

Índices de Competição e o seu Uso na Modelagem do Crescimento das Árvores



República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva
Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Reinhold Stephanes
Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Conselho de Administração

Luis Carlos Guedes Pinto
Presidente

Silvio Crestana
Vice-Presidente

Alexandre Kalil Pires
Ernesto Paterniani
Hélio Tollini
Marcelo Barbosa Saintive
Membros

Diretoria-Executiva

Silvio Crestana
Diretor-Presidente

Tatiana Deane de Abreu Sá
José Geraldo Eugênio de França
Kepler Euclides Filho
Diretores-Executivos

Embrapa Roraima

Antonio Carlos Centeno Cordeiro
Chefe Geral

Roberto Dantas de Medeiros
Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Miguel Amador de Moura Neto
Chefe Adjunto de Administração

Documentos 08

Índices de Competição e o seu Uso na Modelagem do Crescimento das Árvores

Helio Tonini

Boa Vista, RR
2007

Exemplares desta publicação podem ser obtidos na:

Embrapa Roraima

Rod. BR-174 Km 08 - Distrito Industrial Boa Vista-RR

Caixa Postal 133.

69301-970 - Boa Vista - RR

Telefax: (095) 3626.7018

e-mail: sac@cpafrr.embrapa.br

www.cpafr.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Roberto Dantas de medeiros

Secretário-Executivo: Ramayana Menezes Braga

Membros: Bernardo de AlmeidamHalfeld

Gilvan Barbosa Ferreira

Jerri Eddson Zilli

Liane Marise Moreira Ferreira

Ranyse Barbosa Querino da Silva

Normalização Bibliográfica: Maria José Borges Padilha

Editoração Eletrônica: Vera Lúcia Alvarenga Rosendo

1ª edição

1ª impressão (2007): 300

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Roraima

Tonini, Helio

Índice de competição e o seu uso na modelagem do crescimento das árvores / por Hélio Tonini. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2007.

30p. (Documentos / Embrapa Roraima; 8).

1. Competição entre plantas. 2. Modelo de crescimento. I. Título. 2. Série.

CDD: 575.54

Autores

Helio Tonini

Dr. engenheiro Florestal, Embrapa Roraima, Br 174, Km 08, Distrito Industrial, helio@cpafrr.embrapa.br

SUMÁRIO

Resumo.....	07
Introdução.....	09
Índices de competição: definições e emprego.....	11
Seleção de competidores.....	16
Índices de competição não espaciais.....	18
Índices de competição espaciais.....	19
Índices de distância ponderada pelo tamanho.....	19
Índices de ângulos horizontais.....	22
Índices de sobreposição de áreas.....	23
Índices de área potencial disponível.....	25
Índices de ponto de densidade.....	25
Considerações Finais.....	26
Referências bibliográficas.....	26

Índices de competição e o seu uso na modelagem do crescimento das árvores

Helio Tonini

RESUMO

Esta revisão discute o emprego, os avanços e as lacunas de conhecimento existentes na pesquisa sobre a competição e o seu emprego na forma de índices em modelos de crescimento e produção para árvores individuais, sendo os principais índices utilizados apresentados e discutidos. Apesar dos avanços obtidos nos últimos anos, com o desenvolvimento de diversos índices de competição com os mais variados níveis de complexidade, tem se observado que a habilidade preditiva não depende da complexidade, nem do volume de dados coletados para o seu cálculo, mas sim, da espécie estudada. Em muitos casos, os índices mais simples são os mais eficientes. A pouca diferença na habilidade preditiva entre os diversos tipos de índices de competição, sugere que seria desejável dar maior atenção aos índices mais simples, existindo a necessidade de realização de estudos que busquem uma maior compreensão do significado ecológico de um índice de competição e não somente sua habilidade estatística em prever o crescimento em curto prazo. Estudos que procurem determinar o número de competidores para determinadas espécies ou grupo de espécies são fundamentais, pois, normalmente, esta definição é feita de forma arbitrária baseada somente na percepção dos pesquisadores, o que dificulta a comparação entre diferentes estudos.

INTRODUÇÃO

O crescimento resulta da interação de duas forças opostas. O componente positivo, que se manifesta na expansão de um organismo, representa a tendência inata de qualquer ser vivo à multiplicação exponencial e está associado ao potencial biótico, à atividade fotossintética, à absorção de nutrientes, ao anabolismo, etc... O componente oposto representa as restrições ao crescimento imposta por fatores externos (competição, respiração, escassez de recursos naturais) e internos (mecanismos de autoregulação) conhecidos como metabolismo destrutivo, catabolismo etc. (Zeide, 1993).

Existem vários mecanismos pelos quais uma planta interfere no crescimento de outras localizadas próximas. Alguns destes mecanismos, como a redução na disponibilidade de luz, são facilmente observáveis, mas infelizmente, a maioria não o são (Barclay e Layton, 1990). O crescimento de uma árvore em um determinado sítio é influenciado por uma série de fatores como a idade, o tamanho, o ambiente, características genéticas e o status competitivo (Clutter et al, 1983; Tome e Burkhart, 1989; Avery e Burkhart, 1994). Destes fatores, o status competitivo é o mais difícil de definir e medir quantitativamente (Zhang et al., 1996).

A ciência florestal tem utilizado uma grande variedade de métodos para medir a competição e definir variáveis de fácil obtenção correlacionadas com o status competitivo (Bella, 1971; Barclay e Layton, 1990; Biging e Dobbertin, 1995). Durante décadas, as pesquisas e o desenvolvimento de índices de competição, vigor e status social buscam atingir três objetivos principais: encontrar características simples que possam ser facilmente observadas e medidas e que indiquem o potencial de crescimento e a reação à competição; entender e ranquear fatores e processos que determinam o crescimento das árvores em povoamentos florestais; e desenvolver índices de competição e de densidade que possam ser utilizados na predição acurada do incremento em diâmetro e altura das árvores (Moravie et al., 1999).

A função de um índice de competição em um modelo de crescimento e produção para árvores individuais é indicar o status competitivo de uma determinada árvore em relação aos seus competidores (Radke et al., 2003). Sua performance nestes modelos, freqüentemente, é avaliada pela correlação com alguma característica de crescimento de interesse, como o incremento em diâmetro, área basal ou altura (Daniels et al. 1986), ou

pela redução no erro do modelo de predição quando o índice de competição é inserido (Wimberly e Bare, 1996).

Nos modelos de crescimento de árvores individuais, o status competitivo de uma árvore é descrito por medidas de competição independentes ou dependentes da distância. Índices independentes da distância distinguem-se dos dependentes por utilizarem medidas não espaciais, baseadas na distribuição dos tamanhos das árvores em uma determinada área. Nos índices dependentes da distância, os competidores são identificados baseados em seu tamanho e distância em relação a uma árvore objetivo (Wimberly e Bare, 1996).

Embora o desejo por uma maior sensibilidade espacial seja o principal motivo para o desenvolvimento e utilização de índices dependentes da distância, o emprego de índices espaciais tem sido bastante controverso. Estudos como os de Holmes e Reed, (1991), Barclay e Layton, (1990) e Wimberly e Bare, (1996), observaram que vários destes índices são similares aos mais simples (independentes da distância), em sua capacidade de estimar o crescimento. Biging e Dobbertin (1995), ao reverem vários estudos e os resultados discrepantes obtidos em relação aos ganhos no poder de predição pela adoção de índices dependentes da distância, concluíram que nenhum índice (dependente ou independente da distância) tem se mostrado superior aos demais, e a superioridade de um índice é verificada somente para determinadas situações e espécies.

Na maioria dos casos, um índice de competição é selecionado somente em função de sua habilidade em prever o crescimento. Outro critério que deveria ser incluído na escolha de um índice é o custo de coleta e computação (Moravie et al. 1999).

Esta revisão discute o emprego, os avanços e as lacunas de conhecimento ainda existentes na pesquisa sobre a competição e o seu emprego na forma de índices em modelos de crescimento e produção para árvores individuais. Os principais índices utilizados são apresentados e discutidos.

ÍNDICES DE COMPETIÇÃO: DEFINIÇÕES E EMPREGO

A aplicação de um índice de competição pode ser observada em modelos como os que Martin e Ek (1984) utilizaram para estimar o crescimento em diâmetro (ΔD) em plantios homogêneos de *Pinus resinosa* (1) e Vanclay (1991) para estimar o incremento em diâmetro em uma floresta tropical (2) :

$$\Delta D/L = b_1 + b_2(1/D) + b_3D + b_4S + b_5\left[1/(1+C)\right] + b_6C \quad (1)$$

Onde: L = duração do período de crescimento (anos); D = DAP (diâmetro medido a 1,30 m de altura); S = índice de sítio; C = índice de competição; b_j = parâmetros estimados.

$$\log(ID + \alpha) = b_1 + b_2D + b_3 \log D + b_4 \log(DxQS) + b_5 \log(G) + b_6(GD) \quad (2)$$

Onde: ID = incremento em diâmetro (cm.ano^{-1}); D = DAP (cm); QS = qualidade do sítio; G = área basal da floresta ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$) com $\text{DAP} \geq 10$ cm; GD = área basal das árvores dominantes cujo DAP é maior do que a árvore objetivo; α e b = parâmetros a serem estimados.

Se o objetivo for estimar o crescimento no curto prazo, a utilização de um índice de competição no modelo, normalmente, é suficiente para produzir boas estimativas. No entanto, para estimar tendências no crescimento, mudanças de habitat e sucessão em longo prazo, é insuficiente.

As dimensões da copa e do tronco, mudam em função de influências genéticas e ambientais, e o que medimos em um índice de competição se deve, em parte, às condições passadas, não existindo garantias de que estas condições permanecerão imutáveis no futuro. No curto prazo, podemos fazer predições seguras baseadas na performance passada; no longo prazo é necessário o conhecimento de mecanismos competitivos que permitam o acesso às mudanças no capital de nutrientes, água e luz para uma determinada planta (Barclay e Layton, 1990).

Portanto, os índices de competição constituem-se em uma forma simples e de baixo custo para investigar os efeitos de interações competitivas no crescimento e mortalidade das árvores, porém, em bases limitadas.

Holmes e Reed (1991), reconhecem três tipos de índice de competição: índices que consideram a sobreposição de zonas de influência; índices que consideram o espaço

disponível para o crescimento e índices que consideram o tamanho relativo entre uma determinada árvore objetivo e seu competidor (razão de tamanhos). Estes últimos, apesar de serem considerados mais simples, tem apresentado uma performance tão boa quanto os demais (Daniels;1976; Lorimer 1983; Martin e Ek, 1984; Holmes e Reed, 1991; Biging e Dobbertin, 1992; Cole e Lorimer, 1994).

No emprego de índices de razão de tamanhos, o conhecimento da distância entre as árvores tem sido de pouco valor preditivo (Holmes e Reed, 1991; Lorimer, 1983; Cole e Lorimer, 1994), o que pode indicar que conhecendo-se a densidade e a área basal, a informação adicional sobre a distância entre as árvores parece ser redundante (Cole e Lorimer, 1994).

Moravie et al., (1999) definem mais dois tipos de índices: índices de vigor, que baseados no tamanho e na morfologia das árvores, representam as condições passadas sob as quais a planta cresceu e podem ser utilizados como indicadores de sua capacidade futura de crescimento, e índices de status social que descrevem a posição instantânea da árvore no seu ambiente. São baseados na disponibilidade de luz e na altura em relação aos vizinhos mais próximos.

A proporção de copa, o índice de abrangência e saliência (Durlo e Denardi 1998; Tonini e Arco-Verde, 2005), são exemplos de índices de vigor. As classificações de Dawkins, (1956) e Clark e Clark, (1992) são exemplos de índices de status social.

A maior desvantagem na aplicação dos índices de status social é a sua determinação, considerada parcialmente subjetiva. Nestes índices, a classificação de uma mesma árvore em diferentes categorias depende do observador e, deve ser feita, preferencialmente, pela mesma pessoa (Moravie et al.,1999). São baseados no reconhecimento visual, o que requer treinamento e um bom conhecimento e compreensão sobre as espécies e a estrutura da floresta. No entanto, após uma fase de treinamento, a coleta dos dados é automática, sem a necessidade de medições físicas, o que faz com que os custos de treinamento sejam compensados pela facilidade e rapidez na coleta dos dados (Moravie et al.,1999) .

Penridge e Walker (1986) e Lorimer (1983) estudaram diversos índices de competição e sua correlação com o crescimento das árvores. Os principais resultados obtidos indicam que:

a) A inclusão de uma relação de tamanho entre a árvore objetivo e os seus competidores em um índice de competição é importante, pois esta relação define, ao menos parcialmente, como os recursos potenciais para o crescimento são distribuídos entre as árvores.

b) A ponderação entre a área basal do competidor pela distância sem nenhuma inferência ao tamanho da árvore objetivo não fornece boas estimativas da competição nas copas, pois a variação no valor do índice de competição para árvores de posições sociológicas intermediárias é tão grande quanto para árvores suprimidas. Somente quando a área basal da árvore objetivo é incluída, uma razoável separação por classes de copa é obtida.

c) Mesmo quando um competidor dominante localiza-se próximo à árvore objetivo, a classe de copa desta árvore não pode ser predita de forma acurada e pode variar de dominante à suprimida. Isto ocorre porque a habilidade de algumas espécies em evitar a competição desenvolvendo copas assimétricas, permite a coexistência de várias árvores dominantes, e faz com que árvores tornem-se suprimidas mesmo quando a densidade em seu entorno é relativamente pequena. Portanto, o crescimento não pode ser predito adequadamente somente pela distribuição espacial e requer alguma indicação da classe de copa.

d) O diâmetro inicial da árvore, freqüentemente, apresenta correlações com o crescimento, semelhantes à obtida em diversos índices de competição. No entanto, o diâmetro atual somente é válido como variável preditora do crescimento futuro na ausência de tratamentos silviculturais ou outros distúrbios que alterem o nível de estoque do povoamento, restrição considerada inaceitável para a maioria dos modelos de crescimento. Neste caso, a consideração mais importante, é se o sucesso de um determinado índice de competição se deve ou não a inclusão do diâmetro inicial no seu cálculo.

e) A inclusão do diâmetro inicial em um índice de competição, não significa que o mesmo é dependente de uma correlação espúrea com o diâmetro inicial, mas sim que o índice indica que as árvores grandes crescem mais rápido, pois a alta correlação entre o crescimento diamétrico e o diâmetro inicial em povoamentos homogêneos, reflete em parte, um efeito secundário da competição. O crescimento lento de pequenas árvores em plantios, deve-se ao fato de que a maioria são suprimidas e não a um baixo potencial de crescimento, o que pode ser observado pela resposta destas árvores a cortes de liberação.

f) A comparação entre o diâmetro da árvore objetivo e seus competidores nem sempre indica de forma acurada a posição relativa da copa desta árvore. Este é um dos fatores que fazem com que a seleção de competidores, baseados em classes de copa, aumente a correlação entre o índice de competição e o crescimento. Se os competidores são definidos a partir de árvores de classe de copa igual ou superior á árvore objetivo, a informação da classe de copa desta árvore é indiretamente incorporada ao índice de competição.

No entanto, Mugasha (1989) ao avaliar diferentes índices de competição para a predição do incremento em volume de *Pinus banksiana* e *Populus tremuloides* observou superioridade para os índices baseados na seleção de todas as árvores da amostra na comparação com os baseados na seleção de competidores de classe de copa igual ou maior que a árvore objetivo. Este resultado difere das conclusões de Lorimer, (1983), cujas observações foram obtidas em espécies folhosas tolerantes à sombra, com idades entre 30 e 50 anos, em que o potencial de crescimento não foi muito influenciado pela competição das árvores dominantes.

Estas diferenças ressaltam a importância de se considerar a habilidade de uma espécie em reagir a várias formas de competição, especialmente à disponibilidade de luz. Um índice que descreve bem as variações de densidade no entorno de uma árvore pode não ser útil na predição do crescimento de espécies que não são sensíveis a estas variações (Moravie et al., 1999), ou seja, a habilidade preditiva de um determinado índice de competição, normalmente, depende da espécie estudada.

Outra falha atribuída a maioria dos índices de competição é a sua independência em relação a distribuição direcional dos competidores, não importando aonde os competidores estão, se ao mesmo lado ou em lados opostos a uma determinada árvore.

Neste sentido, Miina e Pukkala (2002) estudaram índices de competição baseados na ecologia de campo apresentada por Wu et al. (1985). Este tipo de medida de competição considera a distribuição direcional dos competidores em adição ao seu número, tamanho e distância. A desvantagem no emprego de índices de competição baseados nesta teoria é a sua complexidade pois requerem o uso combinado de programas de preparação dos dados, um algoritmo de otimização e ainda um software estatístico (Miina e Pukkala, 2002).

Para Wimberly e Bare (1996) os esforços e custos requeridos para se obter dados espacializados não se justificam em situações onde o objetivo é desenvolver modelos empíricos de crescimento florestal em povoamentos maduros, desbastados por baixo a uma distribuição regular. Em povoamentos puros e relativamente uniformes, os índices independentes da distância geralmente produzem prognoses suficientemente acuradas dos efeitos da competição (Lorimer, 1983). Em povoamentos de estrutura mais complexa como as florestas naturais e ou mistas, os índices dependentes da distância ganham em importância (Cole e Lorimer, 1994).

A dinâmica de clareiras tem uma influência menor no desenvolvimento de plantios homogêneos, podendo, inclusive, ser ignorada nas prognoses. No entanto, têm grande importância na estrutura, sustentabilidade e manejo de florestas heterogêneas. Nestas florestas, a dinâmica (fluxo de árvores jovens até as posições superiores do dossel) é mantida em resposta ao surgimento de clareiras, criadas naturalmente ou pela exploração (Smith et al., 1986). Os efeitos da exploração na estrutura da floresta, a longo prazo, exige a predição da configuração das clareiras e das copas (Cole e Lorimer, 1994).

Nesta linha de raciocínio, Cole e Lorimer (1994) sugerem que as variáveis de copa podem aumentar a acuracidade das estimativas no longo prazo, pois um modelo de crescimento com base na copa, fornece uma restrição natural ao desenvolvimento da floresta ao impor um limite físico de como várias copas de um determinado tamanho podem ocupar o espaço no dossel sobre uma unidade de área.

No entanto, estudos como os de Holmes e Reed (1991) e Cole e Lorimer (1994), indicam que alguns índices de competição simplificados, como aqueles que assumem zonas de influência circulares em torno de cada árvore ou estimam a exposição da copa por ângulos geométricos, não produzem estimativas superiores aos índices com base no diâmetro do tronco.

Para Moravie et al. (1999), índices complexos baseados em medições da forma da copa exigem muito tempo e não são muito precisos. Em alguns casos, a fase de computação é longa, requerendo programas desenvolvidos especificamente para o seu cálculo.

Em florestas tropicais, existem grandes variações no incremento em diâmetro dentro de uma mesma classe diamétrica e estas variações, podem ser atribuídas

principalmente, às características das espécies e ao status competitivo. A posição e a iluminação da copa tem um efeito sobre o crescimento diamétrico independente da classe diamétrica e grandes variações nas taxas de crescimento ocorrem entre diferentes espécies e indivíduos de uma mesma espécie (FAO, 1983)

Apesar da grande variabilidade existente na taxa de crescimento entre as espécies, devido aos custos de amostragem e a baixa densidade de algumas espécies, a tendência tem sido a de se agrupar espécies para o ajuste de modelos de crescimento diamétrico (Vanclay, 1991; Chai e Lemay, 1993) Segundo Vanclay (1991) desenvolver funções de crescimento para árvores individuais por espécie é impraticável, devido ao grande número de funções necessárias e a existência de poucos dados para muitas espécies que ocorrem em baixa densidade.

Moravie et al. (1999) ao compararem diversos índices de competição e a performance de diferentes categorias de índices de status social e vigor para *Vateria indica*, (espécie demandante por luz), observou superioridade na aplicação da classificação de Dawkins como variável preditora do crescimento, o que se justifica pelo fato de que a luz vertical e horizontal, o tamanho relativo e a posição da copa serem parcialmente consideradas nesta classificação.

SELEÇÃO DE COMPETIDORES

Uma das razões para o baixo desempenho dos índices dependentes da distância é atribuída ao tamanho das unidades amostrais utilizadas na definição dos competidores. Para Biging e Dobbertin (1995) a zona em que a competição ocorre pode ser maior do que a comumente observada. Definir uma zona de influência exata para o uso de um índice de competição para árvores individuais que inclua todos os competidores e fontes de competição por recursos escassos é bastante difícil, se não, impossível, uma vez que a competição acima do solo concentra-se na área ocupada pelas copas, mas a competição radicular é difusa e quase imprevisível.

Se os competidores são selecionados a partir de um raio fixo tomando como base uma árvore objetivo, a competição parece decrescer com o tempo, na medida em que o número de competidores diminui e a distância entre as árvores aumenta. Este problema pode ser parcialmente remediado pela adoção de um ângulo de amostragem horizontal em uma amostra de contagem angular (ACA) pelo princípio de Bitterlich, porém, o uso de um fator de área basal (FAB) é arbitrário e não assegura que os valores de um índice em duas

medições no tempo serão diretamente comparáveis em termos de estresse competitivo. Lorimer (1983) propôs algumas modificações nestes índices de forma que os valores sejam independentes da idade e dependam apenas do padrão espacial relativo das árvores.

Para Biging e Dobbertin (1995), índices independentes da distância obtêm melhor desempenho por serem obtidos em uma parcela ou mesmo em um povoamento todo, enquanto que os dependentes são calculados em uma zona cujo raio é usualmente menor. Se isto é verdade, a exata localização das árvores tem menor importância do que o tamanho da parcela utilizada no cálculo do índice de competição.

Existe uma grande variação na metodologia adotada por diferentes pesquisadores na seleção dos competidores. Na maioria dos estudos realizados em plantios homogêneos utilizam-se unidades amostrais de área fixa. Neste caso, quanto mais próxima estiver a árvore da borda da parcela, menos competidores serão observados, o que resulta em uma subestimação da competição em um problema conhecido como desvios de bordadura da parcela. Monserud e Ek, (1975), desenvolveram metodologias para corrigir estes desvios.

Hegyí (1974) no desenvolvimento de seu índice de competição, determinou o número de competidores considerando um raio de 3,05 m a partir da árvore objetivo. Daniels (1976) fez uma modificação no cálculo deste índice levando em consideração o tamanho e a distância dos competidores, utilizando amostras de raio variável. Observou uma maior correlação com o crescimento em diâmetro quando o índice incluiu um número maior de competidores utilizando um fator de área basal (k) baixo.

Beland et al., (2003) definiu o número de competidores para o índice de Heigy utilizando raios de amostragem para a seleção de competidores que variaram de 3 a 9 metros tomando a árvore objetivo como centro. Observou que um raio de 6 m foi o mais indicado para povoamentos mistos de *Pinus banksiana*.

Miina e Pukkala (2002) definiram a distância e a altura em relação à árvore objetivo como critérios de seleção. Adotaram uma distância máxima de 6 m e uma proporção de altura de 0,76 a 0,87 vezes a altura da árvore objetivo.

Para Martin (1982) a amostragem por pontos horizontais fornece estimadores mais eficientes da competição do que parcelas de área fixa, pois a probabilidade de seleção de um competidor é aproximadamente proporcional ao seu nível de competição, uma vez que

competidores de grandes diâmetros são amostrados com uma probabilidade maior e a maiores distâncias do que competidores de menor diâmetro. As maiores árvores, normalmente, representam um maior nível de competição e estão aptas a competirem a maiores distâncias e, nesta metodologia, são amostradas a maiores distâncias do que as menores.

Amostras de pontos horizontais são similares às amostras circulares. A principal diferença é que não apresentam um raio fixo. O raio da amostra (R_j) varia na proporção do DAP de cada árvore amostra, sendo obtido por:

$$R_j = \frac{d_j}{K}$$

Onde: d_j = DAP da árvore j e K = constante associada com a amostra de contagem angular (ACA)

Mugasha (1989) utilizou amostras de ponto vertical utilizando uma constante vertical igual a 2, ou seja, foram consideradas competidoras, as árvores cuja distância em relação à árvore objetivo não fosse maior do que duas vezes a sua altura. A escolha desta constante foi arbitrária, baseada apenas na percepção do autor.

ÍNDICES DE COMPETIÇÃO NÃO ESPACIAIS

Normalmente incluem mensurações ao nível de unidade amostral, como o número de árvores por hectare, área basal por hectare e fator de competição de copas. A competição pode ser representada pela inclusão somente de árvores maiores do que a árvore objetivo como o número e a área basal de árvores mais grossas do que a árvore objetivo. Algumas variantes destes índices de tamanho relativo também podem ser utilizadas, como a razão do tamanho individual com o tamanho médio da parcela, incluindo o DAP, área basal e altura relativa. Tomé e Burkhart (1989) apresentaram vários destes índices, utilizando dimensões relativas à média, máximo e dominante para DAP e área basal:

$$IC = \frac{d_i}{d_m} \quad (1)$$

$$IC = \frac{d_i}{d_{\max}} \quad (2)$$

$$IC = \frac{d_i}{d_{\text{dom}}} \quad (3)$$

Onde: d_i = DAP da árvore objetivo; d_m = diâmetro quadrático médio da parcela ou povoamento; $d_{\max}$ = diâmetro quadrático máximo da parcela ou povoamento; d_{dom} = diâmetro médio das árvores dominantes na parcela ou povoamento.

Lorimer (1983) sugeriu o uso de um índice de competição não espacial bastante versátil:

$$IC = \sum_{j=i}^n \frac{D_j}{D_i}$$

Onde: D_j = diâmetro da árvore competidora j ; D_i = diâmetro da árvore objetivo i .

Este índice considera o tamanho relativo da árvore objetivo em relação aos seus competidores e o nível de estoque, uma vez que o índice aumenta quando o número de competidores por unidade de área aumenta. O raio amostral de seleção deve ser múltiplo do raio da copa da árvore objetivo para assegurar independência da idade. Cole e Lorimer (1994) definiram os competidores para o cálculo deste índice como somente aquelas árvores de classe de copa igual ou maior do que a árvore objetivo, seguindo o pressuposto de que a presença de árvores de posições sociológicas inferiores não tem efeito significativo no crescimento das árvores dominantes ou de uma posição sociológica superior.

ÍNDICES DE COMPETIÇÃO ESPACIAIS

Índices de distância ponderada pelo tamanho

Estes índices caracterizam-se por utilizarem conjuntamente uma razão de tamanho entre alguma dimensão do competidor e a árvore objetivo e uma função de distância entre os mesmos. São calculados utilizando-se combinações de fator de área basal ($K=1,2,3$ e 4); dimensões (DAP , DAP^2) e uma expressão de distância (D_{ij}^{-1} ; D_{ij}^{2-1} ; $e^{d_{ij}}$)

O índice que tem recebido maior atenção na modelagem do crescimento de árvores individuais é o proposto por Hegyi (1974). Este índice é computado pela soma das razões entre o diâmetro do competidor e da árvore objetivo ponderada pela distância entre os mesmos. Este índice, atribui um peso maior a competidores mais próximos e grandes valores indicam competição intensa, sendo expresso por:

$$IC = \sum_{j=1}^{N_i} \frac{d_j}{d_i} \times \frac{1}{D_{ij}}$$

Onde: d_j = DAP do competidor j ; d_i = DAP da árvore objetivo i ; D_{ij} = distância entre a árvore objetivo i e o competidor j ; N_i = número de competidores para a árvore objetivo i .

Daniels et al (1986) propuseram uma modificação no índice de Hegyi em que o número de competidores foi determinado por um ângulo horizontal correspondente a um fator de área basal (FAB) de $2,3 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$. A modificação de Daniels tem sido bastante adotada por sua boa correlação com o crescimento em área basal e altura; simplicidade de cálculo; a propriedade de ponderar uma razão de diâmetros pelo inverso de suas distâncias; e o método de seleção de competidores, baseado no seu tamanho e distância em relação à árvore objetivo (Radtke et al, 2003).

Para Lorimer (1983), o índice de Heigy não tem uma interpretação espacial clara. Quando o DAP do competidor dobra, a sua contribuição ao total do índice também dobra, e se a distância em relação à árvore objetivo dobra, a sua contribuição é reduzida em 50%. O autor testou uma série de modificações para este índice que envolveram a eliminação ou a modificação no termo de distância, substituição do diâmetro pela área basal, seleção de competidores por classe de copa e a seleção de um raio amostral para a seleção de competidores.

Segundo Lorimer (1983) para que o índice de Heigy responda somente às mudanças no padrão espacial relativo das árvores e seja determinado pela proporção das sobreposições das copas e do sistema radicular das árvores adjacentes, deve-se utilizar um raio de seleção de competidores de tamanho múltiplo do raio médio das copas das árvores dominantes ou da árvore objetivo. Este procedimento faz com que o raio de amostragem aumente na mesma proporção da copa e um acréscimo no número de competidores no tempo significa aumento do estoque e competição. Embora utilizar um raio amostral múltiplo do diâmetro pareça mais lógico e simples, estudos de relações entre o diâmetro da copa e do tronco revelam que o diâmetro da copa, geralmente, cresce a taxas menores. Portanto, o aumento do raio de seleção proporcional ao aumento do diâmetro poderá incrementar o número de competidores em situações em que o nível de estoque permaneceu constante.

Somente modificar o raio de seleção não torna o índice de Heigy independente da idade, uma vez que a distância absoluta entre as árvores continua a aumentar com a mesma, reduzindo a magnitude do índice. Este problema foi solucionado por Lorimer (1983) ao relativizar as distâncias em relação ao raio de amostragem, dividindo a distância entre as árvores pelo raio amostral. Desta forma o índice modificado é expresso por:

$$IC = \sum_{j=1}^n \frac{D_j / D_i}{Dist_{ij} / R}$$

e

$$R = bx \bar{R}_c$$

Onde: D_i = diâmetro da árvore objetivo; D_j = diâmetro da árvore competidora; $Dist_{ij}$ = distância entre a árvore objetivo e a competidora; R = raio de amostragem; R_c = raio de copa médio das árvores dominantes ou da árvore objetivo; b = constante

Lorimer (1983) recomendou a utilização de um raio amostral igual a três vezes o raio médio da copa das árvores dominantes. Variações moderadas no raio amostral de seleção tem pouco efeito na correlação entre o índice de competição e o crescimento. No entanto, deve-se adotar um raio padrão que permita comparações entre diferentes estudos.

Uma vez que, normalmente, o raio amostral de seleção é maior para as maiores árvores, as mesmas possuem um número maior de competidores e conseqüentemente um índice de competição mais alto. Esta relação pode não ser real e indicar somente que o crescimento observado é positivamente correlacionado com o tamanho da árvore objetivo. Este erro pode ser reduzido, selecionando competidores de classe de copa igual ou superior à árvore objetivo.

Apesar da utilidade do índice de Heigy, para Radtke et al. (2003), o mesmo poderia ser utilizado tanto como um indicador absoluto como de intensidade de competição. Em sua forma original este índice não indica explicitamente se a árvore está ou não sob efeito de estresse competitivo. Um baixo valor indica um baixo nível de competição, mas, não indica a passagem de um estado de livre para de intensa competição e a seleção arbitrária de um ângulo horizontal para identificar competidores afeta diretamente o seu cálculo

Radtke et al (2003) propôs que a idade de inflexão de uma curva de crescimento cumulativo em área basal poderia ser utilizada para identificar árvores em estágio pré e pós competitivo. Neste caso, o índice de Hegyi pode ser condicionado a fornecer um valor específico que indicaria a mudança na fase competitiva.

Para Perry (1985) citado por “Oneal et al. (1994) o índice de Hegyi assume que o DAP relativo e a distância entre uma árvore objetivo e seu competidor reflete uma interação competitiva. No entanto, o grau de competição entre indivíduos a um determinado nível de estoque depende das características das copas. Duas árvores podem ter o mesmo DAP e a mesma distância em relação a uma árvore objetivo, mas, possuírem copas muito diferentes, onde a copa de uma pode ou não se projetar sobre mesma suprimindo-a ou não. Índices que, como o de Hegyi, baseiam-se somente nos DAPs e distâncias, não levam em consideração estas situações.

Nesta linha de raciocínio, O’Neill et al. (1994), desenvolveu um índice de competição que considera duas características da copa que descrevem o status competitivo de uma árvore: a posição (horizontal e vertical) e o tamanho. O índice de posição da copa fundamenta-se na medição destes dois critérios e incorpora variáveis comumente utilizadas na tomada de decisão e na avaliação da competição por silvicultores. Este índice é expresso por:

$$IC = \sum_{ij=1}^n \frac{(PC + RCM)}{D_{ij}} \times \frac{PC_j}{RCM} \times \frac{ht_i \times D_{ij}}{ht_j}$$

Onde: PC = posição da copa do competidor j medida em linha reta na direção da árvore objetivo i; RCM = raio de copa médio da árvore objetivo i; D_{ij} = distância entre a árvore objetivo e o competidor j; ht_i = altura total da árvore objetivo i; ht_j = altura total do competidor j; n = número de competidores determinado por um FAB = 10 com ponto tomado a 2 pés (60,96 cm) a oeste da árvore objetivo.

Índices de ângulos horizontais

Na medida em que a luz é um recurso verticalmente distribuído, cuja interceptação depende da estrutura e da dimensão da copa, alguns pesquisadores têm obtido sucesso na utilização de índices de ângulos horizontais, principalmente para espécies intolerantes à sombra. Pukkala e Kolstron (1987) Utilizaram o seguinte índice de competição:

$$IC = \sum_{K=1}^n \alpha_{jk} (a_{ihj})$$

Onde: α_{jk} = ângulo vertical formado por um plano horizontal a a_{ihj} metros sobre o nível do solo e o topo de um competidor K mais alto do que a_{ihj} metros e mais próximo do que 6 m. h_j = altura da árvore objetivo.

A distância de 6 metros foi selecionada em função dos resultados obtidos por Miina e Pukkala (2000), indicando que pouco ganho seria obtido no uso de distâncias maiores. Outro índice vertical foi estudado por Mabvurira e Miina (2002) que após testarem vários índices de competição para plantios de *Eucalytus grandis* selecionaram o seguinte:

$$IC = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij}$$

Onde: n = número de competidores; α_{ij} = ângulo vertical definido por um plano horizontal e as alturas e distâncias do competidor. Este índice é calculado apenas para árvores mais altas e localizadas a uma distância fixa de 5 m da árvore objetivo.

Prevosto et al. (1999) testaram dois índices baseados em ângulos verticais e horizontais:

$$IC = \sum_{i=1}^n \alpha_i e^{-kd_i} \quad (1)$$

$$IC = \sum_{i=1}^n \beta_i e^{-kd_i} \quad (2)$$

Onde n = número de vizinhos; α_i = ângulo horizontal da árvore objetivo em relação ao competidor i; d_i = distância para i (m); β_i = ângulo vertical da árvore objetivo ao competidor i; k = coeficiente que expressa a ponderação pela distância.

O valor de IC (2) pode ser negativo ou positivo. Árvores em desvantagem competitiva são caracterizadas por uma valor negativo e vice-versa.

Índices de sobreposição de áreas

Neste tipo de índice o raio da copa de árvores isoladas é calculado através de análise de regressão em função do DAP (Arney, 1973). A copa de árvores isoladas representam uma dimensão máxima empírica e têm sido utilizadas para o desenvolvimento de guias de manejo e na modelagem da competição e do dossel (Hasenauer, 1997). O índice de estresse competitivo proposto por Arney (1973) pode ser visto como uma variante dependente da distância do fator de competição de copas proposto por Krajicek et al (1961).

Qualquer indivíduo cujo raio de copa potencial de árvores isoladas sobrepõe o raio de copa potencial da árvore objetivo é considerado como competidor. Este índice assume que a competição pode ser adequadamente medida pelo cálculo do somatório da

sobreposição entre a copa da árvore objetivo e a de suas vizinhas, se as mesmas atingissem as dimensões de árvores isoladas de mesmo diâmetro. Portanto o índice utiliza uma sobreposição potencial da copa ao invés de uma sobreposição real.

$$IC = 100x \frac{\left(\sum_{j=1}^n A_{ij} + A_i \right)}{A_i}$$

Onde: A_{ij} = área de sobreposição potencial da copa de uma árvore isolada i e o seu competidor j ; A_i = área de copa potencial da árvore objetivo i .

Uma variante deste índice impõe uma restrição adicional em que somente competidores com área basal maior do que a árvore objetivo são considerados. Esta variação surgiu de observações das interações entre copas, e parte do princípio de que a expansão lateral das copas das árvores é restringida somente por árvores de mesma ou superior classe de copa (Wimberly e Bare, 1996).

Bella (1971) desenvolveu o Índice de sobreposição de zona de influência competitiva. Para este autor, quando duas árvores de tamanhos diferentes competem em um povoamento não se afetam de forma igual. Este índice pode ser considerado como uma extensão do conceito de zona de influência e assume que esta zona é proporcional ao tamanho da árvore, característica bem representada pelo diâmetro do tronco (DAP). Este efeito relativo de tamanho é considerado no índice pela razão entre os DAPs da árvore objetivo e o seu competidor. Esta razão pode modificar o efeito de competição estimado a partir da sobreposição da zona de influência e dar mais peso competitivo às árvores maiores, e mesmo peso para árvores de tamanho similar (não ponderado).

$$IC = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{AS_{ij}}{ZI_i} \right) x \left(\frac{d_j}{d_i} \right)^{\text{exp}} \right]$$

Onde: n = número de competidores cuja zona de influência sobrepõe a árvore objetivo; AS_{ij} = área de sobreposição das copas entre o competidor j e a árvore objetivo i ; ZI_i = zona de influência da árvore objetivo i ; d_j = DAP do competidor j ; d_i = DAP da árvore objetivo i ; Exp = expoente que varia com a espécie e é determinado de forma iterativa. Bella (1971) adotou valores de 0,0 a 3,0.

Índices de área potencial disponível

Estes índices são utilizados em versões ponderadas ou não ponderadas, utilizando o DAP como expoente nas ponderações e na determinação de pontos de bi-secção em linhas entre árvores. Sua fórmula geral ponderada pode ser expressa por:

$$W_k = \frac{d_i^k}{d_i^k + d_j^k}$$

Onde: d_i e d_j = DAP da árvore objetivo i e o competidor j . A área potencial disponível é definida utilizando-se o peso W_k . Este índice é calculado utilizando-se $k = 0, 1, 2, 3$ e 4 .

Tomé e Burkhart (1989) desenvolveram novas versões para estes índices levando em consideração suas dimensões relativas. Uma árvore vizinha dominante impõe uma desvantagem competitiva à árvore objetivo e vice-versa, o que leva a índices de competição calculados pelo somatório de valores positivos e negativos de acordo com as relações de dominância/supressão entre uma determinada árvore e seus vizinhos. Vizinhos dominantes dão uma contribuição positiva e dominados, negativa ao índice de competição. Árvores mortas são incluídas como um tipo especial de vizinho suprimido.

Índices de ponto de densidade

O mais conhecido é o de Spurr (1962). Neste tipo de índice de competição todas as árvores incluídas em uma amostra de contagem angular (ACA) com centro na árvore objetivo são consideradas competidores. O número de competidores depende do fator de área basal utilizado. O índice de Spurr é expresso por:

$$IC = \frac{2500}{n} \left[\sum_{j=1}^n (j - 1/2) \left(\frac{d_j}{D_{ij}} \right)^2 \right]$$

Onde: D_{ij} = distância entre a árvore objetivo i e o competidor j ; d_j = DAP do competidor j ; n = número de competidores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização deste trabalho pode-se concluir que:

a) Apesar dos avanços obtidos pela ciência florestal nos últimos anos, com o desenvolvimento de diversos índices de competição com os mais variados níveis de complexidade, tem se observado que a habilidade preditiva de um índice depende muito da espécie estudada e não de sua complexidade, e do volume de dados necessário para o seu cálculo. Em muitos casos os índices mais simples são mais eficientes.

b) A pouca diferença na habilidade preditiva entre os diversos tipos de índices de competição utilizados, indica a possibilidade de emprego de índices mais simples. No entanto, existe a necessidade de um maior número de estudos que busquem compreender o significado ecológico de um índice de competição e não somente sua habilidade estatística em predizer o crescimento no curto prazo.

c) Existe a necessidade da realização de um maior número de estudos que procurem identificar formas de determinar o número de competidores para determinadas espécies ou grupo de espécies. Normalmente, esta definição é feita de forma arbitrária, baseada somente na percepção dos pesquisadores, o que dificulta a comparação entre diferentes trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNEY, J.D. Tables for quantifying competitive stress on individual trees. Canadian Forestry Service. Information Report, 1973.

AVERY, T.E.; BURKHART, H.E. **Forest measurements**. New York: Mc Graw –Hill, 1994, 408 p.

BARCLAY, H.J.; LAYTON, C.R. Growth and mortality in managed Douglas fir relation to a competition index. **Forest Ecology and Management**, v.36, p.187-204, 1990

BELAND, M.; LUSSIER, J.M.; BERGERON, Y.; LONGPRÉ, M.H.; BÉLAND, M. Structure, spatial distribution and competition in mixed jack pine (*Pinus banksiana*) stands on clay soils of eastern Canadá. **Annals of Forest Science**, v.60, p.609-617, 2003.

BELLA, I.E. A new competition model for individual trees. **Forest Science**, v.17, p.364-372, 1971.

BIGGING, G.S.; DOBBERTIN, M. A comparison of distance dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. **Forest Science**, v. 38, n.3, p.695-720, 1992.

BIGGING, G.S.; DOBBERTIN, M. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. **Forest Science**, v.41, n.2, p.360-377, 1995.

CHAY, F.Y.C.; LEMAY, V.M. Development and testing of diameter increment models for mixed swamp forests of Sarawak. **Forest Ecology and Management**, v.58, p.51-64, 1993.

CLARK, D.A.; CLARK, D.B. Life history diversity of canopy and emergent trees in a neotropical rain forest. **Ecological Monograph**, v.62, p.315-344, 1992.

COLE, W.G.; LORIMER, C.G. Predicting tree growth from crown variables in managed northern hardwoods stands. **Forest Ecology and Management**, v.67, p.159-175, 1994.

CLUTTER, J.L.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management. A quantitative approach**. New York: John Wiley, 1983. 333 p.

DANIELS, R.F. Simple competition index and their correlation with annual loblolly pine tree growth. **Forest Science**, v.22, p.454-456, 1976.

DANIELS, R.F.; BURKHART, H.E.; CALSON, T.R.. A comparison of competition measures for predicting growth of Loblolly pine. **Canadian Journal of Forest Research**, v.16, p. 1230-1237, 1986.

DAWKINS, H.C. Crown classification of natural forest trees. Uganda Forest Department, Technical note, n.17, 1956, 2p.

DURLO, M.A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana* em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v.8, p.55-56, 1998.

FAO. **Growth and yield of mixed tropical forests**, 1983. 114 p.

HASENAUER, H. Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. **Forest Ecology and Management**, v.96, p.197-206, 1997

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, G. **Growth models for tree and stand population**. Stockolm: Royal College of forestry, Research note, n.30, p.74-90, 1974.

HOLMES, M.J.; REED, D.D. Competition index for mixed species northern hardwoods. **Forest Science**, v.37, n.5, p.1338-1349, 1991.

KRAJICEK, J.E.; BRINLMAN, H.A.; GINGRICH, S.F. Growth competition-a measure of density. **Forest Science**, v.7, p.36-42, 1961.

LORIMER, C.G. Test of age-independent competition index for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v.6, p.343-360, 1983.

MABVURIRA, D.; MIINA, J. Individual tree growth and mortality models for Eucalyptus grandis (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe. **Forest Ecology and Management**, v.161, p.231-245, 2002.

MARTIN, G.L.; Estimation of individual tree competition from horizontal point sample data. **Forest Science**, v.28, n.1, p.45-48, 1982.

MARTIN, G.L.; EK, A.R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. **Forest Science**, v.5, n.3, p.731-743, 1984.

MIINA, J.; PUKKALA, T. Using numerical optimization for specifying individual-tree competition models. **Forest Science**, v.46, p.277-283, 2000.

MIINA, J.; PUKKALA, T. Application of ecological field theory in distance-dependent growth modeling. **Forest Ecology and Management**, v.161, p.101-107, 2002.

MONSERUD, R.A.; EK, A.R. Plot edge bias in forest stand growth simulation models. **Canadian Journal of Forest Research**, v.44, p.419-423, 1975.

MORAVIE, M.A.; DURAND, M.; HOULLIER, F. Ecological meaning and predictive ability of social status vigour and competition indices in a tropical rainforest (India). **Forest Ecology and Management**, v.117, p.221-240, 1999.

MUGASHA, A.G.; Evaluation of simple competition indices for the prediction on volume increment of young jack pine and trembling aspen trees. **Forest Ecology and Management**, v.26, p.227-235, 1989.

O' NEAL, D.D.; HOUSTON, A.E.; BUCKNER, E.R.; MEADOWS, J.S. An index of competition based on relative crown position and size. **Eight biennial southern silvicultural research conference**. Auburn, AL, p.1-3, 1994

PENRIDGE, L.K.; WALKER, J. Effect of neighbouring trees on Eucalypt growth in a semi-arid woodland in Australia. **Journal of Ecology**, v.74, p.925-936, 1986.

PRÉVOSTO, B.; COQUILLARD, P.; GUEUGNOT, J. Growth models of silver birch (*Betula pendula*) on two volcanic mountains in the French massif central. **Plant Ecology**, v.144, p. 231-242, 1999.

PUKKALA, T.; KOLSTRÖN, T. Competition indices and the prediction of radial growth in scots pine. **Silva Fennica**, v.21, n.1, p.55-67, 1987.

PUKKALA, T.; VETTERENTA, J.; KOLSTRÖN, T.; MIINA, J. Productivity of mixed stands of *Pinus silvestris* and *Picea abies*. **Scandinavian Journal of Forestry Research**, v.9, p. 143-153, 1994.

RADTKE, P.J.; WESTFALL, J.A.; BURKHART, H.E. Conditioning a distance-dependent competition index to indicate the onset of inter-tree competition. **Forest Ecology and Management**, v.175, p.17-30, 2003.

SMITH, D.M.; LARSON, B.C.; KELTY, M.J.; ASHTON, P.M.S. **The practice of silviculture**. New York: John Wiley, 1986, 527 p.

SPURR, S.H.; A measure of point density. **Forest Science**, v.8, p.85-96, 1962.

TOMÉ, M.; BURKHART, H.E.; Distance dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v.35, n.3, p.816-831, 1989.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M.F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.7, p.633-638, 2005.

ZHANG, S.; BURKHART, H.E.; AMATEIS, R.L. Modeling individual tree growth for juvenile loblolly pine plantations. **Forest Ecology and Management**, v.89, p.157-172, 1996.

ZEIDE, B. Analysis of growth equations. **Forest Science**, v.39, n.3, p.594-616, 1993.

VANCLAY, J.K. Aggregating tree species to develop diameter increment equations for tropical rainforests. **Forest Ecology and Management**, v.42, p.143-168, 1991.

WIMBERLY, M.C.; BARE, B.B. Distance –dependent and distance-independent models of douglas - fir and western hemlocks basal area growth following silvicultural treatment. **Forest Ecology and Management**, v.89,p.1-11, 1996.

WEINER, J. Assymmetric competition in plant populations. **Trends in Ecological Evolution**, v.5, p.360-364, 1990.

WU, H.; SHARPE, P.J.H.; WALKER, J.; PENRIDGE, L.K. Ecological field theory. A spatial analysis of resource interference among plants. **Ecology Modelling**, v.29,p.215-243, 1985.



Roraima

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA,
PECUÁRIA E ABASTECIMENTO

