

III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales IBEROMADERA 2007

3 al 5 de Julio, Buenos Aires, Argentina

A21. Propriedades anatômicas de *Pinus greggii* ENGELM. preditas a través de espectroscopia de infravermelho próximo.

Washington Luiz E. Magalhães (wmagalha@cnpf.embrapa.br)

Embrapa Florestas

Estrada da Riberia km 111 C. P. 319 CEP 83.411-000 Colombo PR

Graciela Ines Bolzon de Muñiz (gmuniz@ufpr.br), Franciele Scorsin (francielescorsin@hotmail.com);

Umberto Klock (klockuer@ufpr.br)

Universidade Federal do Paraná

Rornullo **Luiz Simão** (rlsirmao@klanbin.com.br)

Klabin S.A.

Palavra-Chave: Infravermelho Próximo, madeira, método não-destrutivo, quimiometria.

RESUMO: O setor madeireiro e de celulose e papel necessitam uniformizar e aperfeiçoar seus produtos. e o controle da qualidade da madeira usada como matéria-prima é uma exigência cada vez maior. A espectroscopia na região do infravermelho próximo vem se difundindo como método de análise devido a sua rapidez, a pouca preparação de amostras, nenhum uso de reagentes químicos e nenhuma influência do operador. Este trabalho objetiva correlacionar os espectros de NIR com as dimensões de fibras de amostras de madeira de *Pinus greggii* Engelm .. A técnica envolve a aquisição de espectros de reflectância difusa na faixa do NIR de amostras que são também submetidas às análises convencionais. A seguir é feita uma análise estatística multivariada para construir um modelo de predição das propriedades. As medidas convencionais foram feitas usando-se microscopia óptica em lâmina de macerado. Nas análises anatômicas,

verificou-se uma variação de comprimento de traqueídeos entre 4100 μm e 2300 μm , diâmetro entre 71 μm e 50 μm e espessuras de parede entre 10 μm e 19 μm . O equipamento utilizado para obtenção dos espectros foi um espectrofotômetro FemWin900. Os cálculos matemáticos foram realizados utilizando o software Unscrambler[®] 9.2. Conseguiu-se uma correlação média para as propriedades de comprimento e diâmetro dos traqueídeos, já para as outras propriedades não houve uma boa correlação.

A21. Near infrared spectroscopy to predict anatomical properties of *Pinus greggii* ENGELM.

ABSTRACT: The lumber and cellulose and paper sector need to standard and to optimize its products, and the quality control of the raw material is becoming a growing exigency. The near infrared spectroscopy is spreading out as a method of analysis due the rapidity, almost none preparation of samples, the absence of chemical reagents, and neither operator error. The objective of this work is to correlate the spectra of NIR with the fiber dimensions of wood samples from wood of *Pinus greggii* Engelm. The technique involves the acquisition of spectra of diffuse reflectance in the range of the NIR from samples that are also submitted to the conventional analyses. Next, a multivariate statistics analysis is made to construct a prediction model for the properties. The conventional measurements were made using optic microscopy in macerated lamina. The anatomical analyses show variation of tracheid length between 4100 μm and 2300 μm , the diameter between 71 μm and 50 μm and the cell wall thickness between 10 μm and 19 μm . The spectra were obtained using the spectrophotometer FemWin900. The mathematical calculations were carried through using software Unscrambler[®] 9.2. It was obtained a medium correlation for the tracheid length and diameter, and for the other proprieties there wasn't a good correlation.

Keywords: Near infrared spectroscopy. Wood: Non-destructive methods: Chemometrics.

1. INTRODUÇÃO

A densidade tem sido a característica usada por alguns programas de melhoramento com o intuito de aumentar o rendimento de polpa, a resistência e a rigidez de tábuas. Todavia, na maioria das vezes os programas focalizam suas ações nas características fenotípicas mais facilmente mensuráveis, como o volume, retidão de fuste, forma, altura, resistência a doenças e ângulo de grão. Muito embora existam muitas pesquisas em morfologia das fibras, poucos são os programas que têm usado outras características tecnológicas internas como o comprimento de fibra, espessura de parede, "coarseness" ou rendimento de polpa. Algumas poucas empresas começam a introduzir essas características nos seus programas inclusive com a utilização do ângulo microfibrilar. Para avaliação das fibras, aqui no Brasil não é usual usar-se o "coarseness", que pode ser definido como a massa total de uma amostra de fibras dividida pelo comprimento total das fibras (SYKES et al., 2005). O comprimento de fibra é importante para a resistência mecânica dos produtos obtidos a partir da madeira. As propriedades de fibra (KELLOGG et al., 1975) e a composição química da madeira são reconhecidas como sendo de grande importância para as indústrias de papel e celulose. Entretanto, as correlações entre as propriedades básicas da madeira e a qualidade dos produtos finais nem sempre são bem conhecidas (POT et al., 2002). Estudos com *Pinus taeda* mostraram uma grande variação das propriedades rendimento de celulose, comprimento de fibra e "coarseness" (CHANG et al., 2005). Assim, é recomendável que para uma população já previamente selecionada por sua densidade seja, num passo seguinte, melhorada quanto ao comprimento de seus traqueídeos (VIA et al., 2004).

O comprimento de fibra é uma propriedade que influencia muitas características do papel e da madeira maciça. Essa grandeza tem fundamental importância para a indústria de papel e celulose em virtude de sua grande relação com muitas propriedades do papel, incluindo as resistências ao rasgo e ao estouro (THOMAS, 1970; BRITT, 1970).

Para a determinação convencional das dimensões das fibras é necessária primeiramente uma polpação da madeira. Embora já existam no Brasil empresas que usam métodos ópticos, a maioria dos laboratórios de anatomia da madeira ainda usa a montagem de lâminas provisórias e microscópio óptico com operador para realizar o maior número de medidas possíveis para cada amostra. No método óptico é necessário que uma suspensão diluída da polpa passe por uma cubeta que é iluminada por uma fonte de luz. Uma câmera detecta os traqueídeos e uma análise de imagem é usada para medir seu comprimento. Entretanto, mesmo no caso de uso desses equipamentos modernos, a polpação é lenta e exige trabalho intenso o que limita o número de amostras que podem ser analisadas.

Atualmente existe muito interesse no desenvolvimento de métodos rápidos e não-destrutivos para a determinação de propriedades de madeira oriunda de árvores plantadas e de rápido crescimento. Essas propriedades são importantes para a indústria em termos de avaliação de seus recursos e também para ajudar nos trabalhos de melhoramento da qualidade da madeira das árvores de seus plantios (TSUCHIKAWA, 2007; SO et al., 2004).

Schimleck e Evans (2002a, 2002b, 2004); Schimleck et al. (2003, 2005a, 2005b); Jones et al. (2005a, 2005b) estimaram o ângulo microfibrilar, rigidez, densidade aparente e características morfológicas em rolos de incremento de *Eucalyptus* através da espectroscopia na região do NIR usando como valor de referência medidas realizadas com a metodologia SilvScan desenvolvida no CSIRO da Austrália.

O uso de espectroscopia para a predição do comprimento de fibras tem recebido pouca atenção dos programas de melhoramento florestais devido à escassez de estudos.

Alguns trabalhos mostram que o uso de certas técnicas para tratamento prévio dos espectros, como a correção ortogonal do sinal (asc), pode melhorar o poder de predição das técnicas quimiométricas aplicadas em propriedades anatômicas e físicas de madeira, do papel e da polpa (WOLD et al., 1998; MARKLUND; HAUSSON, 1999; HAUSSON et al., 2001).

Em todos os trabalhos encontrados na literatura internacional que desenvolveram metodologia para uso dos espectros na faixa do NIR para prever os comprimentos de fibras, as medições dos valores de referência usaram médias ponderadas (comprimento ou peso) obtidas nos equipamentos ópticos acima citados. A chamada média do comprimento de traqueídeo é a média aritmética dos comprimentos dos traqueídeos dado pela fórmula abaixo:

$$\text{Média aritmética} = \frac{\sum n_i l_i}{\sum n_i}$$

E a média ponderada pelo comprimento é dada por:

$$\text{Média ponderada no comprimento} = \frac{\sum n_i l_i^2}{\sum n_i l_i}$$

Onde l_i é o comprimento da fibra de classe de comprimento $i^{\text{ésimo}}$ e n_i é o número de fibras na classe de comprimento i (SCHMILECK et al., 2004).

A despeito de quase a totalidade dos trabalhos usarem a reflectância difusa, principalmente por esta não exigir pré-tratamento das amostras, Sykes et al. (2005) mostraram que é possível obter curvas de calibração em madeira por transmitância. As amostras eram lâminas de madeira obtidas em micrótomo com cerca de 200 μm de espessura. Estes autores avaliaram o uso do NIR para predição do teor de α -celulose, comprimento de fibra, "coarseness", e teor de lignina em madeira de *Pinus taeda*. Para a propriedade comprimento de fibra, os autores encontraram um coeficiente de determinação para a curva de calibração de 0,43 e um erro padrão de predição usando amostras externas àquelas usadas para a calibração de 0,491 mm, sendo que o valor do comprimento médio das fibras era de 1,598 mm.

Schimleck et al. (2004) encontraram valores para os coeficientes de determinação de 0,88 e 0,96 para as curvas de calibração para as médias aritmética e ponderada do comprimento de fibra, respectivamente. Os espectros foram obtidos de amostras na forma de rolos de incremento. Todavia, para a predição externa as curvas de calibração apresentaram coeficientes de determinação de 0,58 e 0,86, com erros padrão de predição de 0,17 e 0,25 mm, respectivamente.

Via et al. (2005) conseguiram boa curva de calibração usando espectros de absorvância na região do NIR para amostras de lenho juvenil de madeira de *Pinus palustris*. Segundo esses autores a falha no modelo de predição para amostras do lenho maduro está no fato do espectro na região do NIR trazer alguma informação química da lignina e da celulose que estão correlacionadas com o comprimento de fibra. Ainda assim, os coeficientes de determinação para as curvas de calibração e de validação externa foram de 0,76 e 0,65, respectivamente. Sendo que o modelo apresentou erros maiores para os comprimentos de fibra acima de 4,2 mm.

Marklund e Hauksson (1999) usaram pó de madeira para obtenção de espectros na região do NIR e correlacionaram com comprimento de fibra. Os coeficientes de determinação para as curvas de calibração e predição externa foram de 0,775 e 0,727, respectivamente, após o uso de correção ortogonal do espectro. Hauksson et al. (2001) também usando a mesma técnica anterior em madeira de Norway spruce conseguiram coeficientes de determinação para a predição externa das

médias ponderadas dos comprimentos de fibras conforme as equações (1) e (2) acima descritas de 0,722 e 0,840, com erros de predição externa de 2,13 e 0,63 mm.respectivamente.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a técnica de espectroscopia de infravermelho próximo para a predição de comprimento de fibras da madeira, utilizou-se tratamento estatístico multi vanado para desenvolver lima curva de calibração correlacionando os espectros no infravermelho próximo e a técnica convencional de análise das propriedades anatômicas da madeira.

2. MATERIAIS EMÉTÜDÜS

Para a análise convencional e para obtenção dos espectros, foram estudados anatomicamente as amostras de *Pinus greggii*, provenientes de florestas com 13 anos da Klabin-SC, analisou-se 20 árvores, das quais foram retirados discos ao longo da altura do tronco a cada 2,30 m (cerca de sete em média por árvore nas seguintes alturas: 2,3 m, 4,6 m, 6,9 m, 9,2 m, 11,5 m, 13,8 m, 16,1 m). Desses discos foram retiradas cunhas para a maceração e para serem moídas.

Foi utilizado o método nítrico-acético de maceração para separar as fibras que foram usadas na montagem de lâminas provisórias para as medidas anatômicas. Esse procedimento consiste na maceração de palitos de madeira com espessura de 2 mm em uma solução de ácido nítrico concentrado e ácido acético glacial na proporção de 1:3 em tubos de ensaio. Os palitos devem ser completamente submersos na solução macerante. Os tubos de ensaio são levados para banho-maria em ebulição dentro de capela com exaustor. O tempo de maceração foi de aproximadamente uma hora, seguido de lavagem com água destilada e desintegração do resíduo (BARRICHELO et al., 1983). As medições foram feitas em microscópio óptico; para medição do comprimento foi utilizada a objetiva de 5x e para a medição dos diâmetros interno e externo foi usada a objetiva de 10x. Os resultados foram dados em micrômetros.

Foram feitas 30 medidas ao microscópio lâmina temporária, para em seguida realizar uma média aritmética, do comprimento e dos diâmetros externo e interno dos traqueídeos. O microscópio óptico utilizado foi o AXIOPLAN 2 "ZEISS".

Os espectros de NIR foram obtidos a partir da serragem de cunhas dos discos das toras. As médias dos valores medidos foram utilizadas como valor referência para a -calibração dos espectros na faixa do NIR.

O equipamento empregado foi o espectrofotômetro FenWin900 (~FEMTO) de fabricação nacional. Os espectros foram coletados em um intervalo com comprimento de onda variando de 1100 a 2500 nm e de 1 em 1 nm. O equipamento utiliza um corpo de teflon como referência e foi operado em modo de reflectância difusa (log I/R). Foram coletados 101 espectros de 20 árvores de *P. greggii*.

Os dados foram analisados com o software Unscrambler® 9.2, utilizando calibração multi variada feita por uma regressão pela técnica dos mínimos quadrados parciais (PLS), em média com o total de 5 fatores (varáveis latentes), com validação cruzada ("full cross validation"). Cerca de 70% das amostras foram usadas para a construção das curvas de calibração e as restantes 30% foram usadas para a validação externa do modelo construído. O erro padrão de predição refere-se à validação externa realizada com tais amostras que não participaram da construção da curva de

calibração. Para maiores detalhes das técnicas quimiométricas usadas ver Esbensen (2002), Naes et al. (2004) e Martens e Naes (2002).

A avaliação de como a calibração ajusta os dados é fornecido pelo erro padrão de calibração. O erro padrão de predição (SEP) fornece uma avaliação da qualidade da predição feita pela curva de calibração para um conjunto de amostras diferentes daquelas usadas na calibração. O desvio da razão de desempenho (RDP), calculado como a razão entre o desvio padrão dos valores de referência e o SEP, foi usado para determinar a habilidade de predição da calibração (SCHIMLECK: EVANS, 2004). Um valor de RDP maior que 2.5 é considerado satisfatório para seleção, todavia Schimleck et al. (2003) consideraram que um RDP de aproximadamente 1.5 pode ser usado como uma ferramenta inicial para o melhoramento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores mínimos, médios e máximos das dimensões dos traqueídeos medidos convencionalmente são mostrados na Tabela 1, assim como a média dos desvios padrão de cada amostra.

Tabela I - Dimensões dos traqueídeos de *Pinus greggii* obtidos de árvores com 13 anos de idades.

Table 1. *Pinus greggii* tracheid dimensions from trees with 13 years old,

| Propriedades anatômicas | Mínimo (μm) | Médio (μm) | Máximo (μm) | Desvio padrão das médias (μm) | Média dos Desvios Padrão (μm) | Desvio padrão das fibras (μm) |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--|--|--|
| Comprimento | 2300 | 2950 | 4100 | 360 | 650 | 820 |
| Diâmetro Externo | 50 | 57 | 71 | 4 | 7 | 9 |
| Diâmetro Interno (lúmen) | 20 | 30 | 38 | 5 | 10 | 10 |
| Espessura da Parede | 10 | 13 | 19 | 3 | 3 | 4 |

Pode-se observar que as propriedades analisadas possuem uma considerável variância dentro das amostras, devido o material ser heterogêneo e de origem natural. As fibras (traqueídeos) podem variar muito de dimensões conforme a posição no tronco em que se coleta a amostra, bem como a que condições a árvore é submetida, alterando assim sua composição e formação. O desvio padrão das médias não é tão elevado quanto o desvio padrão dentro de uma mesma amostra. Isso mostra que existe uma variação maior dentro de uma mesma árvore no sentido medula casca que entre árvores, ao menos no lote estudado.

A Figura 1 mostra espectros sem tratamento prévio por reflectância difusa na faixa de comprimento de onda do NIR para amostras de madeira de *Pinus* com grande variação das

dimensões de fibras. Os espectros são típicos de madeira e similares aos reportados na literatura internacional.

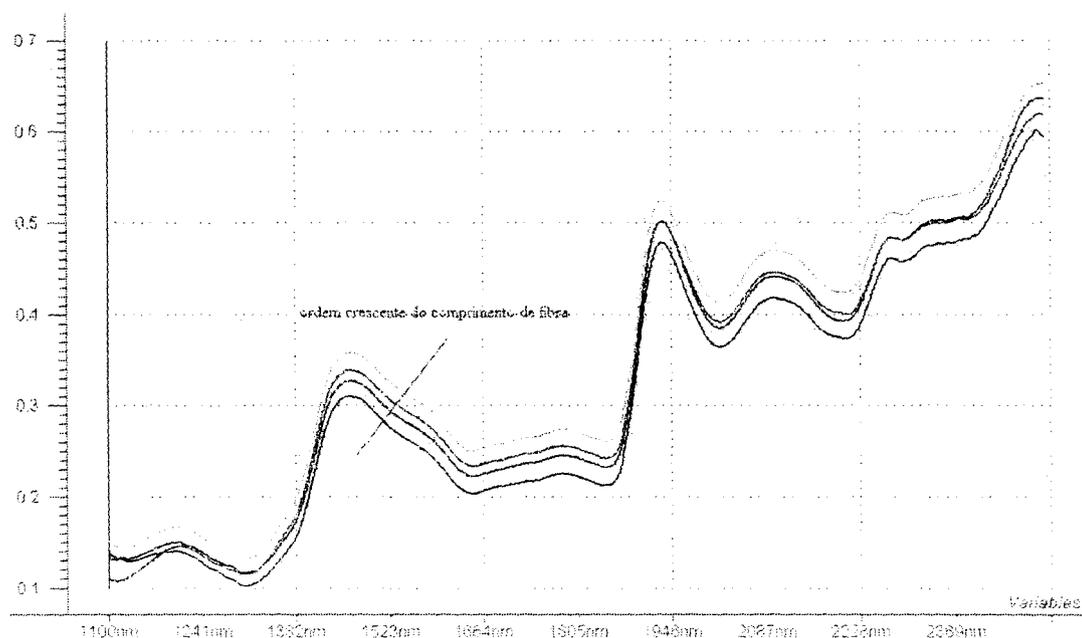


Figura 1. Espectros típicos de madeira de *Pinus greggii*, obtido pelo equipamento Femwin900.

Figure 1. Typical spectra from *Pinus greggii* wood obtained in the Femwin900 equipment.

O tratamento multivariado utilizou espectros de 70% das amostras para a obtenção da curva de calibração (modelo) e os outros 30% das amostras para a predição (ou validação) externa. Na Tabela 2 estão mostrados os valores dos coeficientes de correlação, das variâncias para a calibração e a validação cruzada, assim como, os valores do coeficiente de correlação para a predição externa.

Tabela 2. Coeficientes de correlação e erros padrão do modelo e da validação externa para as propriedades anatômicas de *P. greggii* pelo programa Unscrambler 9.2 usando o método PLS.

Table 2. Correlation coefficients and standard errors of the model and the external validation for anatomical properties of *P. greggii* using PLS in the Unscrambler 9.2 software.

| Propriedades anatômicas | R (calibração) | R (validação cruzada) | Erro padrão da modelagem (μm) | | R (validação externa) | Erro padrão de predição externa (μm) | Nº var. latentes |
|-------------------------|----------------|-----------------------|--|-------------------|-----------------------|---|------------------|
| | | | calibração | validação cruzada | | | |
| Comprimento | 0,818 | 0,668 | 200 | 263 | 0,662 | 226 | 6 |
| Diâmetro externo | 0,567 | 0,362 | 2.4 | 2.8 | 0,599 | 3 | 5 |

| | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------------|-------|-----|-----|-------|---|---|
| Diâmetro interno | Não foi possível construir um modelo | | | | | | |
| Espessura de parede | 0,742 | 0,684 | 1,3 | 1,4 | 0,344 | 2 | 4 |

Observa-se que a propriedade anatômica diâmetro interno não obteve correlação com os espectros de NIR e que para a espessura de parede, embora se tenha conseguido uma boa calibração e validação cruzada, o modelo não apresentou uma boa capacidade de predição.

A Figura 2 mostra os valores preditos pela regressão PLS comparados com os valores de referência medidos convencionalmente para o comprimento dos traqueídeos. Os eTOS padrão encontrados para a calibração e a validação cruzada foram, respectivamente, 200 J.Lm e 263 um, que são valores menores que a metade do desvio padrão da medida convencional. As correlações encontradas para a calibração e a validação cruzada foram, respectivamente, 82 % e 67 %.

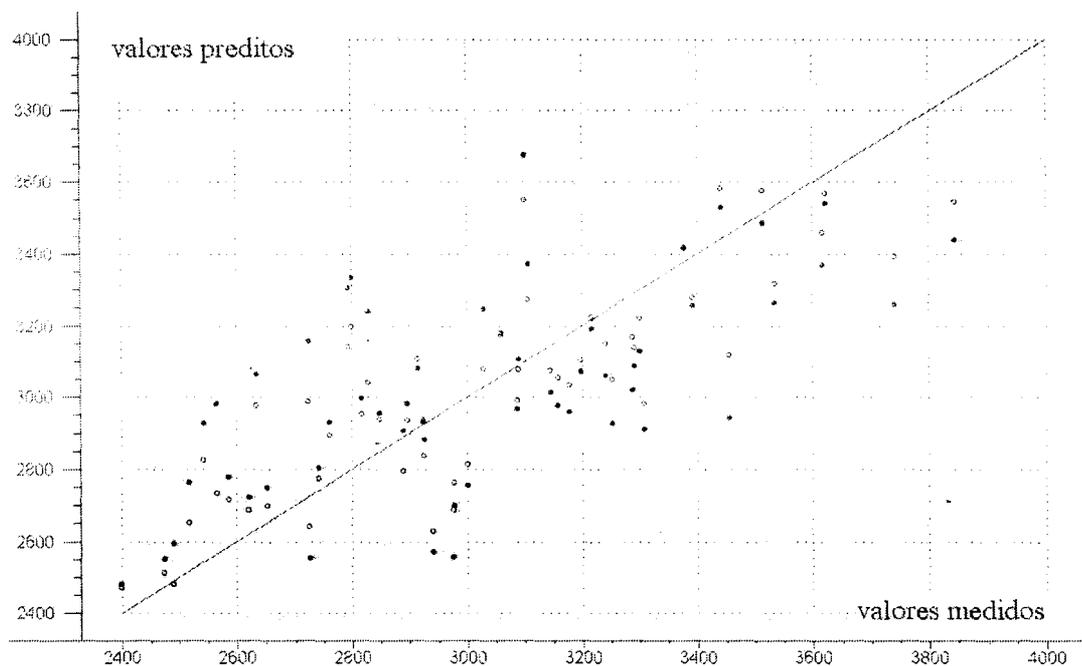


Figura 2. Relação entre média aritmética de valores medidos para comprimento dos traqueídeos de *P. greggii* e os valores preditos pelo modelo. Os círculos azuis foram usados para determinação dos coeficientes de calibração e os vermelhos para a validação cruzada no mesmo conjunto de amostras.

Figure 2. Relationship between arithmetic mean of measured tracheid length of *P. greggii* and the predicted values by the model. The blue circles were used for evaluation of the correlation coefficients for calibration and the red one for cross validation in the same set of samples.

Nisgoski (2005) relatou coeficientes de correlação para a calibração e a validação cruzada de 73 % e 63 % para amostras de *P. taeda* usando a mesma técnica, porém com amostras de madeira maciça. A discrepância entre os resultados deste trabalho e o da literatura pode ser decorrente da diferença de metodologia de amostragem além da diferença de espécies. Neste trabalho foi usada serragem e no trabalho de Nisgoski (2005) foram empregados cubos de madeira, além disso, as análises realizadas nas amostras de serragem compreenderam uma porção de um disco do tronco, já os cubos de madeira continham a variação de uns poucos anéis de crescimento.

A Figura 3 mostra a relação entre os valores medidos convencionalmente e os preditos para a propriedade comprimento dos traqueídeos usando o modelo construído anteriormente para o restante das amostras. As amostras usadas não fizeram parte da construção da curva de calibração.

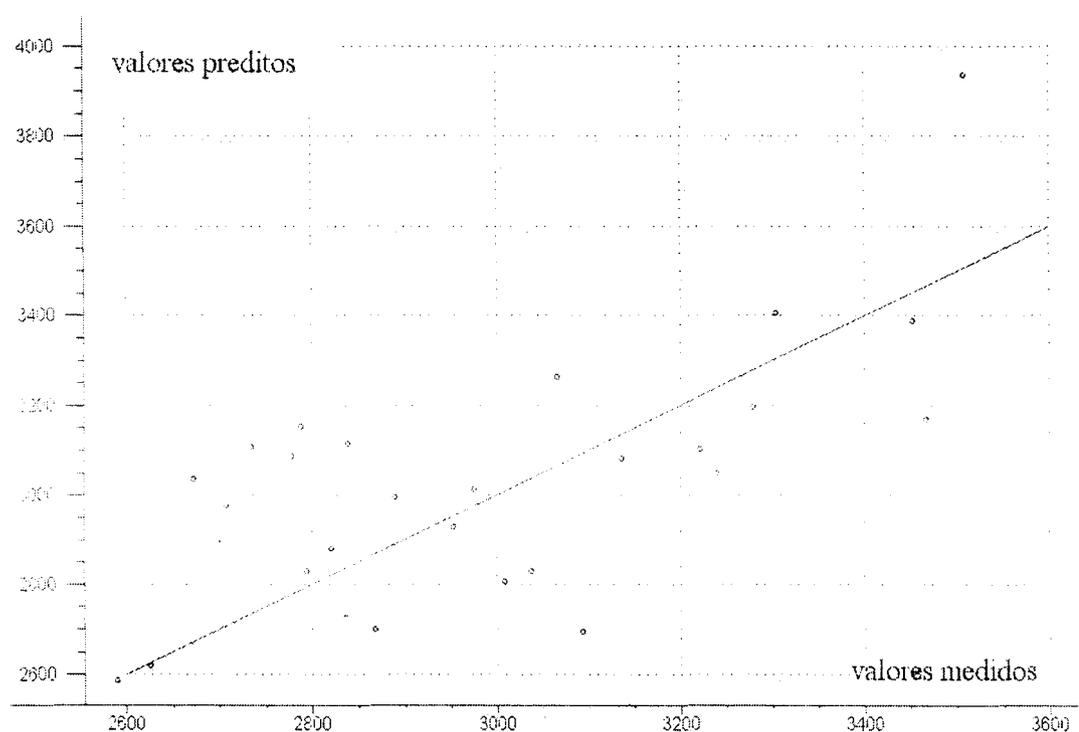


Figura 3. Relação entre os valores medidos convencionalmente e os preditos pelo modelo de calibração usando espectros de NIR de 30 amostras externas para a propriedade comprimento dos traqueídeos.

Figure 3. Relationship between values conventionally measured and predicted by the model using NIR spectra of 30 external samples for tracheid length property.

Na validação externa o valor obtido para o coeficiente de correlação foi de 66 % sendo que as amostras foram diferentes das usadas para a calibração e o erro padrão de predição foi de 226 μm . Apesar do baixo valor para o coeficiente de correlação o erro padrão está muito abaixo da média dos desvios padrão dos valores medidos convencionalmente. Assim, o valor para o RDP encontrado foi de 2,88, o que habilita a técnica para ser usada em seleção em

programas de melhoramento genético florestal. Todavia, se for usado para cálculo do RDP o desvio padrão das médias, este valor cai para 1,59. Isso mostra que as medidas convencionais para comprimento de fibra usando médias de medidas feitas em disco nem sempre são adequadas para distinguir árvores.

A Figura 4 mostra os valores preditos pela regressão PLS comparados com os valores de referência medidos para o diâmetro externo dos traqueídeos. Os erros padrão encontrados para calibração e validação cruzada foram, respectivamente, 2,4 um e 2.8 um. Os valores para os coeficientes de correlação da calibração e validação cruzada foram 0,57 e 0,36, respectivamente. O modelo foi mais bem ajustado que aquele apresentado por Nisgoski (2005) para amostras de madeira maciça que tinham menor variação das dimensões das fibras dentro de uma mesma amostra.

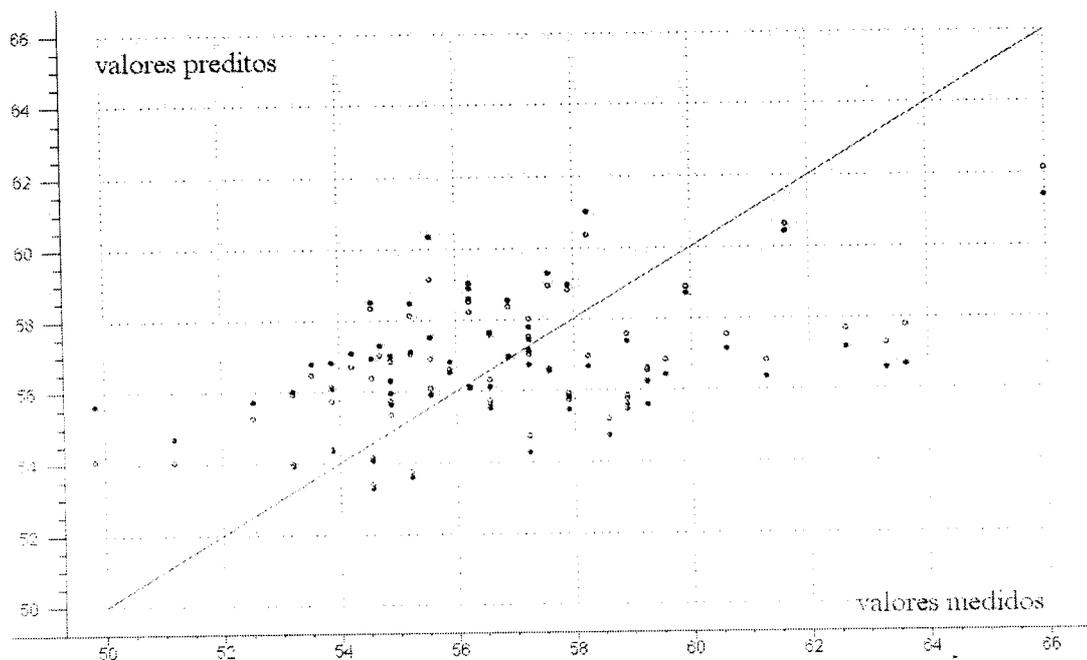


Figura 4. Relação entre média aritmética de valores medidos para diâmetro externo dos traqueídeos de *P. greggii* e os valores preditos pela modelo. Os círculos azuis foram usados para determinação dos coeficientes de calibração e os vermelhos para a validação cruzada no mesmo conjunto de amostras.

Figure 4. Relationship between arithmetic mean of the tracheid external diameters measured for *P. greggii* and the predicted by the model. The blue circles were used for evaluation of the correlation coefficients for calibration and the red one for cross validation in the same set of samples.

A figura 5 mostra a relação entre os valores de diâmetro externo de fibras medidas de forma convencional e os preditos pelo modelo para amostras que não foram usadas para a construção da curva de calibração.

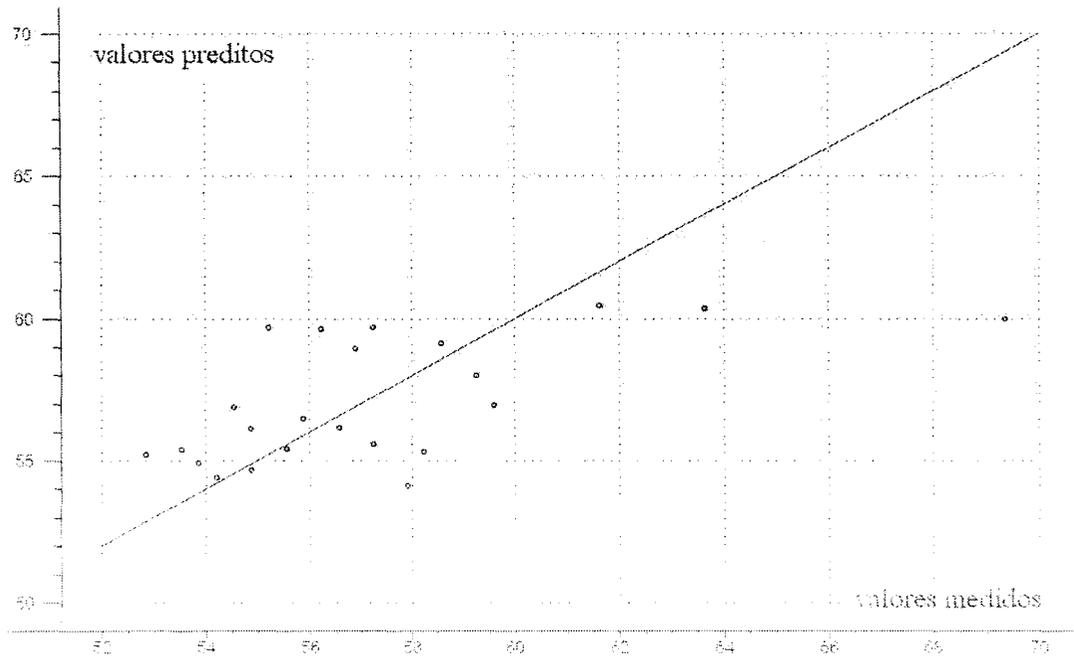


Figura 5. Relação entre os valores medidos convencionalmente e os preditos pelo modelo de calibração usando espectros de NIR de 30 amostras externas para a propriedade diâmetro externo dos traqueídeos.

Figure 5. Relationship between values conventionally measured and predicted by the model using NIR spectra of 30 external samples for tracheid external diameter.

O coeficiente de correlação na validação externa foi baixo e por volta de 0,60. Entretanto, o erro padrão de predição (SEP) encontrado foi de 3 um que é menos que a metade da média dos desvios padrão das médias obtidas a partir das medidas convencionais. O desvio da razão de desempenho para este caso foi de 25, indicando que a nova metodologia pode ser usada para seleção em programas de melhoramento genético florestais. Da mesma forma que para o caso anterior, se for usado o desvio padrão das médias o valor do RDP cai para 1,33, o que habilita metodologia apenas para uma seleção preliminar.

6. CONCLUSÃO

A variação das propriedades anatômicas dentro de uma mesma árvore é muito maior que a variação entre as árvores usadas neste estudo.

Ao avaliar as propriedades anatômicas da madeira de *Pinus greggii*, conseguiu-se uma correlação baixa para as propriedades de comprimento e diâmetro externo dos traqueídeos, já para as duas outras propriedades não houve uma boa correlação.

A baixa correlação pode ser devida a uma amostragem insuficiente, ou pela morfologia da amostra usada na forma de serragem. Outro aspecto a ser observado é uma grande variação natural das dimensões das fibras dentro de uma mesma amostra de madeira, o que permite através do cálculo do desvio da razão de desempenho (ROP), que a técnica seja indicada para seleção preliminar em programas de melhoramento genético para a indústria de base florestal.

Este método é econômico e prático, já que não exige preparo elaborado de amostras e nem utiliza reagentes químicos, além de independer da experiência do operador. As análises das propriedades anatômicas da madeira usando-se métodos quimiométricos são realizadas em menos de dois minutos, já na metodologia convencional precisa-se de cerca de um dia. Assim a técnica pode ser usada em escala industrial como uma alternativa a métodos mais precisos, porém muito demorados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRICHELO, L. E. G.; FOELKEL, C. E. B. Processo nítrico-acético para maceração de madeira. *Silvicultura*. São Paulo, v. 8. n.28. p. 732-733, 1983.

BRITT, K. W. Paper testing. In: BRITT, K. W. (Ed.). **Handbook of pulp and paper technology**, 2nd. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1970. 723 p.

CHANG, H.-M.; KADLÁ, J. F.; LI, B.; SEDEROFF, R. **Exploiting genetic variation of fiber components and morphology in juvenile loblolly pine**. [Raleigh]: North Carolina State University, 2005. Disponível em: <http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=875686>. Acesso em: 4 abr. 2007.

ESBENSEN, K. H. **Multivariate data analysis - in practice: an introduction to multivariate data analysis and experimental design** Oslo: CAMO, 2002. 598 p. With contributions from: Dominique Guyot, Frank Westad, Lars P. Hou111011er.

HAIJKSSON, f. B.; BERGQVIST, O., BERGSTEN, C.; SJÜSTRÜM, M.; EDLUND, C. Prediction of basic wood properties for Norway spruce. Interpretation of near infrared spectroscopy data using partial least squares regression. **Wood Science and Technology**, v. 35, p. 475-485, 2001.

FONES, P. D.; SCHIMLECK, L. R.; PETER, G. F.; DANIELS, R. F.; CLARK, U. A. Nondestructive estimation of *Pinus taeda* L tracheid morphological characteristics of sites in Georgia. **Wood Science and Technology**, v. 39, p. 529-545, 2005b.

- JÜNES, P. D.; SCHIMLECK, L. R.; PETER, G. F.; DANIELS, R. F.; CLARK III, A. Nondestructive estimation of *Pinus taeda* L. wood properties for samples from a wide range of sites in Georgia. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 35, p. 85-92. 2005a.
- KELLÜGG, R. M.; THYKESÜN, E.; WARREN, W. G. Influence of wood and fiber properties on kraft converting-paper quality. **TAPPI**, v. 58, n. 12, p. 113-116, 1975.
- MARKLUND, A.; HAUSSÜN, J. B. Multivariate data analysis based on orthogonal signal correction and near infrared spectroscopy. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 14, n. 2, p. 140-148, 1999.
- MARTENS, H.; NAES, T. **Multivariate calibration**. Chichester: J. Wiley, 2002. 419 p.
- NAES, T.; ISAKSSON, T.; FEARN, T.; DAVIES, T. **A user-friendly guide to multivariate calibration and classification**. Chichester: NIR Publications, 2004. 344 p.
- NIGOSKI, S. (2005) Espectroscopia de Infravermelho Próximo no Estudo de Características da Madeira e do Papel de *Pinus taeda* L. Curitiba-PR. Tese de doutorado, Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná.
- POT, D.; CHANTRE, G.; ROZENBERG, P.; RODRIGUES, J. C.; JONES, G. L.; PEREIRA, H.; HANNRUP, B.; CAHALAN, C.; PLOMION, C. Genetic control of pulp and timber properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). **Annales des Sciences Forestières**, v. 59, p. 563-575, 2002.
- SCHIMLECK, L. R.; EVANS, R. Estimation of *Pinus radiata* D. Don tracheid morphological characteristics by near infrared spectroscopy. **Holzforstung**, v. 58, p. 66-73, Jan. 2004.
- SCHIMLECK, L. R.; JONES, P. D.; PETER, G. F.; DANIELS, R. F.; CLARK III, A. Nondestructive estimation of tracheid length from sections of radial wood strips by near infrared spectroscopy. **Holzforstung**, v. 58, p. 375-381, 2004.
- SCHIMLECK, L. R.; MORA, C.; DANIELS, R. F. Estimation of tracheid morphological characteristics of green *Pinus taeda* L. radial strips by near infrared spectroscopy. **Wood and Fiber Science**, v. 36, n. 4, p. 527-535, 2003.
- SCHIMLECK, L. R.; EVANS, R. Estimation of microfibril angle of increment cores by near infrared spectroscopy. **IAWA Journal**, v. 23, p. 225-234, 2002a.
- SCHIMLECK, L. R.; EVANS, R. Estimation of wood stiffness of increment cores by near infrared spectroscopy: the development and application of calibrations based on selected cores. **IAWA Journal**, v. 23, p. 217-224, 2002b.
- SCHIMLECK, L. R.; EVANS, R.; JÜNES, P. D.; DANIELS, R. F.; PETER, G. F.; CLARK III, A. Estimation of microfibril angle and stiffness by near infrared spectroscopy using sample sets having limited wood density variation. **IAWA Journal**, v. 26, n. 2, p. 175-187. 2005a.

SCHMILECK, L. R.; STÜRZENBECHER, R.; MORA, C., JONES, P. D.; DANIELS, R. F. Comparison of *Pinus taeda* L. wood property calibrations based on NIR spectra from the radial-longitudinal and radial-transverse faces of wood strips. **Holzforschung**, v. 59, p. 214-218, 2005b.

SO, C. L., VIA, B. K.; GROOM, L. H.; SCHMILECK, L. R.; SHUPE, T. F.; KELLEY, S. S.; DANIELS, T. G. Near infrared spectroscopy in the forest products industry. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 3, p. 6-16, 2004.

SYKES, R.; LI, B.; RODRIGUEZ, O., GOLDFARB, B.; KADIA, I.; CHANG, H.-M. Prediction of loblolly pine wood properties using transmittance near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 35, p. 2423-2431, 2005.

THOMAS, B. B. Pulp properties. In: BRITT, K. W. (Ed.). **Handbook of pulp and paper technology**. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1970. 723 p.

TSUCHIKAWA, S. A review of recent near infrared research for wood and paper. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 42, p. 43-71, 2007.

VIA, B. K.; SHUPE, T. F.; STINE, M.; SO, C. L.; GROOM, L. H. Tracheid length prediction in *Pinus palustris* by means of near infrared spectroscopy: the influence of age. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 63, p. 231-236, 2005.

VIA, B. K.; STINE, M.; SHUPE, T. F.; SO, C. L.; GROOM, L. Genetic improvement of fiber length and coarseness based on paper product performance and material variability. A review. **IAWA Journal**, v. 25, n. 4, p. 401-414, 2004.

WOLD, S.; ANTTI, H.; LINDGREN, F.; ÖHMAN, J. Orthogonal signal correction of near-infrared spectra. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 44, p. 175-185, 1998.