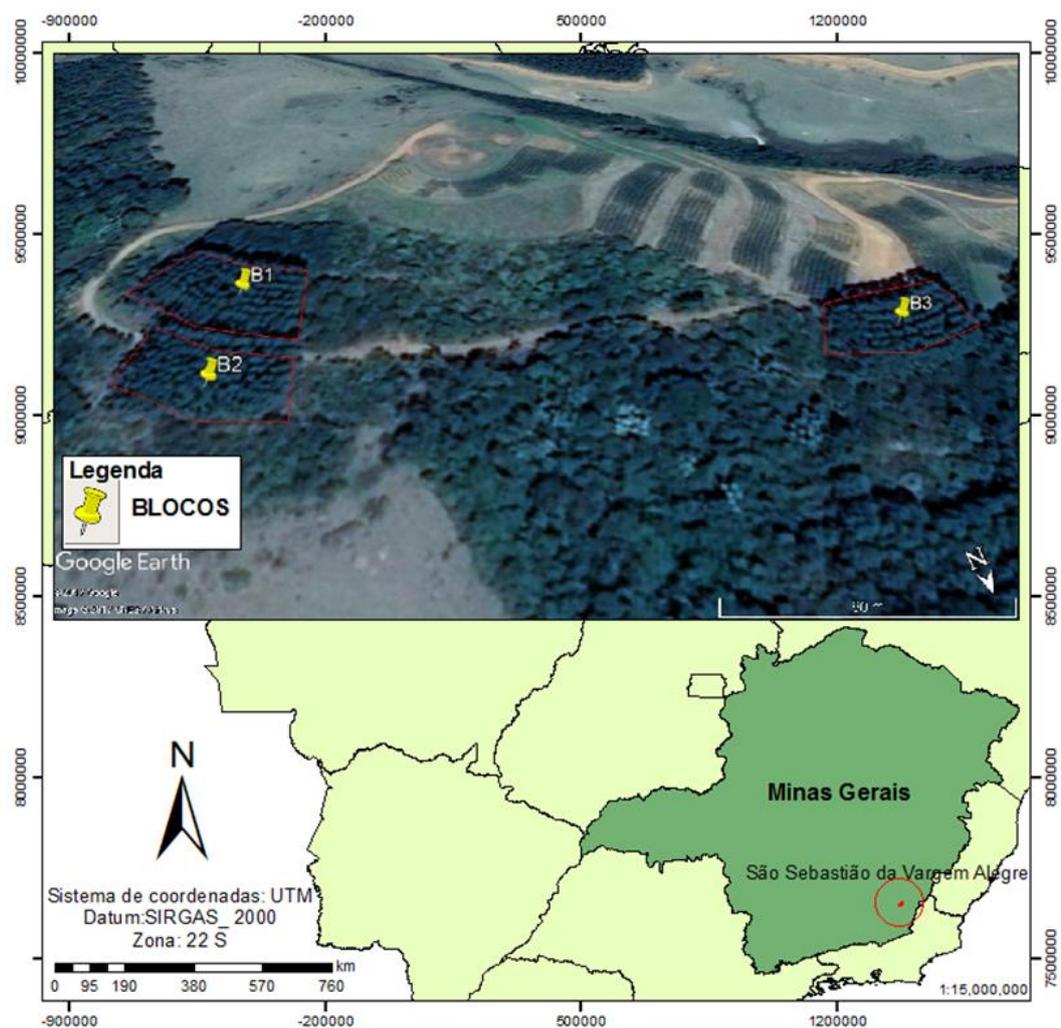
Tais resultados levaram a proposição do presente estudo, assumindo que a resistência do solo pode estar limitando o crescimento das plantas de forma localizada e muito associada a porções em subsolo pouco alteradas pelo preparo (subsolagem). Assim, objetivou-se avaliar a

influência da resistência à penetração do solo sobre no crescimento das plantas clonais de eucalipto em área minerada de bauxita em processo de recuperação.

## 2 Material e métodos

### 2.1 Área experimental

O estudo foi conduzido em São Sebastião da Vargem Alegre, Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil ( $21^{\circ}1'58''S$  e  $42^{\circ}35'8''W$ ), a 780 m de altitude, em área onde houve a extração de bauxita pela Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais. Os solos predominantes na região são Latossolos Vermelho-Amarelo distrófico típico. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação do Köppen, com verões quentes e chuvosos e estação seca bem definida, com precipitação e temperaturas médias anuais de 1.287 mm e  $20,3^{\circ}C$ , respectivamente (INMET, 2016).



**Figura 1.** Localização da área de estudo e das unidades experimentais em São Sebastião da Vargem Alegre - MG.

Após as atividades de mineração de bauxita, foi realizada a descompactação do subsolo exposto e, em seguida, o *topsoil*, retirado da área antes das atividades de mineração e estocado por 15 meses, foi retornado a área original durante o processo de reconfiguração topográfica. Logo depois, o terreno foi descompactado novamente a 60 cm de profundidade, sendo realizadas duas subsolagens perpendiculares em toda a área, e finalmente os terraços foram construídos.

Em março de 2011, o experimento foi instalado na área com o eucalipto, utilizando o delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas, de dimensões 40 x 18 m, foram compostas por eucalipto (*Eucalyptus urograndis*, híbrido oriundo do cruzamento entre *E. grandis* e *E. urophylla*) no espaçamento de 3 x 2 m. As subparcelas (10 x 18 m) foram compostas pela adubação padrão adotada pela empresa (AE) em suas atividades de recuperação de áreas minerada, pela adubações orgânica (AC), pela adubação química (AQ) e adubação química com a orgânica (C + Q).

Todas adubações foram realizadas seis meses antes do plantio das árvores. A AE foi composta por 2,0 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico e 30,0 t ha<sup>-1</sup> de cama de aviário (*in natura* com aproximadamente 30% de umidade). Em AC, além de AE, aplicou-se mais 30 t ha<sup>-1</sup> de cama de aviário, enquanto em AQ, foram aplicados mais 3 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico e 0,75 t ha<sup>-1</sup> de fosfato natural reativo Bayóvar. Na subparcela C+Q foi feita a combinação das duas aplicações suplementares (AC e AQ) realizadas. Parte da dosagem da cama de aviário e do calcário foi aplicada na cova e parte nas entrelinhas de plantio sendo, nesta última situação, incorporados na camada 0-0,15 m, 30 dias antes do plantio. As plantas receberam 22% da dosagem da cama de aviário na cova e 78% nas entrelinhas de plantio. A aplicação do calcário foi realizada de modo que 25% da dosagem total fosse aplicada nas covas e 75% nas entrelinhas de plantio. O fosfato natural reativo foi aplicado no fundo das covas de plantio.

Além das adubações realizadas na implantação, ainda houve duas adubações de cobertura, sendo a primeira um mês após a implantação do experimento, consistindo em 10 kg ha<sup>-1</sup> de N, 22 kg ha<sup>-1</sup> de P e 8 kg ha<sup>-1</sup> de K, enriquecido com micronutrientes (1,7 kg ha<sup>-1</sup> de B, 0,8 kg ha<sup>-1</sup> de Zn e 0,8 kg ha<sup>-1</sup> de Cu para eucalipto e angico), de forma localizada e incorporada lateralmente a 20 cm das plantas. A segunda adubação foi realizada 10 meses após a implantação dos tratamentos, sendo aplicados 67 kg ha<sup>-1</sup> de N, 17 kg ha<sup>-1</sup> de P e 67 kg ha<sup>-1</sup> de K, em sulcos de 5 cm de profundidade na parte superior da projeção da copa, cabe ressaltar que apenas os tratamentos com adubação AQ e C+Q receberam estas adubações de cobertura, uma vez que esta foi realizada apenas com adubo químico.

## 2.2 Avaliação das propriedades dendrométricas do eucalipto

A altura total das árvores (Ht), a circunferência a altura do peito a 1,3 m do solo e o ajuste de equações alométricas foram analisados para as árvores de eucalipto aos 56 meses de idade. Para a determinação da altura foi utilizado o hipsômetro Forest Vertex IV e, para o CAP, fita métrica com posterior conversão dos dados em diâmetro a altura do peito (DAP).

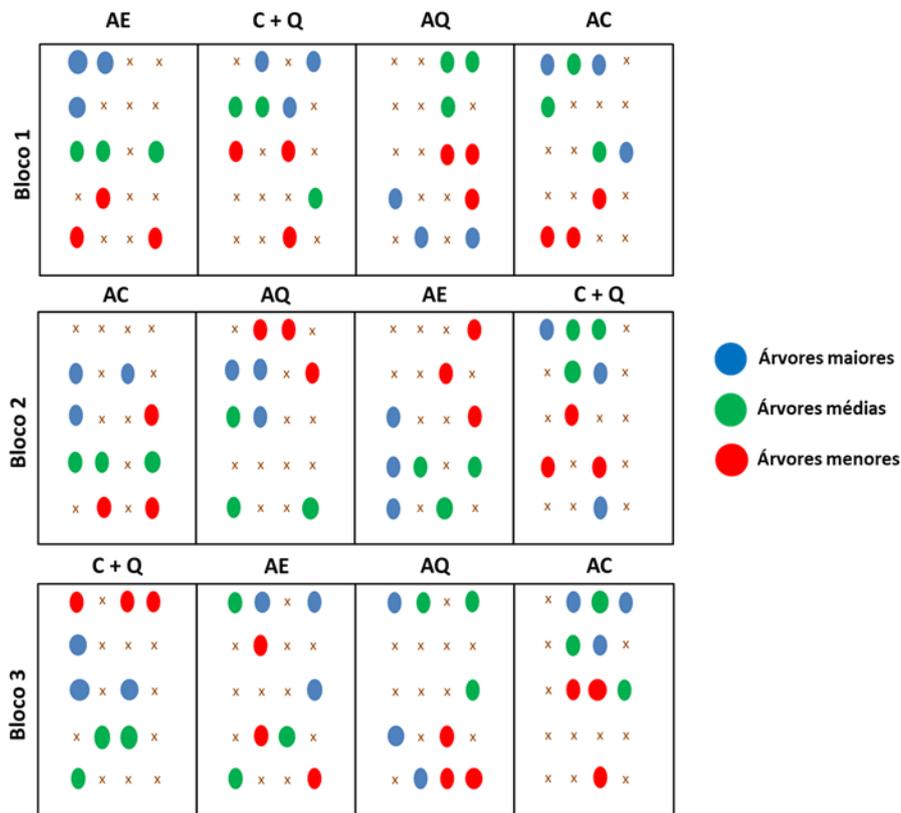
A seleção das árvores para cubagem foi feita pela separação por classe diamétrica a uma amplitude de 2 cm. Foram cubadas três árvores por cada classe diamétrica. A cubagem rigorosa das árvores selecionadas foi feita empregando-se o método não destrutivo, ou seja, as árvores não foram abatidas. Para tanto, a circunferência do tronco das árvores foi medida com uma fita métrica nos intervalos de 0, 0,30, 0,70, 1,00, 1,3 e 2,3 metros de altura. A partir de 2,3 m de altura as medições foram realizadas em intervalos de 1 metro utilizando o Pentaprisma de Wheeler que permite a obtenção dos valores diamétricos em diferentes alturas do tronco até o limite de diâmetro do equipamento que é de 6,5 cm. O volume de cada seção foi obtido pela aplicação sucessiva da expressão de Smalian, sendo:  $V = (AS_1 + AS_2)/2 * L$ , onde:  $V$  é o volume com casca da seção, em  $m^3$ ;  $AS_1$  e  $AS_2$  são as áreas seccionais obtidas nas extremidades das seções, em  $m^2$  e  $L$  é o comprimento da seção, em m. Para diâmetros inferiores a 6,5 cm, considerou-se o restante da árvore como sendo um cone (CAMPOS; LEITE, 2013). Os dados dendrométricos permitiram ajustar equações alométricas baseadas nos modelos de Schumacher e Hall (1933) e Spurr (1952) para as árvores de eucalipto. As estimativas da biomassa das árvores foram obtidas pela multiplicação do volume total com casca de cada árvore avaliada pela densidade básica da madeira ( $0,510 \text{ g cm}^{-3}$ ), no caso obtida na literatura (RIBEIRO et al., 2010b; SOARES; OLIVEIRA, 2002).

Em cada subparcela as árvores foram divididas em três grupos (menores, médias e maiores) pela análise de agrupamento (Cluster) com base nos dados dendrométricos DAP, Ht e biomassa (Tabela 1). Em cada grupo dentro de cada subparcela foram selecionadas três árvores para a análise da resistência à penetração (Figura 2). A seleção das árvores procurou expressar ao máximo a característica do grupo, com a seleção das maiores árvores do grupo “maiores” e as menores árvores do grupo “menores”.

**Tabela 1.** Média do diâmetro a altura do peito (DAP), da altura total (Ht) e da biomassa das três árvores selecionadas nos diferentes grupos de crescimento de árvores de eucalipto em área de minerada de bauxita em processo de recuperação com diferentes tipos de adubação

Subparcelas	Grupos de crescimento	n	DAP (cm) $\pm$ DP	Ht (m) $\pm$ DP	Biomassa (kg) $\pm$ DP
B1 AE	Menores	8	14,32 $\pm$ 1,95	20,87 $\pm$ 1,63	101,76 $\pm$ 36,46
	Médias	4	17,08 $\pm$ 1,32	23,57 $\pm$ 0,62	156,28 $\pm$ 23,53
	Maiores	7	18,04 $\pm$ 1,31	22,97 $\pm$ 1,13	168,84 $\pm$ 25,57
B1 C+Q	Menores	3	14,22 $\pm$ 1,36	21,20 $\pm$ 1,47	101,78 $\pm$ 24,98
	Médias	7	15,92 $\pm$ 0,00	21,97 $\pm$ 0,47	127,41 $\pm$ 2,68
	Maiores	10	17,61 $\pm$ 1,75	23,27 $\pm$ 2,58	163,71 $\pm$ 36,47
B1 AC	Menores	7	15,38 $\pm$ 1,06	21,87 $\pm$ 2,16	121,61 $\pm$ 22,40
	Médias	6	17,51 $\pm$ 0,96	24,70 $\pm$ 1,16	171,01 $\pm$ 18,75
	Maiores	7	16,55 $\pm$ 1,87	22,60 $\pm$ 1,36	185,22 $\pm$ 34,09
B1 AQ	Menores	9	14,54 $\pm$ 1,91	21,23 $\pm$ 1,96	107,41 $\pm$ 36,01
	Médias	3	16,45 $\pm$ 3,34	24,07 $\pm$ 4,56	148,27 $\pm$ 58,51
	Maiores	8	16,45 $\pm$ 0,60	23,00 $\pm$ 0,00	141,95 $\pm$ 9,65
B2 AE	Menores	12	10,50 $\pm$ 2,76	15,87 $\pm$ 2,77	42,60 $\pm$ 43,51
	Médias	3	16,55 $\pm$ 1,71	22,13 $\pm$ 1,32	138,42 $\pm$ 30,12
	Maiores	5	17,08 $\pm$ 0,30	21,67 $\pm$ 0,05	143,68 $\pm$ 4,47
B2 C+Q	Menores	7	14,22 $\pm$ 2,23	19,67 $\pm$ 2,82	97,39 $\pm$ 41,93
	Médias	3	17,61 $\pm$ 1,54	23,47 $\pm$ 1,01	164,91 $\pm$ 32,60
	Maiores	10	17,72 $\pm$ 0,54	24,70 $\pm$ 0,14	175,19 $\pm$ 10,51
B2 AC	Menores	10	15,92 $\pm$ 0,45	21,23 $\pm$ 1,23	123,68 $\pm$ 13,24
	Médias	3	16,45 $\pm$ 0,55	22,27 $\pm$ 1,09	137,23 $\pm$ 5,99
	Maiores	6	18,14 $\pm$ 1,15	22,10 $\pm$ 0,80	164,30 $\pm$ 20,39
B2 AQ	Menores	11	13,05 $\pm$ 1,90	20,47 $\pm$ 1,70	84,08 $\pm$ 31,34
	Médias	3	15,60 $\pm$ 1,26	20,60 $\pm$ 1,38	115,17 $\pm$ 20,67
	Maiores	6	15,60 $\pm$ 0,00	21,90 $\pm$ 0,14	122,28 $\pm$ 0,77
B2 AE	Menores	9	14,01 $\pm$ 0,00	20,60 $\pm$ 1,07	93,98 $\pm$ 4,79
	Médias	3	15,70 $\pm$ 1,53	22,77 $\pm$ 1,36	128,71 $\pm$ 31,44
	Maiores	6	18,36 $\pm$ 1,41	22,73 $\pm$ 1,25	173,15 $\pm$ 29,03
B2 C+Q	Menores	8	15,70 $\pm$ 3,10	20,80 $\pm$ 4,13	127,49 $\pm$ 65,66
	Médias	4	17,83 $\pm$ 1,12	23,27 $\pm$ 1,31	166,94 $\pm$ 22,41
	Maiores	8	20,27 $\pm$ 1,60	24,67 $\pm$ 0,74	225,80 $\pm$ 36,14
B2 AC	Menores	4	12,84 $\pm$ 2,91	19,60 $\pm$ 2,50	79,14 $\pm$ 52,57
	Médias	7	16,66 $\pm$ 1,67	20,30 $\pm$ 5,40	132,12 $\pm$ 51,64
	Maiores	5	18,57 $\pm$ 1,18	23,87 $\pm$ 1,17	185,07 $\pm$ 27,05
B2 AQ	Menores	6	15,92 $\pm$ 2,53	21,90 $\pm$ 2,49	127,27 $\pm$ 40,73
	Médias	10	16,66 $\pm$ 2,17	23,23 $\pm$ 1,97	146,72 $\pm$ 37,97
	Maiores	4	18,46 $\pm$ 0,60	23,47 $\pm$ 0,40	179,97 $\pm$ 10,53

B1 = Bloco 1; B2 = Bloco 2; B3 = Bloco 3; AE = adubação da empresa; C+Q = adubação de cama de frango + adubação química; AC = adubação de cama de frango; AQ = adubação química. n = número de árvores do agrupamento. DAP = diâmetro a altura do peito; Ht = altura total. DP = Desvio padrão.



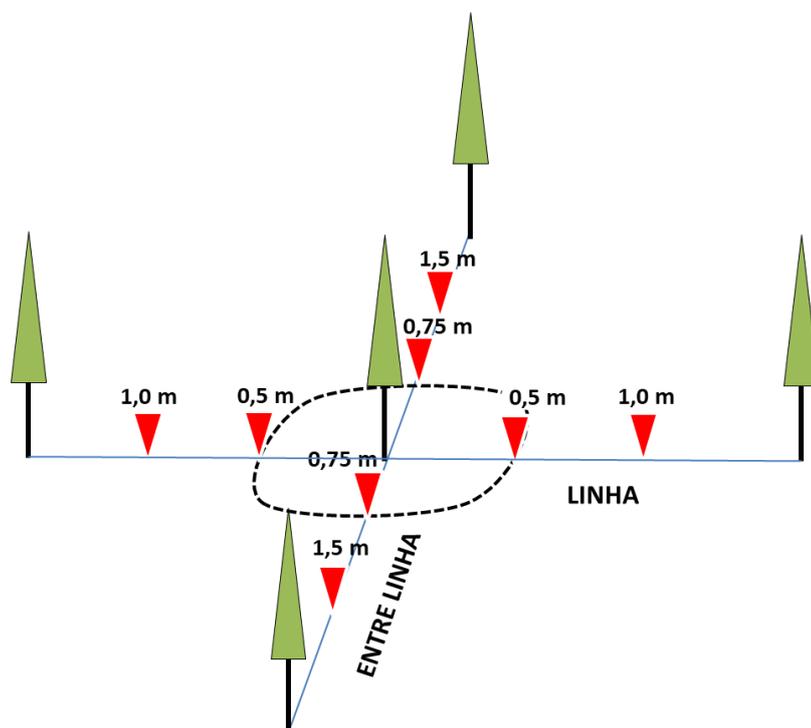
**Figura 2.** Distribuição dos três grupos de crescimento de árvores em uma área de mineração de bauxita em processo de recuperação com eucalipto, em São Sebastião da Vargem Alegre - MG. AE = adubação da empresa, C+Q = adubação de cama de aviário + adubação química, AC = adubação de cama de aviário, e AQ = adubação química.

### 2.3 Amostragem da resistência do solo à penetração

Determinou-se a resistência do solo à penetração (RP) em cada uma das árvores selecionada em cada grupo, amostrando-se oito pontos ao redor do tronco e na projeção da copa de cada árvore selecionada no grupo. Em cada ponto cardinal considerou-se as distâncias de 0,5 e 1,0 m para linha e 0,75 e 1,5 m nas entrelinhas do plantio, ou seja, dois pontos por posição (Figura 3). Para fins de comparação também se considerou o valor da RP médio dos oito pontos.

O penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar/Stolf foi utilizado para as medições da RP até a profundidade de 0,60m. A conversão da penetração da haste do no solo, dada em cm/impacto, em resistência à penetração foi efetuada utilizando a equação descrita por Stolf (1991), sendo:  $RP = M + m + (M / (M + m)) * M * (h/x) / A$ , onde, RP é a resistência do solo à penetração, em  $\text{kgf cm}^{-2}$  ou  $\text{kgf cm}^{-2} * 0,098 = \text{MPa}$ ; M é a massa do êmbolo, em kg; m é a

massa do aparelho sem êmbolo, em kg;  $h$  é a altura de queda do êmbolo, em cm;  $x$  é a penetração da haste do aparelho, em cm/impacto e  $A$  é a área do cone em  $\text{cm}^2$ . A amostragem de RP foi acompanhada da coleta de amostras de solo deformadas com auxílio de um trado holandês para determinação da umidade gravimétrica nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m, sendo calculada conforme a equação:  $U = (mu - ms) / ms$ , onde,  $U$  é a umidade gravimétrica, em  $\text{kgkg}^{-1}$ ;  $mu$  é a massa do solo úmido e  $ms$  é a massa do solo seco, ambas em  $\text{kgkg}^{-1}$ .



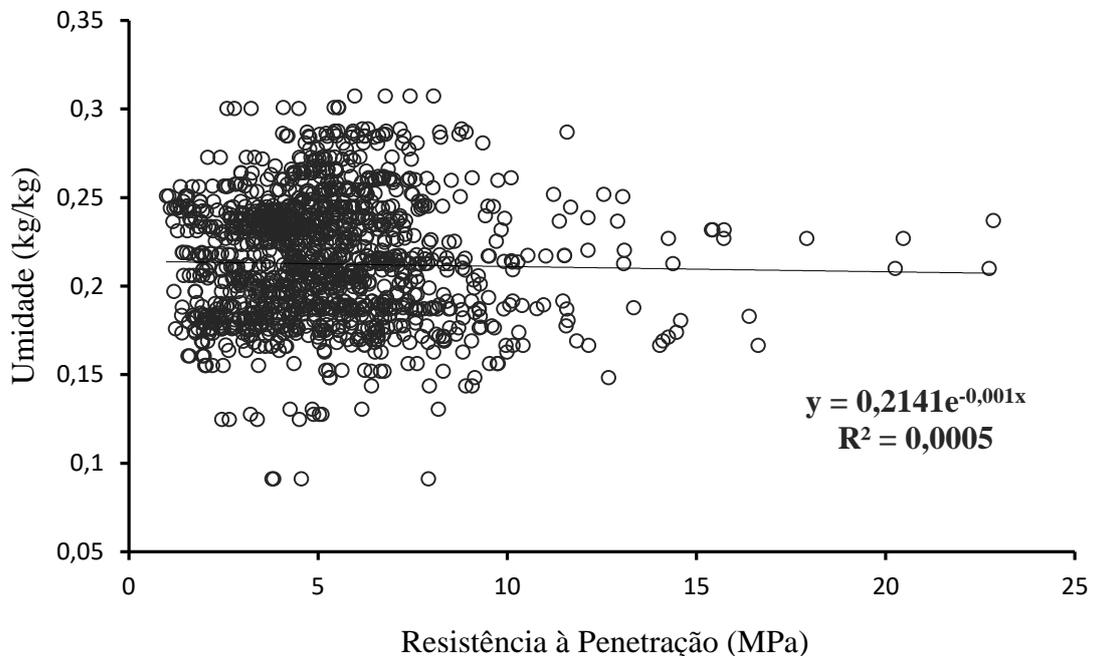
**Figura 3.** Localização dos pontos de amostragens de resistência à penetração realizadas em área de mineração de bauxita em processo de recuperação com diferentes tipos de adubação.

### 3.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos a ANOVA, os *outliers* foram retirados e as médias comparados pelo teste de TUKEY a 5, 10 e 20% de significância, sendo realizados no software R (R Core Team, 2013).

### 3 Resultados

A umidade não influenciou a RP, tendo sido constatado baixo valor de coeficientes de determinação ( $R^2$ ), resultando em valor próximo a zero (Gráfico 1). Normalmente, a RP aumenta com a diminuição da umidade (JUNIOR; REINERT; REICHERT, 2004; PACHECO; CANTALICE, 2011), fato não observado no presente estudo, visto que a área apresentou condições homogêneas de umidade. Sendo assim, não houve necessidade de nenhum tipo de correção dos valores de RP obtidos.



**Gráfico 1.** Resistência à penetração da média dos 8 pontos de coleta e suas devidas umidades em área de minerada de bauxita em processo de recuperação com diferentes tipos de adubação

De modo geral, não houve diferenças significativas ( $P > 0,1$ ) na análise das médias de RP nas distâncias de coleta (0,75 m; 1,0 m; 1,5 m e distância média), nos grupos de crescimento em cada tipo de adubação (AE, AQ, AC e C+Q), qualquer que seja a profundidade estudada. A exceção ocorreu para os valores de RP em AE, na distância de 0,5 m e com profundidades de 0,10-0,20 e 0,30-0,40 m (Tabela 2). Nesse caso, as diferenças estatísticas ( $P < 0,10$ ) observadas estão associadas ao grupo de árvores de menor crescimento que apresentaram maiores valores de RP do solo.

**Tabela 2.** Resistência à penetração (MPa) a 0,5 metros de distância horizontal do tronco do eucalipto e nas camadas de 0,10-0,20 e 0,30-0,40 m em área minerada de bauxita em recuperação com diferentes tipos de adubação

Adubação	Resistência à penetração (Mpa)		
	Grupos de crescimento		
	Menores	Médias	Maiores
	0-10 – 0,20 m		
AE	5,30 A	4,05 B	3,35 B
C+Q	3,62 A	4,14 A	3,34 A
AC	4,05 A	4,06 A	4,12 A
AQ	3,87 A	4,37 A	3,54 A
CV parcela (%) = 34,71	CV subparcela (%) = 15,02		
	0,30 - 0,40 m		
AE	6,89 A	5,12 AB	4,49 B
C+Q	6,24 A	4,98 A	5,83 A
AC	5,32 A	6,71 a	5,66 A
AQ	5,22 A	6,38 A	6,33 A
CV parcela (%) = 35,29	CV subparcela (%) = 19,32		

AE = adubação da empresa; C+Q = adubação de cama de frango + adubação química; AC = adubação de cama de frango; AQ = adubação química. Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste Tukey a 10% de significância.

Os resultados de tendência ( $P < 20$ ) também se apresentaram significativos para algumas das interações estudadas, mas não houve um padrão para as respostas, sendo estas muito variáveis. Para a distância de 0,75 m, em AC, na profundidade de 0,20-0,30 os resultados obtidos foram parecidos com da distância de 0,5 m ( $P > 10$ ), as árvores de maior crescimento apresentaram uma menor RP (Tabela3). Porém, para a distância de 1,50 m e a média de todas leituras, constatou-se o oposto, nesses casos somente para os efeitos principais, pois o grupo de árvores de menor crescimento apresentou a menor resistência à penetração para a profundidade de 0,40-0,50 m (Tabela 4).

**Tabela 3.** Resistência à penetração (MPa) a 0,75 e 1,00 metro de distância horizontal do tronco do eucalipto e nas camadas de 0,20-0,30 e 0,40-0,50 m em área minerada de bauxita em recuperação com diferentes tipos de adubação

Adubação	Distância de coleta (m)	Resistência à penetração (MPa)		
		Grupos de crescimento		
		Menores	Médias	Maiores
		0,20 a 0,30 m		
AE	0,75	4,89 A	4,70 A	5,35 A
C+Q		4,86 A	4,71 A	5,49 A
AC		4,60 B	5,61 AB	5,89 A
AQ		5,58 AB	6,07 A	4,67 B
CV parcela (%) = 24,92		CV subparcela (%) = 14,99		
		0,40 a 0,50 m		
AE	1,00	6,52 A	5,43 A	6,07 A
C+Q		7,07 A	7,30 A	6,82 A
AC		4,86 B	7,38 A	5,54 B
AQ		6,40 A	5,58 A	5,94 A
CV parcela (%) = 25,85		CV subparcela (%) = 17,41		

AE = adubação da empresa; C+Q = adubação de cama de frango + adubação química; AC = adubação de cama de frango; AQ = adubação química. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 20% de significância.

**Tabela 4.** Resistência à penetração (MPa) a 1,50 m e na média geral das distâncias horizontais do tronco do eucalipto e na camada de 0,40-0,50 m em área minerada de bauxita em recuperação com diferentes tipos de adubação

Adubação	Distância de coleta (m)	Resistência à penetração (MPa)		
		Grupos de crescimento		
		Menores	Médias	Maiores
		0,40 a 0,50 m		
AE	1,50	5,57	5,64	5,98
C+Q		6,50	7,71	6,37
AC		4,83	6,19	7,12
AQ		5,62	6,25	7,01
Médias		5,63 B	6,45 AB	6,62A
CV parcela (%) = 22,86		CV subparcela (%) = 19,35		
		0,40 a 0,50 m		
AE	Média geral	6,25	5,72	6,21
C+Q		5,38	7,01	6,67
AC		5,15	5,61	6,67
AQ		6,24	5,90	6,41
Médias		5,76 B	6,06 AB	6,49 A
CV parcela (%) = 19,35		CV subparcela (%) = 12,86		

AE = adubação da empresa; C+Q = adubação de cama de frango + adubação química; AC = adubação de cama de frango; AQ = adubação química. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 20% de significância.

Analisando-se as biomassas dos grupos de crescimento, nota-se uma grande diferença entre elas, visto que as árvores pertencentes ao grupo de maior crescimento possuem um acréscimo médio de biomassa de 113,98 t/ha em relação as árvores de menor crescimento, correspondente a uma diferença de 59,54% (Tabela5).

**Tabela 5.** Biomassa (t/ha) das árvores de eucalipto selecionadas dos diferentes grupos de crescimento em área minerada de bauxita em recuperação com diferentes tipos de adubação

Grupos de crescimento	Biomassa (t/ha)				médias
	-----Adubações-----				
	AE	C+Q	C	Q	
Maiores	269,71	313,60	296,88	246,67	281,71
Menores	132,36	181,40	180,17	177,01	167,73
Diferença	137,35	132,20	116,71	69,66	113,98
CV (%)	28,61	39,89	28,44	35,80	

AE = adubação da empresa; C+Q = adubação de cama de frango + adubação química; AC = adubação de cama de frango; AQ = adubação química. Valores referentes a uma população de 1666 plantas/ha.

## 4 Discussão

As análises de umidade do solo foram realizadas em um curto período de tempo quando não houve precipitação levando a uma baixa variação da umidade na área. Apesar de se saber que os valores de RP são inversamente proporcionais aos de umidade, a correção da RP pela a umidade não precisou ser feita, como recomendada (SILVA; BIANCHINI; CUNHA, 2016; SILVEIRA et al., 2010).

Como RP é um bom indicador para a qualidade física do solo (FUENTES et al., 2009; MOTA; FREIRE; JÚNIOR, 2013; PETRY et al., 2016), os resultados observados para as situações avaliadas indicou que a subsolagem efetuada pela empresa foi homogênea para os tratamentos analisados. O único tratamento onde houve diferença estatística ( $P < 0,10$ ) entre grupos de crescimento foi o AE, em que se observou que o grupo de menor crescimento apresentou os maiores valores de RP. Este resultado confirma a hipótese colocada para esse trabalho, além de ressaltar o fato de que os outros tratamentos de adubação testados estão proporcionando condições para a superação das condições físicas limitantes ao desenvolvimento das raízes das plantas. Alvarez e Steinbach (2009) demonstraram que em regiões úmidas e com solos com variáveis valores de RP, as culturas de milho e trigo não obtiveram diferença de produtividade quando o nitrogênio não era recurso limitante.

Raízes e pedras influenciam negativamente nos valores de RP (SEIXAS; SOUZA, 2007), resultados de tendência que demonstraram que árvores do grupo de maior e de médio crescimento apresentaram uma maior RP na profundidade de 0,40 a 0,50 m. Isto pode ser explicados pelo limite entre o subsolo remanescente e o *topsoil* depositado que varia na área experimental na profundidades de 0,40 a 0,70 m, quando a camada de *topsoil* é mais estreita ocorre uma maior influência de fragmentos rochosos da extração de bauxita provenientes do subsolo.

Muitos autores relatam que valores de RP superiores a 2,0-3,0 Mpa são críticos para o desenvolvimento do sistema radicular da maioria das plantas (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996; CANARACHE, 1990; SANDS; GREACEN; GERARD, 1979), entretanto, EHLERS et al. (1983) constataram que limites críticos de RP em torno de 5,0 Mpa são admitidos para sistemas de plantio direto, pois a decomposição de raízes mortas e a ação da macrofauna, propiciam uma grande interligação de poros ao longo do perfil dessas áreas, criando então, pontos estratégicos para o crescimento radicular. No presente estudo notou-se valores de RP superiores 5,0 MPa em camadas subsuperficiais, mas que não comprometeram o

desenvolvimento das plantas, visto que o crescimento médio de todas as árvores do experimento apresentam valores satisfatórios de DAP e Ht (16,28 cm e 22,11 m, respectivamente) aos 56 meses de idade (MONTE et al., 2009; QUIQUI; MARTINS; SHIMIZU, 2001). Este fato pode estar relacionado ao baixo revolvimento do solo nessas áreas florestais, que propicia uma maior conectividade entre os poros ao longo do perfil, e conseqüentemente cria pontos de baixa RP para o crescimento de raízes. SEIXAS e SOUZA (2007) ao avaliarem a influência da frequência de tráfego de máquinas na produção de eucalipto, observaram altos valores de RP para as áreas de muito tráfego, mas não havendo diferença entre a produtividade destas áreas em comparação com as de baixo tráfego.

Em relação a biomassa das árvores, fica evidente a diferença entre os grupos de maior e menor crescimento. Mais estudos do solo devem ser realizados na área para correlacionar outros indicadores de qualidade física com o desenvolvimento das árvores, possibilitando inferir se um manejo para a correção de camadas compactadas resultaria ou não em ganhos de produtividade. Se a diferença de crescimento fosse explicada majoritariamente pelos problemas físicos do solo, uma correção deste atributo poderia resultar em um ganho de até 114 t/ha de biomassa nas árvores de menor crescimento, valor significativo para grandes produtores de eucalipto.

## **5 Conclusão**

A resistência do solo à penetração não foi um indicador eficiente para explicar o crescimento desuniforme das plantas de eucalipto.

O efeito da resistência a penetração foi suprimido em áreas que receberam maiores adubações.

## Referências

- ALMEIDA, R. O. P. O.; SÁNCHEZ, L. E. Revegetação de áreas de mineração: critérios de monitoramento e avaliação do desempenho. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, p. 47–54, 2005.
- ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. S. **A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas***Soil & Tillage Research*, 2009.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um latossolo vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 4, p. 617–625, 2007.
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. **Soil Science Society of America**, v. 49, p. 123–141, 1996.
- BARBOSA, V. et al. Biomassa, carbono e nitrogênio na serapilheira acumulada de florestas plantadas e nativa. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1–9, 2017.
- BARTIERES, E. M. M. et al. Hidrogel, calagem e adubação no desenvolvimento inicial, sobrevivência e composição nutricional de plantas híbridas de eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 86, p. 145, 2016.
- BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 581–588, 2004.
- BIRNBAUM, C. et al. Topsoil Stockpiling in Restoration : Impact of Storage Time on Plant Growth and Symbiotic Soil Biota. **Ecological Restoration**, v. 35, n. 3, p. 237–245, 2017.
- BORGES, S. R. **QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS EM RECUPERAÇÃO COM FORRAGEIRAS E CAFEIEIRO PÓS-MINERAÇÃO DE BAUXITA**. [s.l: s.n.].

CANARACHE, A. PENETR -- a Generalized Semi-empirical Model. **Soil & Tillage Research**, v. 16, n. 1, p. 51–70, 1990.

CARNEIRO, M. A. C. et al. Soil organic carbon , total nitrogen , microbial biomass and activity in two rehabilitation chronosequences after ... **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. April, p. 12, 2008.

DE SÁ, M. A. C. et al. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1610–1622, 2016.

DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 383–390, 2005.

FERREIRA, M. C.; VIEIRA, D. L. M. Topsoil for restoration: Resprouting of root fragments and germination of pioneers trigger tropical dry forest regeneration. **Ecological Engineering**, v. 103, p. 1–12, 2017.

FILHO, J. C. P. et al. Compaction of an inceptisol caused by forest extraction with Skidder. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 199–208, 2014.

FUENTES, M. et al. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. **European Journal of Agronomy**, v. 30, n. 3, p. 228–237, 1 abr. 2009.

HONDA, E. A.; DURIGAN, G. A restauração de ecossistemas e a produção de água. **Hoehnea**, v. 44, n. 3, p. 315–327, 2017.

JUNIOR, G. S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. VARIABILIDADE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM LATOSSOLO ARGILOSO SOB SEMEADURA DIRETA COM ROTAÇÃO DE CULTURAS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 477–484, 2004.

LIMA, C. G. D. R. et al. Atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro e sua

relação com características dendrométricas do eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 163–173, 2010.

MELLONI, R.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. D. S. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área de mineração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 267–279, 2003.

MONTE, M. A. et al. Crescimento de um clone de eucalipto submetido a desrama e desbaste. **Revista Árvore**, v. 33, n. 5, p. 777–787, 2009.

MOTA, J. C. A.; FREIRE, A. G.; JÚNIOR, R. N. DE A. QUALIDADE FÍSICA DE UM CAMBISSOLO SOB SISTEMAS DE MANEJO. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1196–1206, 2013.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de alagoas. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 2, p. 403–415, 2011.

PETRY, H. B. et al. Root distribution of peach rootstocks affected by soil compaction and acidity. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, n. 150135, p. 1–11, 2016.

PIRES, L. S. et al. Erosão Hídrica Pós-Plantio em Florestas de Eucalipto na Região Centro-Leste de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 41, n. 4, p. 687–695, 2006.

PULROLNIK, K. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha - MG(1). **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125–1136, 2009.

QUIQUI, E. M. DEL; MARTINS, S. S.; SHIMIZU, J. Y. Avaliação de espécies e procedências de Eucalyptus para o Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, v. 23, n. 5, p. 1173–1177, 2001.

R CORE TEAM R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for**

**Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <http://www.Rproject.org/>, 2013.

RIBEIRO, M. A. V. et al. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1157–1164, 2010a.

RIBEIRO, S. C. et al. Quantification of Biomass and Estimation of Carbon Stock in a Capoeira in the Mina Gerais Forest Zone. **Revista Arvore**, v. 34, n. 3, p. 495–504, 2010b.

SANDS, R.; GREACEN, E.; GERARD, C. Compaction of sandy soils in Radiata pine forests. I. A penetrometer study. **Australian Journal of Soil Research**, v. 17, n. 1, p. 101, 1979.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. D. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1933.

SEIXAS, F.; SOUZA, C. R. AVALIAÇÃO E EFEITO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO, DEVIDO À FREQUÊNCIA DE TRÁFEGO, NA PRODUÇÃO DE MADEIRA DE EUCALIPTO. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1047–1052, 2007.

SILVA, L. DE C. R. S.; CORRÊA, R. S. SOBREVIVÊNCIA E CRESCIMENTO DE SEIS ESPÉCIES ARBÓREAS SUBMETIDAS A QUATRO TRATAMENTOS EM ÁREA MINERADA NO CERRADO. **Revista Árvore**, v. 32, n. 4, p. 731–740, 2008.

SILVA, S. R. et al. Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um “forwarder” nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 2, p. 371–377, 2007.

SILVA, W. M.; BIANCHINI, A.; CUNHA, C. A. Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 449–459, 2016.

SILVEIRA, D. DE C. et al. RELAÇÃO UMIDADE VERSUS RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO PARA UM ARGISSOLO AMARELO DISTROCOESO NO RECÔNCAVO DA BAHIA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 659–667, 2010.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. DE O. EQUATIONS FOR ESTIMATING THE AMOUNT OF CARBON IN THE AERIAL PARTS OF EUCALYPT TREES IN VIÇOSA , MG , BRAZIL. **Revista Árvore**, v. 26, n. 5, p. 533–539, 2002.

SOUZA, J. A. DE; DAVIDE, A. C. Deposição de serapilheira e Nutrientes em uma mata não minerada e em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de eucalipto (*Eucalyptus salina*) em área de mineração de bauxita. **Cerne**, v. 7, n. 0104–7760, p. 101–113, 2001.

STUMPF, L. et al. Condição física e desenvolvimento radicular de gramíneas em solo construído após mineração de carvão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1078–1087, 2016.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, n.2, p.229-35, 1991.