



Potencial de danos dos sistemas de colheita de madeira no solo e nas cepas

Fernando Seixas

Departamento de Ciências Florestais ESALQ/USP

RESUMO: Os danos causados ao meio ambiente pelo maquinário utilizado na colheita de madeira refletem-se principalmente nos sistemas de regeneração por talhadia, devido geralmente à não realização do preparo de solo, mantendo-se a compactação resultante da colheita, danos ao sistema radicular e impactos diretos sobre as cepas, com prejuízos sobre a capacidade de rebrota e desenvolvimento dos novos fustes.

Neste trabalho são destacados os impactos das operações de colheita sobre o solo em termos de compactação e erosão, as consequências sobre o sistema radicular e exemplos de danos às cepas devido a diferentes sistemas de colheita de madeira.

INTRODUÇÃO

Entre os efeitos das operações de colheita de madeira podemos destacar a compactação do solo, alterações na produtividade do sítio, acúmulo de material combustível, quantidade e qualidade da água e impactos sobre a floresta remanescente (árvores e cepas). A manutenção da capacidade produtiva do sítio consta das prioridades de empresas e instituições florestais há longo tempo, preocupadas principalmente com a exportação de nutrientes com a retirada de biomassa e a perspectiva de diminuição da produtividade nas rotações subsequentes.

Com a proibição do uso do fogo como ferramenta de manejo, a presença dos resíduos da colheita, principalmente na forma de galhos e folhas, passou a constituir-se em fator de dificuldade para o preparo do solo e aumento do risco de ocorrência de incêndios devido ao maior acúmulo de material combustível na floresta. Em contrapartida, esses resíduos atuam como uma camada de proteção contra o impacto das chuvas, efeito este dependente das condições do terreno.

A retirada da cobertura florestal, ou parte desta, implica no aumento da produção de água, podendo variar bastante em um mesmo local ou entre locais diferentes dependendo do



clima, precipitação, geologia, solos, aspectos da bacia hidrográfica, espécies florestais e a proporção explorada da floresta. A redução da transpiração e perdas por interceptação produz solos mais úmidos com menor oportunidade para armazenamento da água das chuvas. Dependendo da época do ano, esse pico na produção de água, causado pelo corte das árvores, pode ter um efeito benéfico em termos de aumento no suprimento de água ou manutenção do habitat para organismos aquáticos. Contudo, esse aumento implica na necessidade de maiores cuidados no planejamento da capacidade de bueiros, pontes e sistemas de drenagem das estradas localizadas abaixo das áreas de corte (Neary & Hornbeck, 1994).

Deve-se considerar também a influência quanto à qualidade da água, afetada principalmente pelo processo de sedimentação, ou seja, a erosão e transporte do solo mineral, pedras e resíduos orgânicos para os cursos d'água. A colheita de madeira aumenta a taxa de erosão

Tabela 1

Efeito da colheita florestal na produção de água no primeiro ano após o corte.

Tipo de floresta; Local	Precip. (mm)	Corte (%)	Aumento da produção (%)
Aspen-Conífera; Colorado, USA	536	100	22
Folhosa-Conífera; Japão	1153	100	71
Costal Redwoods; Califórnia, USA	1200	67	34
Folhosas-Pinheiro; Geórgia, USA	1219	100	54
<i>P. elliotii</i> ; Flórida, USA	1450	56	126
Eucalipto; Austrália	1520	100	106
Douglas-fir; Oregon, USA	2286	100	32

Fonte: Neary & Hornbeck (1994)

e a frequência de deslizamentos de terra, mas não necessariamente o tamanho médio das mesmas. A construção de estradas aumenta todos os três parâmetros das avalanches de escombros. De maneira geral, a colheita isoladamente pode aumentar as taxas naturais de erosão produzidas por deslizamentos por um fator 4, mas as estradas aumentam em até 120 vezes as taxas apresentadas por florestas intocadas em terrenos inclinados (Neary & Hornbeck, 1994).

Estradas de acesso, recentemente construídas ou já existentes, são responsáveis pelo maior potencial de movimento de solo do que qualquer outra atividade de manejo florestal. A erosão é relacionada, entre outras coisas, com: a) fatores físicos, como tipo de solo, geologia e precipitação; b) densidade de estradas, pois as taxas de erosão são diretamente relacionadas com o comprimento total das estradas em uma bacia (Figura 1), considerando-se ótima uma densidade entre 30 a 40 m/ha; c) localização da estrada, em relação à declividade, cursos d'água e solos sensíveis; e d) padrão e construção da estrada, como largura, inclinação dos barrancos laterais e instalações de drenagem.

Por fim, o tráfego de máquinas promove a compactação do solo, reduzindo a produtividade do sítio e aumentando os níveis de erosão. Lockaby & Vidrine (1984) constataram



PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (M³ / ANO)

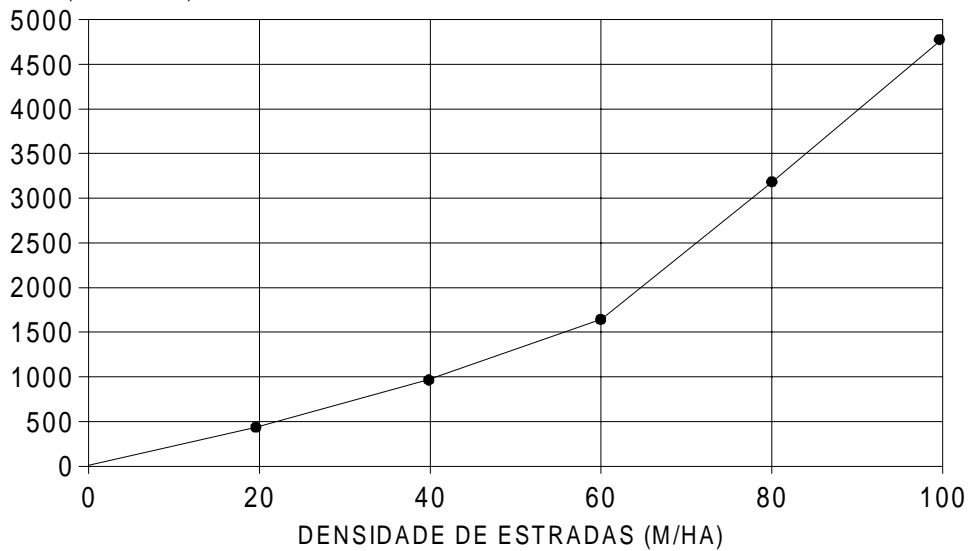


Figura 1

Produção de sedimentos em relação à densidade de estradas (Amimoto, 1978; citado por FAO, 1989).

Tabela 2

Efeitos da colheita de madeira, construção de estradas e outros distúrbios florestais na produção de sedimentos por meio de deslizamentos.

Local	Tratamento	Produção (m ³ /km ² /ano)
Siuslaw Forest, Oregon, USA	Natural	28
	Corte raso	111
	Estradas	3500
Andrews Forest, Oregon, USA	Natural	36
	Corte raso	132
	Estradas	1770
Olympic Mountains, WA, USA	Natural	72
	Estradas	11800
Coast Mountains, B.C., Canada	Natural	11
	Corte raso	24
	Estradas	282
San Dimas Forest, California, USA	Natural	7
	Queima	1907

Fonte: Neary & Hornbeck (1994)



reduções no crescimento em altura de uma floresta de *Pinus taeda* variando entre 40 e 60%, apesar da compactação do solo ter se restringido unicamente aos 5 cm próximos à superfície. Esse decréscimo na produtividade do sítio de solos compactados será, em parte, resultado de uma ou mais das seguintes condições: aumento da densidade aparente do solo; decréscimo da aeração; alteração das características de retenção de umidade; e aumento da resistência do solo.

Este trabalho irá focar os efeitos da colheita de madeira quanto à compactação dos solos, suas características e possíveis meios para sua atenuação, as consequências sobre o sistema radicular e o impacto direto sobre as cepas devido a diferentes sistemas de colheita de madeira.

ASPECTOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

Compactação do solo é definida como a densificação do mesmo através da aplicação de uma carga dinâmica, causando assim um decréscimo na porcentagem de poros do solo devido à mudanças na posição relativa dos grãos e agregados do solo (Li, 1956). Este termo é utilizado para descrever a condição geral do sítio florestal após as operações mecanizadas, embora diversas outras alterações, incluindo distúrbios e deslocamento do solo, também possam ocorrer (Dyrness, 1965).

Indicadores da compactação do solo

A compactação do solo reduz a quantidade de macroporos, espaço poroso responsável pela aeração do solo, e aumenta a proporção de microporos. Como consequência, ocorre um decréscimo na taxa de difusão de oxigênio através do solo e aumenta-se a tenacidade com que a umidade do solo é retida (Hodek & Lovell, 1979; Donnelly & Shane, 1986; Reisinger *et al.*, 1988; Muroski & Hassan, 1991). Vomocil & Flocker (1961) concluíram que um valor mínimo crítico para os macroporos é de 10%.

Um aumento na densidade é representativo do impacto do tráfego de máquinas na compactação do solo. Mudanças na densidade do solo servem como índices das mudanças nas propriedades físicas que regulam o crescimento das raízes. A relação entre densidade e o crescimento da planta é uma associação antes do que causa e efeito. A interpretação dos efeitos da compactação deve ser feita considerando-se uma mudança em porcentagem nos valores médios de densidade (Froehlich & McNabb, 1984; Geist *et al.*, 1989). O nível de compactação considerado prejudicial está por volta de um acréscimo entre 15 a 20% no valor inicial da densidade média do solo (Geist *et al.*, 1989).

Voorhees *et al.* (1978) destacam que leituras de penetrômetro são medidas mais sensíveis da compactação do que a densidade do solo, haja vista que as medições por meio de penetrômetros possuem a vantagem da maior facilidade de coleta no campo, possibilitando um grande número de pontos de amostragem. As desvantagens incluem a influência da presença de raízes e pedras no solo e os efeitos da umidade do solo nas leituras: o aumento da umidade geralmente implica na diminuição da resistência ao penetrômetro.



Fatores influenciando a compactação

Os fatores que influenciam o nível de compactação incluem: a quantidade e distribuição da camada orgânica superficial e resíduos de exploração; textura e estrutura do solo; porcentagem de umidade do solo; peso e função de uma máquina; tamanho da roda e deslizamento; velocidade do equipamento; tipo de carga; experiência do operador; topografia; e clima (Burger, 1983; Sirois *et al.*, 1985).

Pressão no solo

A energia necessária para compactar o solo pode ser obtida do impacto da chuva, crescimento das raízes da planta, tráfego de homens e animais, do peso da vegetação e do próprio solo. Contudo, as principais forças causadoras da compactação em solos florestais originam-se das máquinas utilizadas nas atividades de manejo e colheita da madeira.

A distribuição da pressão no solo sob as rodas dos veículos irá depender de: a) peso do veículo, que irá determinar a força total sobre o solo; b) área de contato entre a roda e o solo, que irá determinar a pressão; c) distribuição da força na área de contato; e d) conteúdo de umidade e densidade inicial (Soenne, 1958, citado por Bacchi, 1976).

A intensificação da mecanização nos últimos anos tem gerado uma maior preocupação quanto aos possíveis efeitos no solo. Kerruish (citado por Greacen & Sands, 1980) apresenta alguns dados (Tabela 3) sobre as pressões de contato aproximadas para algumas máquinas florestais.

Nas operações florestais, geralmente o eixo traseiro das máquinas suporta maior carga do que o frontal. No caso de um “skidder” JD 740 de 6,5 t, operando com carga máxima, estimou-se uma pressão de aproximadamente 26 kPa sob os pneus dianteiros e cerca de 80 kPa sob os pneus traseiros. Além disso, tensão de cisalhamento também é gerada pelos pneus e outros tipos de rodado, adicionando-se à tensão causada pelas atividades de movimentação de toras, resultando aproximadamente em forças de 80 kPa. Isto pode ter um efeito de compactação de mais do que o dobro da carga estática normal.

Enquanto as pressões das rodas concentram-se no solo imediatamente abaixo do rodado, elas podem ser detectadas em profundidades consideráveis no perfil do solo. Danfors (1974) mediu compactação do solo sob cargas de 16 t a uma profundidade de 50-60 cm, persistente após 3 anos. Ele concluiu que com cargas pesadas, a magnitude da tensão em Tabela 3

Valores de pressão de contato para máquinas florestais.

Equipamento	Pressão (kPa)
Sistemas de cabo, teleféricos	0
“Skidder” de esteiras flexíveis	30-40
Trator de esteiras	50-60
“Skidder” de pneus	55-85
“Forwarder” com eixo duplo traseiro	85-100
“Forwarder” com eixo simples traseiro	105->125



profundidades maiores do que 40 cm é devida principalmente à carga e não à pressão de contato. Acima dessa profundidade, pode-se obter uma redução significativa na tensão do solo quando forem utilizados equipamentos com baixa pressão de contato.

Greacen & Sands (1980) consideram que o grau e extensão da compactação resultante das operações de colheita de madeira não estão bem documentados. Van Der Weert (1974) reportou um acréscimo de 30% na densidade aparente do solo após corte raso em uma floresta do Suriname. Dickerson (1976) demonstrou um aumento médio de 20% na densidade do solo após o arraste de toras longas em talhões no estado do Mississippi. Froehlich (1973), em uma revisão sobre os efeitos do manejo florestal nas propriedades físicas do solo no Oeste dos EUA, concluiu que 50 % da área colhida por máquinas sofreram algum distúrbio e 25% podem ser considerados como compactados.

Outras fontes de compactação referem-se ao movimento de grandes árvores devido à ação do vento, o próprio peso das árvores e a pressão exercida pelo crescimento das raízes, compactando a área ao redor das raízes em expansão. As raízes das árvores podem persistir por muitas décadas e crescer até tamanhos com efeitos maiores do que aqueles das culturas agrícolas. Ryan & McGarity (1978) encontraram um aumento na densidade do solo de 1,1 para 1,4 g.cm³ ao redor de raízes de uma árvore de *E. grandis* com 2 m de diâmetro.

Umidade

Os efeitos do conteúdo de umidade alteram-se com as características do solo e o esforço de compactação aplicado sobre o mesmo. Se a porcentagem de umidade aumenta, a resistência à compactação diminui, devido à maior lubrificação das partículas, até que se atinja os limites plásticos inferiores e o conteúdo de umidade de aração ótimo, onde o pico de compactação ocorre. Acima do conteúdo de umidade ótimo, próximo do ponto de saturação de cada tipo de solo, o aumento da umidade resulta em uma redução da densidade, chegando mesmo a causar a destruição da estrutura do solo (Weaver & Jamison, 1951; Sidle & Drlica, 1981; Silva, 1984). A umidade do solo afeta mais a compactação próximo ao potencial de água ao redor da capacidade de campo, quando as mudanças na estrutura do solo estão mais propensas a ocorrerem (Braunack & Dexter, 1978). Raghavan *et al.* (1981) determinaram o pico de compactação para um solo arenoso com um conteúdo de umidade de 32%. Em um solo argiloso esse pico ocorreu a 35% de umidade.

O conteúdo de umidade no momento em que o solo está sendo compactado tem uma grande influência na redução e redistribuição do espaço poroso. Solos secos são mais resistentes à mudanças na distribuição do tamanho dos poros e essa resistência reduz-se com o aumento do conteúdo de umidade (Eavis, 1972). As propriedades físicas do solo são impactadas em escala maior em áreas exploradas sob condições úmidas (conteúdo gravimétrico de umidade > 10%) do que áreas mais secas. Em um estudo de Rachal & Karr (1988) a densidade do solo aumentou 23.3% e 17.6% em áreas úmidas e secas, respectivamente.

Um método usual para minimizar a compactação do solo é restringir as operações das máquinas com base na textura ou condições de umidade, que envolve a interpretação de um teste de compactação emprestado da engenharia (Teste de Proctor). O teste produz uma curva densidade-umidade que é específica para o solo; ela é, porém, uma função da pressão



aplicada no solo. Com o decréscimo no esforço de compactação, o pico da curva densidade-umidade ocorre a uma densidade aparente menor e em um maior conteúdo de umidade. Portanto, se esse teste é para prover informações sobre como a textura e umidade do solo afetam a compactação, a curva densidade-umidade deve representar condições específicas do sítio.

Enquanto limitar as operações de máquinas para períodos onde a umidade do solo esteja abaixo de um nível específico pode reduzir a compactação em alguns solos (Chancellor, 1971; Miles *et al.*, 1981), outros possuem curvas densidade-umidade praticamente planas e são compactados à densidades aparentes similares sob uma ampla gama de conteúdos de umidade

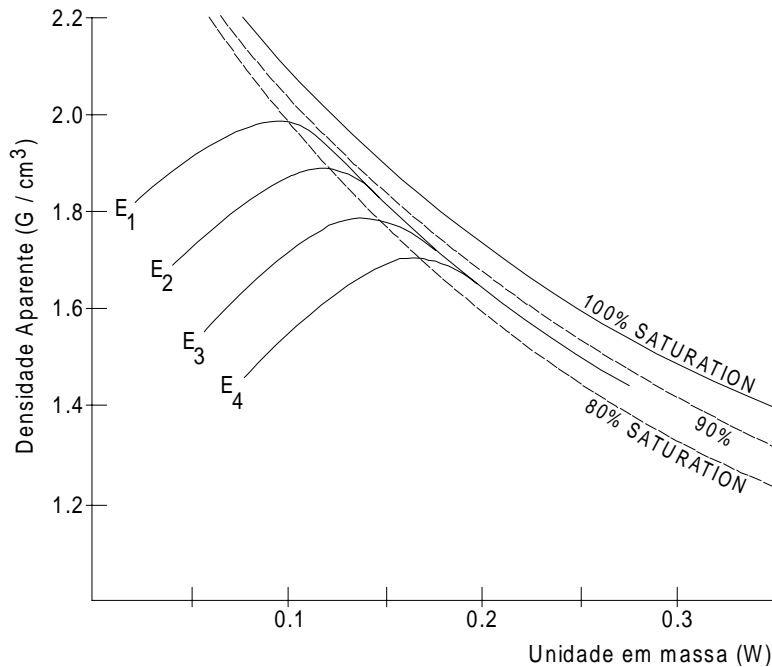


Figura 2

Família de curvas densidade-umidade para diferentes esforços de compactação ($E_1 > E_2 > E_3 > E_4$) (Hillel, 1982).

do solo (Soehne, 1958; Raghavan *et al.*, 1977; Froehlich *et al.*, 1980). O quanto de compactação que ocorre sob diferentes conteúdos de umidade parece estar relacionado com a distribuição de tamanhos de partículas e a mineralogia da fração argila do solo. Com base nas curvas densidade-umidade de baixa energia, a compactação em solos de textura grosseira bem graduados e textura fina com minerais de argila expansiva é de alguma maneira afetada pelo conteúdo de umidade (sensíveis à umidade), mas solos de textura grosseira mal graduados e solos de textura fina com minerais de argila não expansível compactam à densidades similares independentemente do conteúdo de umidade (insensíveis à umidade). Somente solos bem graduados têm finos suficientes para preencher os poros entre os grãos de solo maiores; solos pobremente graduados possuem muito ou pouco



finos. Apesar de um solo ser classificado como sensível ou insensível à umidade, compactação substancial pode ocorrer em qualquer conteúdo de umidade.

Uma curva de densidade-umidade pode sugerir a quantidade de compactação e o efeito que a umidade pode ter em alguns solos; contudo, uma simulação de compactação deve ser selecionada de maneira a produzir uma curva densidade-umidade com densidades aparentes equivalentes às aquelas causadas pelas máquinas de colheita de madeira. Isto difere do uso tradicional das curvas densidade-umidade para prover um padrão de controle de qualidade para avaliação do solo como material construtivo.

As curvas densidade-umidade obtidas pelo teste de Proctor superestimam as densidades aparentes normalmente produzidas pelas máquinas de colheita e subestimam o conteúdo ótimo de umidade. Uma solução encontrada, modificando a versão original do teste de Proctor usando somente 8% da energia do teste padrão (10 pancadas para cada uma das três camadas com um martelo pesando 1/5 do peso normal), propiciou estimativas mais razoáveis da densidade do solo em trilhas de arraste de madeira (Froehlich *et al.*, 1980).

Número de passadas de máquinas

McNabb & Froehlich (1983) concluíram que a pressão máxima desenvolvida pela roda ou esteira, incluindo o peso das toras e efeitos da declividade na distribuição do peso, era significativa na previsão da compactação do solo. Mas, essa pressão era responsável por uma pequena parcela dessa variação. O número de passadas da máquina e uma medida de índice de cone da resistência inicial do solo eram variáveis de predição muito mais importantes.

Esses mesmos autores concluíram que a maior parte da compactação total em uma trilha de arraste já ocorria nas primeiras passadas de uma máquina. Pelo menos 60% do aumento esperado para a densidade em uma trilha com uso elevado (mais de 20 passadas) ocorriam após as primeiras 3 a 5 passadas. Esses resultados foram confirmados por Hatchell *et al.* (1970), Froehlich & McNabb (1984) e Koger *et al.* (1985).

Tamanho do pneu

O uso de pneus mais largos ou pneus duplos em “skidders” tem sido avaliado visando a redução de danos ao sítio. Benefícios potenciais do uso de pneus mais largos de alta flutuação (34 a 68”) sobre pneus convencionais mais estreitos incluem: aumento da produtividade em solos úmidos e terrenos inclinados mais acidentados, economia de combustível, reduções substanciais nos distúrbios do terreno (sulcamento) e compactação e melhoria na estabilidade (Mellgren & Heidersdorf, 1984). O aumento no diâmetro do pneu irá diminuir o esforço de tração, enquanto que o acréscimo na largura do pneu pode reduzir o esforço de tração que é necessário devido ao aumento na flutuação e redução na resistência ao rolamento (Makkonen, 1989).

As operações de colheita com “skidders” de pneus largos em áreas mais úmidas ainda causam danos devido à redução da drenagem e aeração do solo, mas em níveis menores quando comparado com o uso de pneus mais estreitos. Os pneus mais largos distribuem o peso da máquina sobre uma maior superfície de contato, resultando assim em menor pressão



no terreno, o que ocasiona menor compactação do solo. Esses pneus maiores possibilitam um maior acesso aos sítios mais úmidos, anteriormente inoperáveis para os tratores de pneus estreitos, mas têm o potencial de aumentar os danos nesses locais (Aust *et al.*, 1991; Aust *et al.*, 1992).

Trabalhando em áreas pantanosas na Carolina do Sul (EUA), Koger *et al.* (1984) relatam que o uso de “skidders” com duplagem de pneus melhorou significativamente a traficabilidade e causou um menor sulcamento do que os tratores com pneus simples. Greene & Stuart (1985) concluíram que a compactação em solos secos não reduziu-se devido ao uso de uma máquina de menor tamanho ou o aumento das dimensões do pneu. Porém, quando os solos eram úmidos, o aumento no tamanho do pneu reduziu significativamente a compactação na camada superficial do solo. Os pneus mais largos melhoram a colheita florestal e reduzem os distúrbios no solo, em algumas situações de maior umidade no solo, mas ainda necessitam um planejamento adequado e uma avaliação precisa para comparar as suas vantagens com o seu maior preço de aquisição (Heidersdorf & Ryans, 1986).

A pressão de inflagem do pneu também é importante. Na pressão indicada, um pneu tem o mais longo comprimento utilizável e a maior área de contato, o que resulta na maior capacidade de tração e menor pressão de contato no solo. Em pressões menores o pneu sofre uma deflexão excessiva e prejudicial (Wiley *et al.*, 1992).

Camada de resíduos

Wronski (1990) concluiu que camadas de resíduos florestais proporcionavam uma redução significativa na formação de sulcos e aumento na capacidade de suporte do solo. Para cada 10 kg/m² adicionais de resíduo, colocados sobre outros 10 kg/m², havia um aumento aparente de 25% na resistência do solo. Seixas *et al.* (1995) detectaram reduções significativas na compactação do solo devida a um “forwarder” trafegando sobre camada de resíduos da colheita de madeira. Coberturas de galhos e acículas com densidades de 10 e 20 kg/m² reduziram em média cerca de 40 por cento do incremento na densidade do solo observado em parcelas sem cobertura.

CRESCIMENTO DO SISTEMA RADICULAR

O decréscimo na produção de uma cultura após a compactação do solo reflete os efeitos sobre o sistema radicular das plantas que podem incluir interações complexas entre resistência do solo, disponibilidade de água e nutrientes, aeração e populações micorrízicas (Greacen & Sands, 1980). Fatores que são frequentemente ignorados são a quantidade e frequência da precipitação e as características de drenagem do solo (Smith, 1977). As raízes devem suplantar a resistência do solo para penetrar nos poros de menor diâmetro do que elas mesmas. Devido a compactação aumentar a resistência do solo e diminuir o número de macroporos, a taxa de alongamento das raízes, portanto o comprimento das raízes, é reduzida. A taxa de alongamento típica é reduzida exponencialmente com o aumento da resistência do solo (medida pela resistência ao penetrômetro), mas existe um limite de resistência (q_c) a partir do qual a penetração das raízes efetivamente cessa. Greacen *et al.* (1969) tabularam valores de q_c no limite de 800-5000 (média 2500) kPa dependendo da espécie, tipo de solo e



características do penetrômetro. A relação entre o crescimento da raiz e a resistência do solo é desconhecida para diversas espécies florestais. Zyuz (1968) reporta um crescimento abundante de raízes de pinheiro em solos de resistência menor do que 1700 kPa, mas aquele crescimento era mais restrito acima de 2500 kPa (citados por Greacen & Sands, 1980). A penetração de raízes de *Pinus radiata* em solos arenosos no sul da Austrália é deficiente em resistências do solo maiores do que 3000 kPa (Sands *et al.*, 1979).

Froehlich (1977) avaliando árvores remanescentes de desbaste em um povoamento de Douglas-fir, concluiu que árvores que tiveram entre 10 a 40% da sua zona radicular compactada 10% ou mais acima da densidade original, produziram 14% menos de crescimento em área basal. Árvores bastante impactadas, tendo mais do que 40% da sua zona radicular compactada, apresentaram em média um crescimento 30% menor em área basal persistente por 5 a 12 anos após o desbaste.

Devido ao fato de que a resistência usualmente decresce quando o solo se torna mais úmido, não é óbvio se o melhor crescimento da raiz em solos úmidos é devido à menor resistência do solo, maior quantidade de água ou uma combinação de ambos os fatores. A compactação do solo pode reduzir a macroporosidade a tal ponto que o crescimento ou mesmo a sobrevivência das raízes seja determinado pela disponibilidade de oxigênio quando o solo estiver úmido. Isto irá ocorrer quando as exigências de oxigênio para respiração no solo excederem a taxa com a qual o oxigênio no solo pode ser repostado pela atmosfera. Um espaço de macroporos ao redor de 10% é sempre citado como o mínimo necessário para a manutenção do crescimento de culturas agrícolas sobre o solo (Vomocil & Flocker, 1961; Grable, 1971; Greenwood, 1975), apesar de alguns trabalhos detectarem uma paralisação do crescimento das raízes em percentuais de macroporos menores do que 35% (Eavis, 1972; Warnaars & Eavis, 1972; Bar-Yosef & Lambert, 1981; Voorhees, 1983).

Quando os solos são compactados, ocorre uma redução significativa no crescimento das raízes, antes que a aeração torne-se um problema. Sands & Bowen (1978) encontraram que a compactação em um solo arenoso com densidade entre 1,35 - 1,6 g cm³ causou um decréscimo de 87% no peso seco das raízes de mudas de *Pinus radiata* quando a porosidade com ar na densidade de 1,6 g.cm⁻³ era de 21%. É difícil prever os efeitos da compactação do solo no crescimento no campo devido às interações envolvidas. A maior resistência do solo pode ocasionar um sistema de raízes ocupando um menor volume de solo, mas isto não significa necessariamente que o crescimento da planta será menor. Se o fornecimento de água, ar e nutrientes for o suficiente e o comprimento das raízes atender à planta, então o seu crescimento não será prejudicado em virtude da restrição do sistema radicular. Sob essas circunstâncias, a compactação pode inclusive ser benéfica devido à maior retenção de água e condutividade hidráulica. O consumo de íons móveis (ex. nitrato), que movem-se no solo principalmente pelo fluxo de massas, pode ser melhorado. A captação de íons mais inertes (ex. fósforo, cobre e potássio), que movem-se no solo por difusão, também pode ser melhorada porque a compactação aumenta o coeficiente de difusão aparente dos íons da mesma forma que coloca mais íons em um determinado volume de solo. Mas a difusão pode ser reduzida com a continuidade da compactação por causa da maior tortuosidade das vias de difusão. Os resultados dos trabalhos de pesquisa são variáveis e muitas vezes conflitantes, podendo ser mascarados pela influência de outros fatores que não propriamente a compactação do solo.



Os efeitos da compactação no suprimento de água para uma cultura podem depender da frequência, intensidade e quantidade da precipitação. Em um ano seco, a água do solo pode limitar o crescimento da árvore cujo sistema radicular esteja restrito pela compactação. Em um ano chuvoso, a água do solo pode ser adequada e a menor resistência do solo pode estimular uma maior expansão das raízes. Contudo, para uma precipitação acima de uma certa intensidade, o “runoff” pode aumentar devido à taxa de infiltração menor e a água do solo pode-se tornar limitante. Excesso de chuva pode causar alagamento e problemas de aeração associados na zona de raízes se a compactação tiver produzido uma camada de permeabilidade reduzida à passagem de água.

As mudanças na resistência do solo e aeração parecem ser os dois principais resultados da compactação que afetam o crescimento das raízes. A sua importância relativa é determinada pela frequência de precipitação, demanda da planta por água e características de drenagem do sítio. Aeração geralmente não é problema em solos de textura grosseira bem drenados, onde o crescimento da raiz pode ser diretamente relacionado com a resistência do solo (Taylor *et al.*, 1966; Sands & Bowen, 1978). Ela é um problema mais sério em solos de textura fina onde a porcentagem de macroporos é baixa e a drenagem lenta. Se nutrientes e água estão disponíveis, a produtividade da cultura pode não reduzir devido à maior resistência do solo, embora o volume do sistema radicular possa diminuir (Taylor & Bruce, 1968). Portanto, água ou nutrientes tornam-se limitantes somente quando a demanda da planta exceda a habilidade do sistema radicular em penetrar solos de alta resistência.

O crescimento de raízes é sempre reduzido proporcionalmente às mudanças na densidade aparente até um valor máximo (Heilman, 1981). Esse valor de densidade máximo não pode ser usado como valor “crítico” para uma certa classe textural porque a densidade aparente na qual o alongamento da raiz diminui ou cessa também é dependente das características de disponibilidade de umidade, resistência e aeração de um solo e sítio específicos (Taylor & Gardner, 1963; Taylor *et al.*, 1966). O conceito de um valor de densidade aparente “crítica” somente é válido se ele for específico ao tipo de solo e se definam as condições climáticas do sítio e de umidade do solo para o qual esteja sendo aplicado.

Embora valores de densidade aparente não sejam diretamente relacionados com os efeitos da compactação no crescimento das raízes, as mudanças na densidade servem como índices das mudanças nas propriedades físicas que regulam esse crescimento. A relação entre densidade aparente e crescimento da planta é uma associação antes que uma causa e efeito e a extrapolação de uma associação para sítios e solos diferentes não é apropriada. Quando se quantificar a resposta da planta à compactação, as mudanças relativas na densidade aparente são mais úteis do que a densidade absoluta, desde que as diferenças nas densidades iniciais não sejam excessivas.

IMPACTOS DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA DE MADEIRA NAS CEPAS

Em um dos poucos trabalhos publicados sobre o assunto, Machado *et al.* (1990) relatam que a extração de madeira com guincho arrastador afetou cerca de 3% das cepas de um plantio de *Eucalyptus alba*, sendo que somente 15% dessas cepas atingidas durante o arraste não brotaram, ou seja, 11 cepas por hectare.



Um experimento instalado pela Cia. Champion procura avaliar o impacto do sistema de colheita “feller-buncher + skidder” sobre a brotação em um talhão de eucalipto híbrido (*E. grandis* e *E. urophylla*), usando como referência um sistema de corte por motosserra e transporte com caminhões. Valores médios em termos de percentual de área impactada da cepa e presença de brotação encontram-se na Tabela 4 (Seixas, 1996). A princípio foi detectada uma relação entre altura e desgaste da cepa com a eficiência de brotação. O desgaste em uma cepa mais baixa foi mais prejudicial em termos de brotação, mas os valores percentuais de área de cepa impactada, obtidos visualmente, podem ter sofrido influência pessoal, sugerindo-se o estabelecimento de padrões de avaliação visual de cepas.

Outro levantamento feito em plantios de *Eucalyptus grandis* da Cia. Duratex (Seixas, 1996) possibilita a comparação dos efeitos sobre a brotação entre “feller-buncher” (Cat 320L) + processador (Cat 320) e “harvester” (SISU 601). A magnitude dos valores apresentados na Tabela 4 pode ter sido influenciada por um período de seca e geada, ocorrido em 1994, que ocasionou a morte de diversas árvores confundindo-se as causas da ausência de brotação. Mesmo assim, é possível concluir pela vantagem do “harvester” sobre os demais equipamentos após dois meses do corte. Os estragos nas cepas estão relacionados também com o tempo de

Tabela 4

Avaliação de área de cepa impactada e presença de brotação devido à ação de sistemas de colheita de madeira em um talhão de eucalipto híbrido (*E. grandis* e *E. urophylla*) após 2 meses do corte.

Impacto (%)	Nº Cepas	Com Brotação	Sem Brotação
“Feller-buncher Hydro Ax 611E + Skidder Cat 525”			
0-25	3 (3,4%)	3 (100,0 %)	
26-50	15 (17,1%)	11 (73,3 %)	4 (26,7 %)
51-75	23,5 (26,9%)	21,5 (91,5 %)	2 (8,5 %)
76-100	46 (52,6%)	35,5 (77,2 %)	10,5 (22,8 %)
Totais	87,5 (100,0%)	71,0 (81,1 %)	16,5 (18,9 %)
Motosserra + Caminhão			
0-25	59,5 (74,4%)	59 (99,2 %)	0,5 (0,8 %)
26-50	14 (17,5%)	13,5 (96,4 %)	0,5 (3,6 %)
51-75	4,5 (5,6%)	4 (88,9 %)	0,5 (11,1 %)
76-100	2 (2,5%)	2 (100,0 %)	
Totais	80,0 (100,0%)	78,5 (98,1 %)	1,5 (1,9 %)

experiência dos operadores, ainda em fase inicial de treinamento. Esta afirmativa pode ser confirmada pela comparação com os dados da Tabela 5, obtidos imediatamente após o corte, tendo os operadores mais dois meses de experiência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



AUST, W.M.; T.W. REISINGER; J.A. BURGUER & B.J. STOKES. Site impacts associated with three timber harvesting systems operating on wet pine flats. *Sixth Biennial Southern Silvicultural Research Conference*, Memphis, Tennessee, October 3 - November 1, 1990. 1991.

Tabela 5

Avaliação de área de cepa impactada (%) e presença de brotação devido à ação de sistemas de colheita de madeira em um talhão de *Eucalyptus grandis* após 2 meses do corte.

Impacto (%)	Nº Cepas	Com Brotação	Sem Brotação
“Feller-buncher” + Processador + “Forwarder” SISU 626			
0-25			
26-50	1,5 (1,9%)	1,5 (100,0 %)	
51-75	19,0 (24,0%)	15,5 (81,6 %)	3,5 (18,4 %)
76-100	58,5 (74,1%)	42,5 (72,7 %)	16,0 (27,3 %)
Totais	79,0 (100,0%)	59,5 (75,3 %)	19,5 (24,7 %)
“Harvester” + “Forwarder” SISU 626			
0-25	13,0 (14,3%)	12,0 (92,3 %)	1,0 (7,7 %)
26-50	21,5 (23,8%)	18,0 (83,7 %)	3,5 (16,3 %)
51-75	22,5 (24,9%)	20,5 (91,1 %)	2,0 (8,9 %)
76-100	33,5 (37,0%)	30,5 (91,0 %)	3,0 (9,0 %)
Totais	90,5 (100,0%)	81,0 (89,5 %)	9,5 (10,5 %)

Tabela 6

Avaliação de área de cepa impactada (%) devido à ação de “harvester” SISU 601 em um talhão de *Eucalyptus grandis* imediatamente após o corte.

Impacto (%)	Nº Cepas
0-25	51 (47,7%)
26-50	29 (27,1%)
51-75	8 (7,5%)
76-100	19 (17,8%)
Total	107 (100,0%)

AUST, W.M.; T.W. REISINGER; B.J. STOKES & J.A. BURGUER. Tire performance as a function of width and number of passes on soil bulk density and porosity in a minor stream bottom. In: *Seventh Biennial Southern Silvicultural Research Mobile, 1992. Conference*, Anais. 1992.

BACCHI, O.O.S. Efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de açúcar. Piracicaba, 1976. 67 p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.

BAR-YOSEF, B. & LAMBERT J.R. Corn and cotton root growth in response to soil impedance and water potential. *Soil Sci. Am. J.*, n.45, p. 930-5, 1981.

BRAUNACK, M.C. & A.R. DEXTER. Compaction of aggregate beds. In: W.W. EMERSON, R.D. BOND & A.R. Dexter



- (eds.) *Modification of soil structure*, New York: John Wiley & Sons, 1978. p.119-26.
- BURGER, J.A. Physical impacts of harvesting and site preparation on soil. *Proc. Soc. Am. For., Appalachian section annual meeting*. 9 p. 1983.
- CHANCELLOR, W.J. Compaction as it affects soil conditions. 5E. Effects of compaction on soil strength. In: *Compaction of agricultural soils, ASAE Monograph*, St. Joseph: Mich. 1971. P. 154-63.
- DANFORS, B. *Compaction in the subsoil*. Swed. Inst. Agric. Eng. Spec. Publ. 5. 1974.
- DICKERSON, B.P. Soil compaction after tree-length skidding in northern Mississippi. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, n.40, p. 965-6, 1976.
- DONNELLY, J.R. & J.B. SHANE. Forest ecosystem responses to artificially induced soil compaction. I. Soil physical properties and tree diameter growth. *Canadian Journal of Forest Research*, v.16, p. 750-4, 1986.
- DYRNESS, C. Soil surface condition following tractor and high-lead logging in the Oregon Cascades. *Journal of Forestry*, n.63, p. 272-5, 1965.
- EAVIS, B.W. Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant and Soil*, v.36, p. 613-22, 1972
- FAO. *Watershed management field manual - Road design and construction in sensitive watersheds. FAO Conservation Guide 13/5*, Rome, 1989. 196p.
- FROELICH, H.A. The impact of even-age forest management on physical properties of soils. In: *Even-age Management*. (Eds. R.K. Hermann & D.P. Lavelle) pp. 190-220. 1973 (School of Forestry, OSU: Corvallis).
- *Soil compaction: why the controversy? Loggers Handbook*. 37: 20-2. 1977.
- FROELICH, H.A.; J., AZEVEDO; P., CAFFERATA & D., LYSNE. *Predicting soil compaction on forested land. Final Project Report, Coop. Agreement No.228*. USDA Forest Service, equip. Dev. Center, Missoula, Mont. 1980.
- FROELICH, H.A. & D.H. McNABB. Minimizing soil compaction in Pacific Northwest Forests. In: *Earl L. Stone (Ed.) Forest Soils and Treatment Impacts. Proc. of Sixth North American Forest Soils Conference. Univ. of Tenn. Conferences, 2016 Lake Ave., Knoxville*. June 1983. p. 159-92. 1984.
- GEIST, J.M.; J.W. HAZARD & K.W. SEIDEL. Assessing physical conditions of some Pacific Northwest Volcanic ash soils after forest harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.53, p. 946-50, 1989.
- GRABLE, A.R. Effects of compaction on content and transmission of air in soils. In: *Compaction of Agricultural Soils. Am. Soc. Agric. Eng., Monogr.*, pp. 154-64. 1971.
- GREACEN, E.L. & SANDS, R. Compaction of forest soils. A review. *Australian Journal of Soil Research*, v.18, p. 163-89, 1980.
- GREENE, W.D. & W.B. STUART. Skidder and tire size effects on soil compaction. *Southern Journal of Applied Forestry*, v.9, n.3, p. 154-7, 1985.
- GREENWOOD, D.J. Measurements of soil aeration. In: *Soil Physical Conditions and Crop Production. Tech. Bull. Min. Agric. Fish. Food*, v.29, p. 261-72, 1975.
- HATCHELL, G.E.; C.W. RALSTON & R.R. FOIL. Soil disturbance in logging. *Journal of Forestry*, v.68, p. 772-5, 1970.
- HEIDERSDORF, E. & M. RYANS. Joint Feric / Mer high-flotation tire trials, Quebec, 1984. *Feric technical report*, v.64, p. 1-45, out. 1986.
- HEILMAN, P. Root penetration of Douglas-fir seedlings into compacted soil. *Forest. Science*, v.27, p. 660-6, 1981.
- HILLEL, D. *Introduction to soil physics*. San Diego: Academic Press, 1982. 364p.
- HODEK, R.J. & C.W. LOVELL. A new look at compaction process in fills. *Bull. Assoc. Eng. Geol.*, v.16, p. 487-99, 1979.
- KOGER, J.L.; C. ASHMORE & B.J. STOKES. Ground skidding wetlands with dual-tired skidders: A South Carolina case study. *ASAE Paper*, v.80, n.1618, p. 1-13, 1984.
- LI, C.Y. Basic concepts on the compaction of soil. *ASAE, Journal of Soil Mechanics, Foundation Division*, v.82, p. 1-20, 1956.
- LOCKABY, B.G. & VIDRINE, C.G. Effect of logging equipment traffic on soil density and growth and survival of young loblolly pine. *Southern Journal of Applied Forestry*, v.8, n.2, p. 109-112, 1984.
- MACHADO, C.C.; S.A., IGNÁCIO; A.B., VALE & H.S., SOUZA JR. Efeito da extração de madeira com guincho arrastador na brotação do *Eucalyptus alba*. *SIF, Revista Árvore*, v.14, n.1, p. 55-60, 1990.
- MAKKONEN, I. Evaluation of Timberjack 230 8-ton forwarder. *FERIC Technical Note*, v.140, p.1-6, nov. 1989.
- McNABB, D.H. & H.A. FROELICH. Conceptual model for predicting forest losses from soil compaction. In: *Proceedings of the 1983 SAF National Convention*. 1983. p. 261-5.



- MELLGREN, P.G. & E. HEIDERSDORF. The use of high flotation tires for skidding in wet and/or steep terrain. *FERIC Technical Report*, n.57, p. 1-48, 1984.
- MILES, J.A.; HARTSOUGH, B.R.; AVLANI, P. & CHANCELLOR, W.J. A soil compaction study on the Blodgett Experimental Forest. In: *Forest regeneration, Proc. Symp. Eng. Systems for Forest Regeneration, ASAE*, St. Joseph: Mich. 1981. p. 72-81.
- MUROSKEY, D.L. & A.E. HASSAN. Impact of tracked and rubber-tired skidders traffic on a wetland site in Mississippi. *Transactions of the ASAE*. v.34, n.1, p. 322-7, 1991.
- NEARY, D.G. & HORNBECK, J.W. Impacts of harvesting and associated practices on off-site environmental quality. In: DYCK, W.J.; COLE, D.W. & COMERFORD, N.B. *Impacts of forest harvesting on long-term site productivity*. London: Chapman & Hall, 1994. P. 81-118.
- RACHAL, J.M. & B.L. KARR. Effects of current harvesting practices on the physical properties of a loessal soil in West-Central Mississippi. p. 527-32, In: JAMES H. MILLER (ed.), *Proceedings of the 5th Biennial Southern Silvicultural Research Conference*; 1988 November 1-3; Memphis, TN. 618 p. 1988.
- RAGHAVAN, G.S.; MCKEYES, V.E. & BEAULIEU, B. Prediction of clay soil compaction. *J. Terra Mech.*, v.4, p. 31-8, 1977.
- RAGHAVAN, G.S.V.; E. MCKEYES & F. TAYLOR. Soil compaction effects on soil productivity. p. 90-7. In: *Forest Regeneration. ASAE Pub.* 10-81. 1981.
- REISINGER, T.W.; G.L. SIMMONS & P.E. POPE. The impact of timber harvesting on soil properties and seedling growth in the South. *Southern Journal of Applied Forestry*, v. 12, n.1, p. 58-67, 1988.
- RYAN, P.J. & MCGARITY, J.W. Spatial variability of soil properties under forest species." Proc. Tri-branch Conference, *Aust. Soil Sci. Soc. Armidale*, p. 9-19, 1978.
- SANDS, R. & BOWEN, G.D. Compaction of sandy soils in radiata pine forests. II. Effects of compaction on root configuration and growth of radiata pine seedlings. *Australian Forest Research*, v.8, p. 163-70, 1978.
- SANDS, R.; GREACEN, E.L. & GERARD, G.J. Compaction of sandy soils in radiata pine forests. I. A penetrometer study. *Australian Journal of Soil Research*, v.17, p. 101-13. 1979.
- SEIXAS, F.; MCDONALD, T.P.; STOKES, B.J. & RAPER, R.L. Effect of slash on forwarder soil compaction. In: *Proceedings of the 1995 COFE Annual Meeting. COFE*, Cashiers, NC, p: 77-86, 1995.
- SIDLE, R.C. & D.M. DRLICA. Soil compaction from logging with a low-ground pressure skidder in the Oregon Coast Ranges. *Soil Science Society of America Journal*, v.45, n.6, p. 1219-24, 1981.
- SILVA, A.P. Influencia da compactacao nas propriedades fisicas do solo e no sistema radicular de plantas de algodao (*Gossypium hirsutum* L.). Piracicaba, 1984, 92p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.
- SIROIS, D.L.; B.J. STOKES & C. ASHMORE. Primary transport of wood on sensitive sites in the Southeast. In: *Proc. 1985 Counc. For. Eng.*, p. 122-7. 1985.
- SMITH, K.A. *Soil aeration*. *Soil Sci.* 123: 284-91. 1977.
- SOEHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agric. Eng.* v.39, p. 276-81, 290, 1958.
- TAYLOR, H.M. & GARDNER, H.R. Penetration of cotton seeding taproots as influenced by bulk density, moisture content and soil strength. *Soil Science*, v.96, p. 153-6, 1963.
- TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M. & PARKER JR., J.J. Soil strength-root penetration relations for medium-to-coarse-textured soil materials, *Soil Science*, v.102, p. 18-22, 1966.
- TAYLOR, H.M. & BRUCE, R.R. Effects of soil strength on root growth and crop yield in the southeastern United States. *Trans. 9th Intl. Congr., Soil Science*, v.1, p. 803-11, 1968.
- VAN DER WEERT, R. Influence of mechanical forest cleaning on soil conditions and the resulting effects on root growth. *Tropical Agricultural*, v.51, p. 325-31, 1974.
- VOMOCIL, J.A. & W.J. FLOCKER. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. *Transactions of the ASAE*, v.4, n.2, p. 242-6, 1961.
- VOORHEES, W.B.; C.G. SENST & W.W. NELSON. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt. *Soil Science Society of American Journal*, v.42, p. 249-344, 1978.
- VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Science Society of American Journal*, v.47, p. 129-33, 1983.
- WARNAARS, B.C. & EAVIS, B.W. Soil physical conditions affecting seedling root growth. II. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by grain-size distribution and moisture content in silica sands. *Plant Soil*, v.36, p.623-4, 1972.
- WEAVER, H.A. & V.C. JAMISON. Effects of moisture on tractor tire compaction of soil. *Soil Science*, v.71, n.1, p. 15-23, 1951.
- WILEY, J.C.; B.E. ROMIG; L.V. ANDERSON & F.M. ZOZ. *ASAE Paper n° 921586*. 15p. 1992.



WRONSKI, E.B. *Logging trials near Tumut*. Logger, April/May:
10-14, 1990.