

5 Curvas de classe de qualidade e crescimento em altura dominante

Sendo o índice de qualidade da estação definido como a altura dominante que um povoamento tem, teve ou terá a uma idade padrão, a simulação do crescimento em altura dominante está intimamente relacionada com a predição do índice de qualidade da estação.

A modelação do crescimento em altura dominante teve os seus primórdios há bastante tempo, quando se construíam curvas de classe de qualidade com base em métodos gráficos. Spurr (1952) e Curtis (1964), por exemplo, descrevem as técnicas inicialmente utilizadas para a obtenção de curvas de classe de qualidade. Dentre estas, o *método da curva guia* (versão gráfica do actual método da curva guia) foi o mais frequentemente utilizado. Neste método, as curvas de classe de qualidade, obtidas com base em medições feitas em parcelas temporárias cobrindo diversas classes de qualidade e idades, eram construídas a partir do gráfico da altura dominante em função da idade. Traçava-se, graficamente, uma curva média ou *curva-guia*, a partir da qual se "segregavam" as restantes curvas afastadas proporcionalmente da primeira.

Este método origina as chamadas *curvas anamórficas* ou proporcionais nas quais existe uma relação constante, ao longo da idade, entre as alturas de duas curvas de diferente classe de qualidade. Bruce e Schumacher (1942) descrevem metodologia que permite corrigir a proporção a aplicar em cada idade com base na relação entre o coeficiente de variação das alturas nessa idade e na idade-padrão, de modo a obter um primórdio as actuais *curvas polimórficas* ou não proporcionais as quais permitem variações de forma entre curvas.

Estes procedimentos estavam condicionados essencialmente pela não existência de dados provenientes de parcelas permanentes e pelas dificuldades de cálculo que outros métodos acarretariam.

Os dados disponíveis ainda hoje condicionam a metodologia a utilizar. Podem utilizar-se dados de três tipos:

- Medição de pares (altura dominante, idade) em parcelas temporárias. Para evitar o enviesamento das curvas de classe de qualidade a construir é importante garantir que todas as classes de qualidade estejam igualmente representadas em todas as idades. Se, como é vulgar, existir correlação entre qualidade da estação e idade, as curvas de classe de qualidade obtidas por este processo serão dependentes da distribuição dos dados por classes de idade X classe de qualidade. Apesar das

limitações inerentes à utilização deste tipo de dados, muitos autores o têm utilizado visto coincidir com o tipo de dados vulgarmente obtidos em inventários florestais. Curtis (1964) e Carmean (1972) sugerem métodos para a correcção do enviesamento provocado pela correlação entre a classe de qualidade e a idade.

- Medição de pares (altura dominante, idade) em *parcelas permanentes*, medidas a intervalos aproximadamente regulares ao longo de toda a vida do povoamento. Ao conjunto de medições feitas numa mesma parcela dá-se geralmente a designação de série de crescimento. Este é sem dúvida o método mais correcto pois permite identificar o verdadeiro padrão de crescimento dos povoamentos. Poucos investigadores podem no entanto recorrer a este tipo de dados, bastante invulgar, limitando-se a maior parte das vezes a utilizar medições feitas em *parcelas semi-temporárias* as quais são medidas durante parte da vida de um povoamento.
- Reconstituição dos padrões de crescimento em altura em árvores individuais dominantes, com base na análise do tronco. Este método, de aplicação restrita à zona temperada e a espécies em que seja fácil reconhecer os anéis de crescimento, tem a desvantagem de admitir que as árvores dominantes na altura da medição foram dominantes durante toda a vida do povoamento. Além disso, uma aplicação correcta deste método exige que as contagens de anéis de crescimento sejam feitas à altura dos verticilos, devendo proceder-se a correcções quando isto não seja possível (Carmean, 1972; Lenhart, 1972; Bailey e Grider, 1984; Dyer e Bailey, 1987). É no entanto um dos métodos que tem tido mais aplicação, pelo facto de permitir ter uma ideia mais ou menos correcta do padrão de crescimento em altura a partir de parcelas temporárias. Tennent e Burkhart (1981) deram uma valiosa contribuição a esta técnica avaliando a eficácia de vários critérios para a selecção de árvores individuais que representem o crescimento em altura dominante. Utilizando dados de parcelas permanentes instaladas em *Pinus radiata* na Nova Zelândia concluíram que a utilização das duas árvores com diâmetros mais próximos do diâmetro dominante, desde que tenham alturas dentro do intervalo altura dominante $\pm 5\%$, leva a uma estimativa razoável da evolução em altura dominante. Marques (1987) não encontrou diferenças significativas entre esta técnica e a utilização das 5 árvores mais grossas em parcelas de 500 m².

Alguns autores (Vuokila, 1965; Beck, 1971) referem ainda a utilização de medições de entrenós, obtidas com a árvore em pé ou abatida, mas esta técnica é bastante limitada pelo hábito de ramificação da espécie, pelo que não tem sido muito utilizada.

De acordo com a metodologia e curva de crescimento utilizadas podem obter-se: *curvas anamórficas* ou proporcionais nas quais se admite que a forma da curva de crescimento é independente da qualidade da estação, verificando-se constância da taxa relativa de crescimento em altura (Borders *et al.*, 1984); *curvas polimórficas*, nas quais se pressupõe, implícita ou explicitamente, influência da qualidade da estação na forma da curva de crescimento em altura; as curvas polimórficas podem ainda dividir-se em polimórficas *disjuntas*, se as curvas de diferentes classes de qualidade não se cruzam entre si constituindo um único feixe, e polimórficas *não-disjuntas* no caso contrário (Clutter *et al.*, 1983). Neste último caso constroem-se geralmente diferentes feixes de curvas de acordo com qualquer variável externa, por exemplo o tipo de solo.

Podemos agrupar os diversos trabalhos que têm considerado a modelação do crescimento em altura dominante em quatro métodos gerais para a obtenção de curvas de classe de qualidade. Clutter *et al.* (1983) consideram apenas três métodos gerais: o *método da curva guia*, o *método da predição dos parâmetros* e o *método das equações às diferenças*. Pode ainda considerar-se o *método do ajustamento independente de curvas de classe de qualidade*.

5.1 Método do ajustamento independente de curvas de classe de qualidade

A produtividade da estação é muitas vezes avaliada em termos de classes de qualidade, geralmente três – alta, média, baixa – ou cinco – muito alta, alta, média, baixa, muito baixa. As classes de qualidade são definidas com base na variabilidade natural existente na idade padrão. No método do ajustamento independente de curvas de classe de qualidade, os dados disponíveis para cada idade são agrupados em três ou cinco grupos – consoante o número de classes de qualidade que se pretende considerar e procede-se ao ajustamento da mesma função de crescimento a cada um dos grupos assim constituídos.

Ader (1980) refere também o *método do máximo-mínimo*, a utilizar com dados de parcelas temporárias. Este método, bastante rudimentar, consiste em ajustar três equações de regressão com os valores mínimos, médios e máximos observados em cada classe de idade.

Qualquer dos métodos pressupõe a selecção prévia de uma função de crescimento a utilizar. A maior parte dos modelos apresentados nas tabelas 2.1 e 2.2 têm sido utilizados na modelação do crescimento em altura dominante. A função de Lundqvist e algumas das suas variantes (nomeadamente a função de Schumacher) e a função de Richards têm sido

sem dúvida os modelos mais utilizados. Recentemente, tem-se recorrido com alguma frequência à função de McDill-Amateis.

5.2 Método da curva-guia

O método da curva-guia consiste fundamentalmente na adaptação dos métodos gráficos iniciais às técnicas de análise de regressão. Pode aplicar-se a qualquer dos tipos de dados referidos. Para aplicar o método, ajusta-se a função de crescimento seleccionada ao conjunto dos dados disponíveis. Saliente-se que ao ajustamento realizado nesta fase corresponde geralmente um coeficiente de correlação bastante baixo, uma vez que o que se pretende é obter uma “curva média” – a curva-guia - com base em todos os dados. Por exemplo Oliveira (1985) ajustou a seguinte curva-guia a dados de parcelas temporárias de pinheiro bravo nas regiões montana e sub-montana (figura 6.1):

$$\ln(h_{dom}) = 3.2865 - 14.2234 \frac{1}{t}$$

ou

$$h_{dom} = e^{3.2865} e^{-14.2234 \frac{1}{t}}$$

Como se pode ver na figura 6.1, o índice de qualidade da estação da curva-guia (idade padrão $t_p=40$ anos) é de 18.744 m.

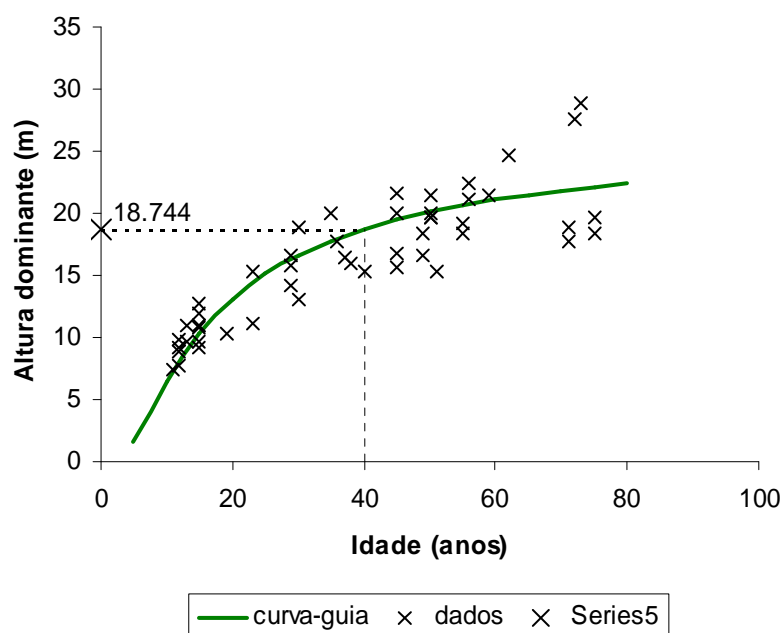


Figura 6.1. Ajustamento da curva-guia aos dados de parcelas temporárias de pinheiro bravo (adaptado de Oliveira, 1985)

As restantes curvas são localizadas a uma distância da curva-guia proporcional à distância a que se localizam desta na idade padrão. Por exemplo, para obter a curva dos 20 m:

$$\frac{hdom_guia(40)}{hdom_guia(t)} = \frac{hdom_{20}(40)}{hdom_{20}(t)} \Leftrightarrow \frac{18.744}{hdom_guia} = \frac{20}{hdom_{20}}$$

É possível deduzir a expressão geral da curva correspondente a qualquer valor de índice de qualidade da estação (S), substituindo hdom_guia pela correspondente função:

$$\frac{e^{3.2865} e^{-14.2234 \frac{1}{40}}}{e^{3.2865} e^{-14.2234 \frac{1}{t}}} = \frac{lqe}{hdom_{lqe}(t)}$$

Designando genericamente a altura dominante à idade t por hdom, obtém-se a expressão para o crescimento em altura dominante em função do valor de S:

$$hdom = lqe e^{-14.2234 \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{40} \right)}$$

As curvas de classe de qualidade da figura 6.2 foram calculadas com base nesta expressão. Na tabela de produção que desenvolveu, Oliveira (1985) considerou três classes de qualidade:

- Classe superior (S), para os povoamentos com $22 \text{ m} \leq S \leq 26 \text{ m}$
- Classe média (M), para os povoamentos com $18 \text{ m} \leq S < 22 \text{ m}$
- Classe inferior (I), para os povoamentos com $14 \text{ m} \leq S < 18 \text{ m}$

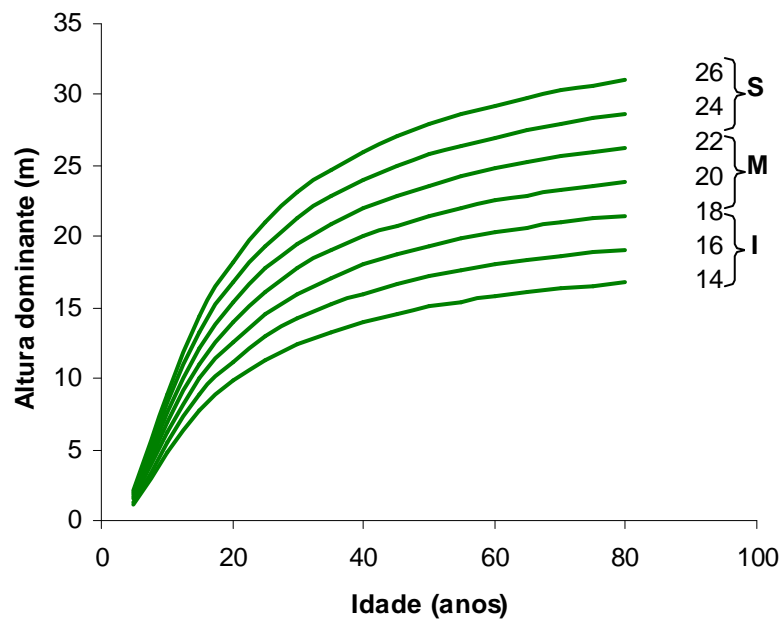


Figura 6.2. Curvas de classe de qualidade da tabela de produção de Oliveira (1985)

Esta metodologia, dependendo da qualidade dos dados, pode originar enviesamentos relevantes na predição do crescimento em altura dominante. De facto, se não houver uma representatividade de todas as classes de qualidade para as diversas idades de interesse, pode haver sub ou sobreestimações importantes, quer para as idades jovens, quer para as idades avançadas. Suponhamos que, num determinado conjunto de dados, não há representação das melhores estações nas idades mais avançadas. Ao ajustar a curva-guia, ela decrescerá mais rapidamente do que os povoamentos reais com um índice de qualidade da estação médio, tendo como consequência um sub-estimação do crescimento da altura dominante, particularmente nos povoamentos maduros. Este problema também ocorre com o método do ajustamento independente de curvas de classe de qualidade.

Para além de Oliveira (1965) também Páscoa (1987) utilizou o método da curva-guia para a modelação do crescimento em altura dominante de pinheiro bravo.

5.3 Método da predição dos parâmetros

O método da predição dos parâmetros (Clutter et al., 1983) pressupõe a existência de séries de crescimento suficientemente longas, pelo que tem sido aplicado essencialmente a

dados provenientes de análise do tronco. Foi desenvolvido com a intenção de obter curvas de classe de qualidade polimórficas e, na sua forma mais usual, implica duas fases:

- Estimação do índice de qualidade da estação de cada árvore ou parcela com base quer numa função de crescimento ajustada a cada árvore ou parcela, quer por interpolação entre as alturas dominantes observadas imediatamente abaixo e acima da idade padrão.
- Ajustamento de uma função de crescimento – previamente seleccionada – aos dados de cada árvore ou parcela
- Utilização de regressão linear ou não linear para relacionar os parâmetros estimados para cada árvore ou parcela com o índice de qualidade da estação; o modelo pode posteriormente ser re-ajustado como um único modelo de regressão em que o índice de qualidade da estação seja uma das variáveis independentes.

Embora de aplicação bastante generalizada (Beck, 1971; Carmean, 1972; Graney e Burkhart, 1973; Franz e Rawat, 1974; Payandeh, 1974; Trousdell et al., 1974; Leal, 1982; Monserud, 1984; Wensel e Krumland, 1986) convém desde já apontar algumas limitações à utilização desta metodologia:

- As curvas obtidas directamente por este processo não passam, na idade padrão, exactamente pela altura que define o índice de qualidade da estação. Pode no entanto recorrer-se a modelos sujeitos a esta restrição (Alder, 1980; Leal, 1982; Wensel e Krumland, 1986).
- As curvas obtidas estão na dependência da idade padrão, enquanto que em qualquer dos outros métodos a idade padrão é utilizada apenas para fins de identificação das curvas.

No nosso país, Leal (1982) utilizou este método para a elaboração de curvas de classe de qualidade para o eucalipto na zona centro de Portugal.

5.4 Método das equações às diferenças

O *método das equações às diferenças* baseia-se no desenvolvimento de uma equação às diferenças a partir da função de crescimento seleccionada para o ajustamento, de modo a expressar a altura dominante na idade t_2 (H_{dom_2}) em função da altura dominante na idade t_1 (H_{dom_1}) e das idades de medição t_1 e t_2 . Veja-se o capítulo 4 (ponto 4.2.2) sobre a expressão de funções de crescimento sob a forma de equações às diferenças. A aplicação desta metodologia está dependente da existência de pelo menos duas medições sucessivas

na mesma parcela ou de dados obtidos por análise do tronco. É um método bastante flexível e pode originar curvas anamórficas ou polimórficas de acordo com a função de crescimento previamente seleccionada e o processo seguido para obter a equação às diferenças. Uma vez obtida a equação às diferenças pode deduzir-se uma equação para a previsão do índice de qualidade da estação utilizando $t_2=t_p$, onde t_p é a idade padrão. Exemplificando com a função Lundqvist-k, uma das funções de crescimento que tem sido utilizada em Portugal com bastante frequência para a modelação do crescimento de plantações de eucalipto. A função Lundqvist-k toma a seguinte expressão quando aplicada à altura dominante:

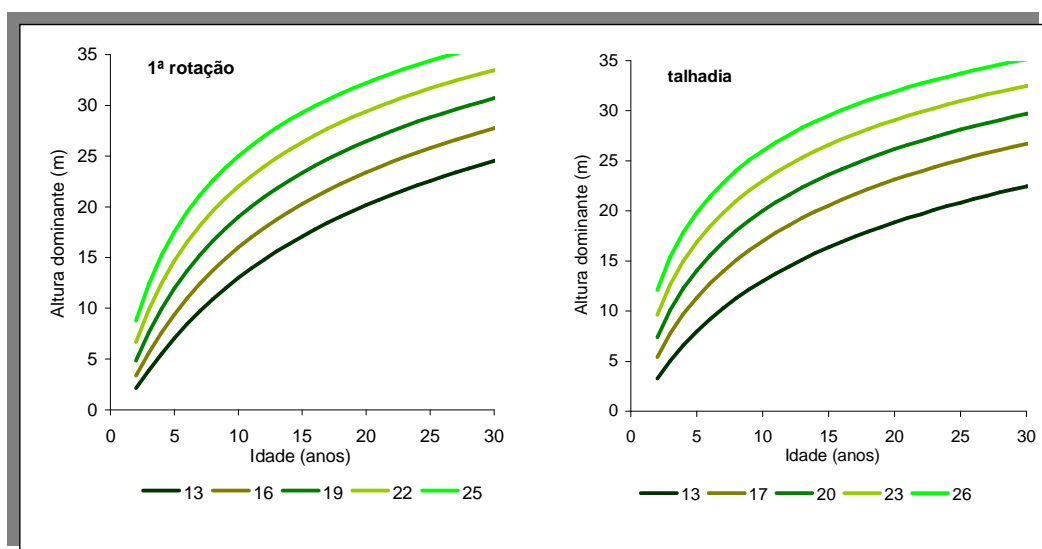
$$h_{dom_2} = A \left(\frac{h_{dom_1}}{A} \right) \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^n \Leftrightarrow h_{dom_1} = A \left(\frac{h_{dom_2}}{A} \right) \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^n$$

A partir destas funções deduz-se a seguinte função para a predição do índice de qualidade da estação:

$$S = A \left(\frac{h_{dom}}{A} \right) \left(\frac{t}{t_p} \right)^n \Leftrightarrow h_{dom} = A \left(\frac{I_{qe}}{h_{dom}} \right) \left(\frac{t_p}{t} \right)^n$$

Explicitando em ordem a h_{dom} , obtemos a equação base para a construção do feixe de curvas de classe de qualidade. Na figura 6.3 mostra-se o feixe de curvas de classe de qualidade obtido com a função de Lundqvist-k utilizada no modelo GLOBULUS 2.1 para a região Centro Litoral (Tomé et al., 2001). Como se pode ver, neste caso utilizaram-se cinco classes de qualidade.

Alguns autores (Devan e Burkhart, 1982; Amateis e Burkhart, 1985) optaram por utilizar as curvas de crescimento sob forma diferencial para a modelação do crescimento em altura dominante. A equação para o desenvolvimento da altura dominante com a idade obtém-se neste caso por integração da equação diferencial. A curva correspondente a um determinado valor do índice de qualidade da estação S pode ser obtida através dos valores iniciais (t_0, S).



Valores para o índice de qualidade da estação nesta região:

1ª rotação					talhadia				
I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
13	16	19	22	25	13	17	20	23	26

Figura 6.3. Curvas de classe de qualidade correspondentes à região Centro Litoral no modelo GLOBULUS 2.1

Borders *et al.* (1984) apontaram para o facto de que um modelo formulado como uma equação diferencial pode sempre ser formulado como uma equação às diferenças por utilização dos valores iniciais (t_1 , H_{dom_1}). Esta última formulação tem a vantagem de dispensar a utilização de taxas instantâneas de crescimento usualmente estimadas incorrectamente através de diferenças finitas.

5.5 Referência a alguns trabalhos que utilizaram metodologias particulares

Embora a maior parte dos trabalhos publicados nos últimos anos sobre a elaboração de curvas de classe de qualidade possam ser enquadrados na classificação apresentada, alguns merecem uma referência especial pela particularidade da metodologia utilizada.

Carmean (1972), trabalhando com dados de análise de tronco, agrupou os dados por classes de qualidade (intervalo de 10 pés) e ajustou a função de Richards (Richards, 1959) independentemente para cada uma das classes previamente definidas.

Stout e Shumay (1982) estudaram a hipótese de desenvolver uma medida da qualidade da estação independente do tempo (idade), com recurso ao estabelecimento da relação altura-diâmetro das árvores dominantes. Verificaram que às diferenças na qualidade da estação correspondia uma família de curvas altura-diâmetro com uma ordenada comum e um parâmetro de forma dependente da qualidade da estação. Este tipo de metodologia, só aplicável a povoamentos puros equiênicos como é evidente, pode ser útil nos casos em que seja difícil determinar a idade dos povoamentos.

Com o objectivo de obterem curvas de classe de qualidade polimórficas e independentes da idade padrão a partir de dados de análise do tronco de *Pinus taeda*, Devan e Burkhart (1982) utilizaram um modelo de regressão segmentado, junção de duas equações diferenciais. Conseguiram por este processo melhorar as curvas existentes, tanto para povoamentos naturais como obtidos por plantação.

Borders *et al.* (1984) utilizaram uma técnica semelhante a partir de dados de parcelas permanentes de *Pinus ellioti*. Após formularem vários modelos sob a forma de equações às diferenças, optaram pela junção de dois modelos sob esta forma: um modelo anamórfico (formulação da equação de Schumacher como uma equação às diferenças) para as idades juvenis e um modelo polimórfico (Lenhart, 1968) para as idades avançadas.

Biging (1985) adaptou a técnica de ajustamento de modelos lineares com parâmetros variáveis (regressão de coeficientes aleatórios (Swamy, 1970)) para o ajustamento de uma simplificação linear da função de Richards formulada com a assíntota dependente da classe de qualidade.

Não existem metodologias definidas para a construção de curvas de classe de qualidade polimórficas não-disjuntas, existindo poucas equações deste tipo na literatura.

Bailey e Clutter (1974) desenvolveram uma técnica para a obtenção de curvas polimórficas a partir de curvas de crescimento nas quais seja possível identificar um parâmetro de forma. A técnica consiste em formular o modelo de tal modo que este parâmetro seja dependente da classe de qualidade e encontrar em seguida um método de estimação que não exija a identificação da classe de qualidade antes do ajustamento. Esta metodologia foi ensaiada pelos autores para obtenção de curvas de classe de qualidade para a *Pinus radiata* na Nova Zelândia, a partir da equação de Lundqvist, considerando como parâmetro comum a intersecção. Uma análise cuidada deste método permite identificá-lo como um caso particular do método das equações às diferenças, como foi salientado por Borders *et al.* (1984).

Zahner (1962), por exemplo, obteve três feixes de curvas diferentes de acordo com o tipo de solo; Stage (1963) desenvolveu curvas de classe de qualidade polimórficas não-disjuntas

nas quais a selecção do feixe de curvas a utilizar em cada caso particular é feita de acordo com o número de anéis de crescimento num raio de 1.5 polegadas a partir da medula, contando em verrumadas feitas ao nível de 1.30 m em árvores dominantes. Neste trabalho a qualidade da estação é determinada em função do acréscimo que uma árvore dominante de uma determinada altura pode atingir. Bruce (1981) utilizou um ajustamento simultâneo da altura e respectivo crescimento, recorrendo a um processo iterativo; com base numa forma generalizada da função de Schumacher incluindo variáveis qualitativas, obteve curvas polimórficas não só através do efeito da qualidade da estação mas também do efeito de tratamentos culturais e factores da estação. Monserud (1984) desenvolveu uma equação para o crescimento em altura dominante de *Pseudotsuga menziesii* com base na curva logística, no qual inclui o tipo de associação vegetal através de variáveis qualitativas.

5.6 Predição do índice de qualidade da estação

Quando o objectivo primário da modelação é a predição do índice de qualidade da estação na fase de ajustamento dos modelos deve utilizar-se esta última variável como variável dependente, ajustando modelos da forma:

$$S=f(h_{dom}, t) .$$

Convém talvez referir alguns trabalhos feitos sob esta última óptica. Curtis *et al.* (1974) discutem sobre a oportunidade de optar por cada uma das variáveis dependentes (índice de qualidade da estação ou altura dominante). McQuilkin e Rogers (1978) desenvolveram métodos para a determinação da precisão das estimativas do índice de qualidade da estação como variável dependente. Concluíram que a largura dos intervalos de confiança diminui se aumentarmos o número de árvores amostra e também com a proximidade da idade padrão. Utilizando métodos de simulação estudaram também o efeito de erros na medição da altura dominante e na idade, na estimação do índice de qualidade da estação. Monserud (1984) desenvolveu, recorrendo ao método de Dahms (1975), uma equação para a previsão do índice de qualidade da estação de povoamentos de *Pseudotsuga menziesii*, na qual inclui variáveis definidas de acordo com o tipo de associação vegetal. Marques (1987) aplicou a metodologia de Curtis *et al.* (1974) a povoamentos de pinheiro bravo no vale do Tâmega.

5.7 Exercícios

5.7.1 Suponha que ajustou a função de Richards a um conjunto de dados de parcelas temporárias de sobreiro, tendo obtido a seguinte função:

$$h_{dom} = 16.29 \left(1 - e^{-0.0158 t} \right)^{\frac{1}{1-0.3252}}$$

- a) Calcule o índice de qualidade da estação (S) para esta curva, utilizando uma idade padrão de 80 anos
- b) Utilizando esta função como curva-guia, é capaz de deduzir a expressão geral da curva correspondente a qualquer valor de S?
- c) Trace as curvas de classe de qualidade correspondentes à função deduzida em b), considerando as seguintes classes de qualidade: 8, 10, 12, 14, 16.

5.7.2 Suponha que ajustou a função de Lundqvist na sua forma às diferenças com o parâmetro k livre a um conjunto de dados de parcelas permanentes de eucalipto, tendo obtido a seguinte função:

$$h_{dom_2} = 61 \left(\frac{h_{dom_1}}{61} \right) \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{0.3955}$$

- a) Considere que mediu a altura dominante de um povoamento de 5 anos e que obteve o valor de 10 m. Qual o índice de qualidade da estação (S) desse povoamento (considere uma idade padrão de 10 anos)?
- b) Utilizando esta função é capaz de deduzir a expressão geral da curva correspondente a qualquer valor de S?
- c) Trace as curvas de classe de qualidade correspondentes à função deduzida em b), considerando as seguintes classes de qualidade: 13, 16, 19, 22, 25.

5.7.3 Suponha que ajustou a função de Lundqvist na sua forma às diferenças com o parâmetro k livre a um conjunto de dados de parcelas permanentes de pinheiro bravo, tendo obtido a seguinte função:

$$h_{dom_2} = 69 \left(\frac{h_{dom_1}}{69} \right) \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{0.458203}$$

- a) Considere que mediu a altura dominante de um povoamento de 25 anos e que obteve o valor de 10 m. Qual o índice de qualidade da estação (S) desse povoamento (considere uma idade padrão de 50 anos)?
- a) Utilizando esta função é capaz de deduzir a expressão geral da curva correspondente a qualquer valor de S?
- b) Trace as curvas de classe de qualidade correspondentes à função deduzida em b), considerando as seguintes classes de qualidade: 12, 15, 18, 21, 24.