



## Colorimetria aplicada à ciência e tecnologia da madeira

Eraldo Antonio Bonfatti Júnior<sup>1\*</sup>, Elaine Cristina Lengowski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná, Av. Pref. Lothário Meissner, 632, Jardim Botânico, Campus III, CEP 80210-170, Curitiba, PR, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, Boa Esperança, CEP 78060-900, Cuiabá, MT, Brasil

\*Autor correspondente:  
[bonfattieraldo@gmail.com](mailto:bonfattieraldo@gmail.com)

### Termos para indexação:

Propriedades da madeira  
Produtos florestais  
Cor

### Index terms:

Properties of wood  
Forest products  
Color

### Histórico do artigo:

Received in 27/12/2016  
Accepted in 09/10/2018  
Published in 28/12/2018

doi: 10.4336/2018.pfb.38e201601394



**Resumo** - A primeira característica da madeira perceptível à visão humana é a cor, com possibilidade de indicar seu uso, além de correlacionar-se com as exigências do consumidor final. Por ser um parâmetro de difícil determinação, devido à sua subjetividade, foram desenvolvidos métodos para determinação matemática da cor, como o método comparativo de Munsell e o método quantitativo, denominado colorimetria. Ao longo do tempo, o segundo método se consolidou devido à sua alta precisão. O método colorimétrico mais usado na ciência da madeira é o sistema CIELAB, constituído por três eixos, a coordenada L\*, que representa a luminosidade ou claridade, a coordenada a\*, que representa o eixo vermelho-verde, e a coordenada b\*, que representa o eixo amarelo-azul. Além da classificação colorimétrica da madeira, a colorimetria é eficiente para determinação de algumas propriedades da madeira, do efeito da termorreificação e da ação de agentes biodeterioradores e do intemperismo na madeira. O principal objetivo desse trabalho foi evidenciar a importância e a aplicabilidade da colorimetria como técnica aplicada à ciência e tecnologia da madeira.

### Colorimetry applied to wood science and technology

**Abstract** - The first wood characteristic perceivable by human vision is the color, with the possibility of indicating its use, in addition to correlating with the demands of the final consumer. The color is a hard parameter to determine due to its subjective nature; therefore methods for its mathematical determination were created, as the comparative method of Munsell and the quantitative method called colorimetry. Over time the second was consolidated because of its high precision. The most commonly used colorimetric method in wood science is the CIELAB system, consisting of three axes, the coordinate L\* representing the luminosity or clarity, the coordinate a\* representing the red-green axis and the coordinate b\* representing the yellow-blue axis. Besides the colorimetric classification of the wood, the colorimetry is efficient in the determination of some properties of the wood, in the evaluation of the effect of the thermal-treatment, of the biodegradant agents' action and the weathering on the wood. The main objective of this work was to highlight the importance and applicability of colorimetry as a technique applied to wood science and technology.

### Introdução

A cor está incluída dentre as principais propriedades da madeira percebidas pelos sentidos humanos, e tem grande importância para identificação e classificação das madeiras. A cor é um aspecto físico e sua percepção resulta

da interpretação pelo olho-cérebro de uma sensação dos raios luminosos, em um intervalo que se localiza entre 400 nm e 700 nm no espectro eletromagnético (Camargos & Gonzalez, 2001). Na Tabela 1 são apresentadas as faixas de frequência e comprimento de onda do alcance das cores principais.

**Tabela 1.** Frequência e comprimento de onda dos domínios das cores principais.**Table 1.** Frequency and wavelength of main color domains.

Cor	Frequência (THz)	Comprimento de onda (nm)
Violeta	668 - 789	380 - 450
Azul	606 - 668	450 - 495
Verde	526 - 606	495 - 570
Amarelo	508 - 526	570 - 590
Laranja	484 - 508	590 - 620
Vermelho	400 - 484	620 - 750

Fonte: Bruno & Svoronos (2005).

Para que exista a cor, é necessária a presença de três variáveis importantes: da fonte luminosa, do objeto e do observador. Entretanto, a atribuição de uma determinada cor exclusivamente pela análise visual de um objeto é subjetiva, uma vez que pode haver diferenças de acordo com o observador e a fonte de luminosidade utilizada. Visando contornar o aspecto subjetivo no processo de determinação da cor, foram desenvolvidos métodos comparativos e quantitativos de medição de cores (Stangerlin et al., 2013).

Ao incidir sobre um objeto, uma parte da radiação eletromagnética é absorvida e outra refletida, sendo a radiação refletida dentro da faixa visível do espectro eletromagnético que caracterizará a cor do material (Lavisci et al., 1989; Petter & Gliese, 2000; Mori et al., 2005).

Mori et al. (2005) destacam que a cor é o primeiro contato visual, podendo indicar de forma imediata a utilização prática do material. É um dos atributos estéticos mais importantes para a madeira, sendo tão importante quanto suas outras propriedades físicas e mecânicas. Pode ser influenciada por vários fatores, tais como estrutura anatômica, composição química, método de derrubada, posição da amostra na árvore, condições do meio ambiente, altura, diâmetro e idade da árvore, além de fatores genéticos inerentes a cada espécie (Gonzalez et al., 2005). Além disso, a cor possibilita a identificação e indicação de usos da madeira de diferentes espécies, principalmente quando analisada em conjunto com aspectos de textura e desenho (Camargos & Gonzalez, 2001).

De acordo com International Association of Wood Anatomy (1989), as cores das madeiras podem ser classificadas nos seguintes grupos: esbranquiçada, amarelada, avermelhada, acastanhada, parda, enegrecida

e arroxeadas. Outras cores, eventualmente, podem ser observadas, como verde ou aspecto rajado (Zenid, 2007).

A análise final da cor de qualquer produto lhe garante um padrão de qualidade exigido no mercado mundial. Por esta razão, essa propriedade deve ser incorporada ao planejamento, visando à caracterização tecnológica da madeira para atender aos usos mais nobres desse material (Janin et al., 2001; Mori et al., 2004), como a produção de móveis, pisos, estruturas de madeira, construção naval e marcenaria de alto padrão.

Para evitar a confusão atribuída à diversidade de sensações psicofísicas ao se determinar as cores de objetos, a colorimetria emprega variáveis numéricas para as interações provocadas pela luz numa superfície (Commission Internationale de L'Éclairage, 2004). Este método descreve cada elemento da composição de uma cor numericamente, por meio de um aparelho apropriado (Mori et al., 2005).

Os colorímetros já foram os principais aparelhos para análise numérica da cor, por serem portáteis, de fácil manuseio, apresentarem baixo custo de fabricação e permitirem a obtenção direta dos valores das medidas dos componentes cromáticos. Porém, estes instrumentos são incapazes de gerar dados de refletância espectral, limitando a precisão dos resultados (Gonzalez & Macedo, 2003).

Atualmente, o dispositivo de mensuração de cor mais utilizado é o espectrofotômetro, constituído por uma unidade de base, um instrumento de mão e um cabo de fibra ótica conectado entre eles, que passa as informações para um computador. A partir dos dados coletados, é possível construir a curva de refletância de uma amostra em função do comprimento de onda (Mori et al., 2005).

Os dois instrumentos se diferenciam, pelo fato de os colorímetros possuírem uma série de filtros e fotodetectores para quantificar a cor dos materiais expostos à luz, enquanto que os espectrofotômetros iluminam a superfície do objeto a ser medido e empregam um sistema de dispersão da radiação, normalmente baseado em grades de difração ou prismas, que permitem medir a radiação refletida com exatidão e precisão muito maior que em colorímetros (Rappold & Smith, 2004).

Este trabalho teve como objetivo analisar a literatura disponível sobre a utilização da análise colorimétrica nas pesquisas em tecnologia da madeira e seus derivados, buscando destacar a aplicabilidade desta técnica.

## Métodos para determinação de cor

Para determinação da cor existem dois métodos: o comparativo e o quantitativo. O método comparativo, ou sistema de ordenação de cores, mais conhecido é o sistema de Munsell, que tem como base um atlas de cores que serve para selecionar, comparar e medir a coloração de objetos. O método quantitativo mais utilizado é a ciência de medição de cor, ou seja, a colorimetria (González et al., 2001).

O sistema criado pelo artista Albert Henry Munsell, em 1905, determina a cor por codificação alfa numérica em uma matriz tridimensional de cores, tendo como variáveis a matiz, o valor (luminosidade) e o croma (saturação). Baseia-se numa tabela de amostras pintadas de igual percepção visual entre um intervalo de amostra e sua adjacente. As amostras em cada página são de igual matiz, variando apenas a claridade e o croma. Os matizes são indicados pelos primeiros caracteres do código, variando numericamente de 0 a 10, acompanhado de uma ou duas letras. À medida que o número cresce, a tonalidade aumenta. As cores representadas na matriz do sistema Munsell e suas respectivas representações são: amarelo (Y); vermelho (R); verde (G); azul (B) e púrpuro (P). Para indicação de matizes intermediárias, podem ser utilizadas combinações destas cores, como por exemplo YR, expressando o amarelo avermelhado (González et al., 2001).

Por definição, colorimetria é a técnica e a ciência que, com auxílio de modelos matemáticos, descreve, quantifica e simula a percepção da cor pelo olho humano (Lavischi et al., 1989; Petter & Gliese, 2000; Mori et al., 2005).

A técnica que analisa de forma quantitativa a cor mais conhecida é a do sistema CIELAB, e se baseia no uso de luz e cor. São métodos que foram desenvolvidos para expressar numericamente as cores, sendo que o de mensuração cromática ( $L^*a^*b^*$ ), descrito em 1976, considera três eixos espaciais perpendiculares entre si, cujos pontos fornecem diferenças numéricas mais uniformes em relação às diferenças visuais (Comission Internationale de L'Eclairage, 2004; Leão et al., 2005). A coordenada  $L^*$  representa a luminosidade ou claridade, a qual varia de zero (preto) a 100 (branco), enquanto que,  $a^*$  e  $b^*$  representam as coordenadas cromáticas, ambas variando entre - 60 e + 60. A saturação ou cromaticidade, representada pela variável C, é a distância

radial entre a localização da cor e o centro do espaço, e está diretamente ligada à concentração do pigmento. A tonalidade ou o ângulo de tinta ( $h^*$ ) define a cor em si. No sistema CIELAB, os sinais positivos e negativos significam: +  $a^*$  aumento na vermelha, -  $a^*$  aumento na verde, +  $b^*$  aumento na amarela e -  $b^*$  aumento na azul, representando a tonalidade (Comission Internationale de L'Eclairage, 2004).

A direção da diferença de cor entre uma amostra e a referência no espaço tridimensional é descrita pela magnitude e o sinal algébrico das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  (Equações 1 a 3) (Camargos & González, 2001).

$$\Delta L^* = \Delta L_a^* - \Delta L_b^* \quad (1)$$

$$\Delta a^* = \Delta a_a^* - \Delta a_b^* \quad (2)$$

$$\Delta b^* = \Delta b_a^* - \Delta b_b^* \quad (3)$$

Em que:  $L_a^*$ ,  $a_a^*$  e  $b_a^*$  são referentes à amostra em ensaio, e  $L_b^*$ ,  $a_b^*$  e  $b_b^*$  são referentes à amostra padrão.

Logo, resultados de  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$  positivos indicam que a amostra analisada é mais clara, avermelhada e amarelada, respectivamente, do que a amostra padrão. Enquanto que os resultados negativos desses parâmetros significam que a amostra é mais escura, esverdeada e azulada, respectivamente, do que o padrão (Camargos & González, 2001).

A variação total da cor da madeira é determinada pela Equação 4.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

Em que:  $\Delta E^*$  corresponde à variação total da cor da madeira após o evento de mudança de cor.

A variação de cada coordenada é determinada pela diferença entre o valor médio da coordenada da madeira original (controle) e o valor médio da coordenada da madeira submetida a algum tipo de variação colorimétrica (Sundqvist & Morén, 2002; American Society for Testing Materials, 2009; González-Pena & Hale, 2009; Dubey et al., 2011).

Para avaliar a variação total da cor ( $\Delta E^*$ ), utilizam-se as referências propostas por Hikita et al. (2001), é de escalas de percepção, sendo apresentada uma classificação da variação total da cor ( $\Delta E^*$ ) em madeiras (Tabela 2).

**Tabela 2.** Classificação da variação total da cor ( $\Delta E^*$ ) de madeiras.

**Table 2.** Classification of total color variation ( $\Delta E^*$ ) of wood.

Variação da cor ( $\Delta E^*$ )	Classificação
0,0 – 0,5	Desprezível
0,5 – 1,5	Ligeiramente perceptível
1,5 – 3,0	Notável
3,0 – 6,0	Apreciável
6,0 – 12,0	Muito apreciável

Fonte: Hikita et al. (2001).

A técnica para a determinação da cor da madeira por meio da colorimetria quantitativa mostra-se precisa e eficaz. O sistema CIELAB de 1976, que determina os parâmetros colorimétricos luminosidade ou brilho, a tonalidade ou matiz e a saturação ou cromaticidade, se mostra eficiente para a determinação da cor de diversas madeiras (Autran & González, 2006). Para González et al. (2001), o sistema CIELAB fornece um espaço mais uniforme da distribuição das cores, possibilitando uma melhor caracterização da cor do material. Assim, o uso de coordenadas cromáticas permite separar as madeiras em grupos de tonalidade, facilitando a aquisição e o uso específico desta (Mori et al., 2004).

Vetter et al. (1990), ao avaliarem e compararem as cores de 98 espécies amazônicas, utilizando os métodos de Munsell e o colorimétrico, concluíram que através do segundo pode-se calcular precisamente as diferenças existentes entre as cores. De acordo com González & Macedo (2003), para pesquisa científica e para o controle de qualidade industrial são necessários métodos de determinação de cor mais precisos e eficientes. Diante disso, a colorimetria se sobressai ao método de Munsell.

### Aplicações da colorimetria na madeira

#### Caracterização colorimétrica da madeira

Camargos & González (2001) mediram a coloração de 350 espécies brasileiras de origem tropical e constataram que o ângulo de tinta ( $h^*$ ) no sistema CIELAB, de todas as madeiras estudadas, se enquadrava de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , ou seja, no primeiro quadrante. Com os resultados da colorimetria dessas espécies foi criada uma tabela pelo método de cluster com 25 grupos, com o objetivo de ter uma classificação de cores para facilitar a comercialização. As

variáveis utilizadas nesse agrupamento foram  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , e  $h^*$ . Na Tabela 3 são apresentados os 25 grupos de cores e seus respectivos intervalos das variáveis cromáticas.

**Tabela 3.** Grupos de cores de madeira obtidos por agrupamento de cluster a partir da análise colorimétrica de 350 espécies brasileiras.

**Table 3.** Color groups of wood obtained by cluster from colorimetric analysis of 350 Brazilian species.

Grupo cluster	COR	Intervalos das variáveis cromáticas				
		$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^*$
01	Amarelo-oliva	64-64	06-06	46-46	47-47	82-82
02	Branco	69-80	04-08	19-27	21-28	71-79
03	Marrom-escuro	38-51	06-11	10-16	12-19	50-61
04	Rosa	55-68	11-27	18-27	23-30	53-64
05	Amarelo-claro	65-76	07-11	26-37	28-38	71-77
06	Roxo	36-39	12-07	03-07	12-16	14-29
07	Preto-avermelhado	28-35	04-08	03-06	05-10	35-44
08	Marrom-arroxado	29-44	08-11	08-12	11-16	34-52
09	Oliva	40-55	05-10	12-22	13-24	60-71
10	Oliva-claro	70-73	01-04	22-26	22-27	81-87
11	Branco-acinzentado	74-86	03-06	16-25	17-26	74-83
12	Marrom-escuro	35-51	11-16	13-18	17-23	43-55
13	Marrom-oliva	48-71	09-13	22-30	25-32	64-72
14	Preto	26-36	01-06	02-08	03-09	49-64
15	Vermelho-escuro	35-38	17-21	13-15	21-26	33-38
16	Cinza-rosado	61-76	04-08	13-20	14-21	67-76
17	Vermelho	37-52	17-24	16-23	24-31	39-52
18	Oliva-amarelado	51-69	06-09	20-27	21-28	69-76
19	Laranja-amarelado	53-54	24-27	34-38	42-46	54-55
20	Amarelo-alaranjado	49-66	12-19	31-36	33-40	61-67
21	Marrom-claro	45-61	10-13	16-25	19-28	54-66
22	Rosa-acinzentado	55-71	07-11	14-22	16-25	59-68
23	Amarelo-amarronzado	45-61	12-19	23-30	27-34	52-65
24	Amarelo	73-76	04-07	38-42	39-42	81-84
25	Marrom-avermelhado	39-57	13-17	18-23	23-29	50-58

$L^*$ : luminosidade;  $a^*$ : coordenada cromática (verde - vermelho); coordenada cromática (azul - amarelo);  $C^*$ : saturação da cor;  $h^*$ : ângulo de tinta. Fonte: Camargos & González (2001).

Autran & González (2006) caracterizaram a madeira de *Brosimum rubescens* como vermelho-amarronzado. A espécie apresenta maior quantidade de pigmento vermelho na face radial, permitindo que durante o desdobro seja possível classificar o tipo de madeira pela cor. No entanto, a madeira de *Hevea brasiliensis* apresentou coloração amarelada, sem diferenças significativas de coloração entre cortes na direção



radial e tangencial. De acordo com Barros et al. (2014), a madeira de *Protium puncticulatum* é caracterizada pela pigmentação vermelha (coordenada a\*), com influência da cor amarela (coordenada b\*) e tendência ao clareamento pelo maior valor de claridade (L\*), e a madeira de *Cariniana micrantha* também é caracterizada pela pigmentação vermelha, com influência nos valores de ângulo de tinta (h\*) e de saturação (C), evidenciando a diminuição da coloração. A madeira de *Caryocarpus glabrum* é caracterizada pela pigmentação amarela, com nuances de pigmentos avermelhados vivos na direção tangencial, indicando a variabilidade de respostas por diferentes espécies.

Gonçalez et al. (2006) concluíram que o parâmetro L\* é maior para as madeiras de *Eucalyptus grandis* do que para as de *E. cloeziana*. Em ambas as espécies a claridade na face radial é superior à da face tangencial, isto é, quando se pretende obter madeiras mais claras considerando essas duas espécies, recomenda-se o desdobro da tora no sentido radial em detrimento ao sentido tangencial.

Segundo Atayde et al. (2011), as madeiras de *Brusium* sp. apresentam diferenças de cor entre os cortes anatômicos (transversal, tangencial e radial) sendo caracterizadas pela coloração vermelha (alto valor na coordenada a\*). Para essa espécie, a maneira como a tora é desdobrada pode gerar madeiras mais avermelhadas (corte tangencial) ou com tons amarelo-avermelhados (corte radial), permitindo a formação de lotes de madeira com tonalidades mais homogêneas. Paula et al. (2016b), utilizando a colorimetria para caracterizar a madeira de *Dipteryx odorata*, concluíram que a referida espécie apresenta coloração amarelo-amarronzada, com grande uniformidade entre os sentidos tangenciais e radiais.

Buscando diferenças colorimétricas entre lenhos juvenil e adulto de eucalipto, Delucis et al. (2015) verificaram que a coordenada L\* não diferiu estatisticamente para o lenho de *E. tereticornis*, porém as madeiras de *Corymbia citriodora* e *E. paniculata* apresentaram poucas diferenças colorimétricas entre lenhos juvenil e adulto, pois houve somente diferença significativa quando considerada a coordenada L\*. Ainda nessa comparação entre lenhos, a madeira de *E. botryoides* apresentou a maior distinção, pois as coordenadas b\* e L\* e o parâmetro C\* denotaram diferenças significativas.

Para madeiras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, Gonçalez et al. (2009) observaram que a colorimetria é

sensível à influência do sítio, bem como às propriedades físicas e mecânicas. Essa influência foi perceptível tanto na face radial quanto na tangencial.

Diferenças anatômicas, como por exemplo a maior exposição superficial de parênquima radial, largura dos raios, variações no arranjo de componentes celulares, orientação da grã bem como o conteúdo de substâncias de reserva e a disposição dos anéis de crescimento, podem ser responsáveis pelas diferenças colorimétricas encontradas em cada plano de corte (Nishino et al., 2000). Na seção transversal, a presença dos anéis de crescimento aumenta o nível de cinza, fazendo com que haja diminuição da luminosidade (L\*) e dos matizes responsáveis pelas coordenadas a\* e b\*, tornando a madeira mais escura (Gonçalez et al., 2001). A coloração mais clara na seção radial é decorrente da alta concentração de produtos químicos descoloridos nas células de parênquima dos raios (Luostarinen & Möttönen, 2009).

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios dos parâmetros colorimétricos de 20 espécies de madeiras brasileiras e sua respectiva cor, de acordo com a tabela de cores de madeira proposta por Camargos & Gonçalez (2001).

#### *Propriedades da madeira*

Buscando caracterizar as madeiras de *Pinus caribaea* e *E. grandis* por meio da colorimetria, Amorim et al. (2013) concluíram que a propriedade melhor estimada por essa técnica foi a densidade, seguida pelo módulo de elasticidade e módulo de ruptura no ensaio de flexão estática. Ao comparar as faces radial e tangencial da madeira, a primeira é a que melhor prevê os valores de densidade, quando considerados os parâmetros luminosidade, pigmentação vermelha e ângulo de tinta. No entanto, esses autores não encontraram correlação significativa entre a retratibilidade volumétrica e os parâmetros colorimétricos.

Ao pesquisar 26 espécies de folhosas naturais do Japão, Nishino et al. (2000) encontraram correlação positiva entre densidade e colorimetria para cortes na seção transversal. Porém, no corte tangencial os autores observaram que a coordenada L\* é diretamente influenciada pela variação da massa específica.

Garcia et al. (2014a) encontraram correlação entre densidade básica e colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*. Esses autores concluíram que as madeiras mais densas, para as espécies do primeiro

gênero, são mais escuras (menor L\*) e apresentam maior coloração avermelhada (coordenada a\*) e amarelada (coordenada b\*). Contudo, isso não se aplica a *Corymbia citriodora*, cuja madeira é densa, de cor clara e com pouca coloração avermelhada.

**Tabela 4.** Valores médios dos parâmetros colorimétricos e classificação da cor de vinte espécies de madeiras brasileiras.

**Table 4.** Mean values of the colorimetric parameters and color classification of twenty Brazilian wood species.

Espécie	L*	a*	b*	C	h*	Cor
<i>Qualea brevipedicellata</i>	65,03	10,69	25,46	27,65	67,32	Marrom oliva
<i>Goupia glabra</i>	59,05	9,28	27,07	28,68	71,12	Oliva amarelado
<i>Mezilaurus itauba</i>	52,03	8,70	27,19	28,61	71,93	Oliva amarelado
<i>Erisma uncinatum</i>	55,05	11,90	22,29	25,34	62,03	Rosa acinzentado
<i>Hymenolobium petraeum</i>	62,45	13,84	26,18	29,64	62,17	Rosa
<i>Manilkara huberi</i>	47,45	14,69	19,85	24,72	53,50	Marrom avermelhado
<i>Apuleia leiocarpa</i>	61,92	11,34	30,96	33,00	69,83	Marrom oliva
<i>Dipteryx odorata</i>	51,58	12,10	23,24	26,22	62,42	Marrom claro
<i>Simarouba amara</i>	81,68	4,12	24,37	24,72	80,43	Branco acinzentado
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	57,96	10,58	23,31	25,65	65,47	Marrom claro
<i>Couratari oblongifolia</i>	74,17	4,23	22,50	22,91	79,44	Branco acinzentado
<i>Hymenaea courbaril</i>	51,74	14,03	24,37	28,16	59,98	Amarelo amarronzado
<i>Dinizia excelsa</i>	50,40	16,06	24,47	29,29	56,75	Amarelo amarronzado
<i>Handroanthus serratifolius</i>	49,08	9,42	25,50	27,26	69,45	Marrom oliva
<i>Pouteria egregia</i>	59,33	14,53	26,40	30,14	61,18	Rosa
<i>Tetragastris altissima</i>	53,81	16,94	27,42	32,23	58,30	Amarelo amarronzado
<i>Vochysia maxima</i>	57,28	18,34	25,70	31,59	54,52	Rosa
<i>Diploptropis purpurea</i>	45,61	10,05	21,85	24,07	65,26	Oliva
<i>Euplassa pinnata</i>	56,14	15,26	24,20	28,62	57,79	Amarelo amarronzado
<i>Lonchocarpus cultratus</i>	65,23	4,89	21,82	22,40	77,86	Branco acinzentado

L\*: luminosidade; a\*: coordenada cromática (verde - vermelho); coordenada cromática (azul - amarelo); C\*: saturação da cor; h\*: ângulo de tinta. Fonte: Ribeiro (2017).

Entre colorimetria e densidade básica de *Tectona grandis*, Garcia & Marinonio (2016) observaram que na seção radial as madeiras de cerne com maior densidade apresentam mais pigmento amarelo, enquanto que na seção tangencial a madeira é mais escura e com menos pigmento amarelo. O alburno de maior densidade é mais escuro e apresenta mais pigmento vermelho, tanto na seção radial quanto na tangencial. Os autores também mencionam que, considerando a análise química, quanto maior o teor de extrativos, mais escura é a madeira e maior é a pigmentação vermelha.

Os extrativos são componentes que aparecem em pequenas quantidades e tem estrutura química de baixo peso molecular, todavia têm grande importância na determinação da cor da madeira. De acordo com Tsoumis (1991) e Rappold & Smith (2004), os principais extrativos responsáveis pela mudança de cor da madeira são quinonas, flavonóides, lignanas e taninos.

Mori et al. (2004) verificaram que as características tecnológicas da madeira de eucalipto e a quantidade de extrativos (especialmente polifenóis), tem alta correlação com a cor da madeira. Hiller et al. (1972) descreveram que o teor de extrativos está correlacionado com a coloração avermelhada (coordenada a\*) e com a luminosidade (coordenada L\*). Do ponto de vista anatômico, Burger & Richter (1991) descreveram forte relação entre a cor da madeira com a espessura e orientação das fibras, quantidade e disposição do parênquima axial, largura do raio, diâmetro, distribuição e frequência dos poros.

#### Termorretificação da madeira

Desenvolvido na década de 1940 (Borges & Quirino, 2004), o processo de termorretificação é um tratamento físico-químico em que a madeira é submetida à aplicação de calor entre 160 e 230 °C, sem ou com o mínimo de oxigênio, para evitar a reação de combustão (Kocaefer et al., 2008; Esteves & Pereira, 2009). Além da temperatura, o tempo, a pressão, o pH e a umidade da madeira também são variáveis operacionais desse processo (Esteves & Pereira, 2009).

Durante essa degradação controlada da madeira, as hemiceluloses são degradadas em temperaturas menores que a celulose, devido às suas características amorfas e baixa estabilidade térmica (Yildiz et al., 2006; Brito et al., 2008; Severo et al., 2012), os extrativos são volatilizados ou degradados (Esteves et al., 2011; Moura & Brito, 2011), e a celulose e a lignina, substâncias

de maior estabilidade térmica na madeira, são menos afetadas (Yildiz et al., 2006; Tumen et al., 2010).

A termorretificação é recomendada para melhorar a estabilidade dimensional, comportamento higroscópico, resistência à biodeterioração da madeira e, em casos de madeiras de baixa densidade, aumento da dureza superficial (Quirino, 2003; Almeida et al., 2009; Bal & Bektas, 2012; Korkut, 2012; Ratnasingham & Ioras, 2012). Por outro lado, pode causar efeitos indesejáveis, como diminuição das propriedades mecânicas da madeira (Shi et al., 2007; Garcia et al., 2012; Dundar et al., 2012; Cademartori et al., 2012), além da degradação da madeira pelo ácido acético, produto da degradação das hemiceluloses (Severo & Tomaselli, 2003)

As diversas alterações químicas causadas pelo processo de termorretificação provocam alterações na coloração da madeira. Nesse contexto, a colorimetria é usada para avaliar, medir e comparar essas alterações.

A variação total da cor ( $\Delta E^*$ ) aumenta com a termorretificação; a variação é mais acentuada nos tratamentos mais severos, ou seja, maior tempo, temperatura e pressão (Garcia et al., 2014b; Freitas et al., 2016; Méndez-Mejías & Moya, 2016).

A termorretificação provoca o escurecimento da madeira, ou seja, causa redução da claridade (coordenada  $L^*$ ) (Esteves et al., 2008; Conte et al., 2014; Garcia et al., 2014b; Zanuncio et al., 2014a, 2014b, 2014c; Pertuzzatti et al., 2016; Paula et al., 2016b; Freitas et al., 2016; Lazarotto et al., 2016; Méndez-Mejías & Moya, 2016). Os matizes amarelo e vermelho podem sofrer diversas alterações e, de acordo com Garcia et al. (2014b) e Zanuncio et al. (2014a, 2014b, 2014c), a termorretificação provoca redução nas coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  em madeiras de *E. grandis*. De forma similar, esse efeito também foi identificado por Lazarotto et al. (2016) em madeiras de *E. tereticornis* e *C. citriodora*; e por Pertuzzatti et al. (2016) em madeiras de *P. elliottii* var. *elliottii*.

Estudando o efeito da termorretificação em madeira de *Simarouba amara*, Freitas et al. (2016) encontraram aumento na coordenada  $a^*$ . A coordenada  $b^*$  aumentou em condições suaves do processo de termorretificação (180 °C), porém, teve queda em condições mais severas (200 °C). Comportamento semelhante foi encontrado por Paula et al. (2016a) ao termorretificar a madeira de *Lecythis pisonis* Cambess.

### Biodeterioração da madeira

Vários estudos sobre biodeterioração da madeira mostram que a colorimetria é um método eficaz para monitoramento e diferenciação dos ataques de diferentes espécies de fungos (Morais & Costa, 2007; Carneiro et al., 2009; Souza et al., 2010; Costa et al., 2011b; Almeida et al., 2012).

Morais & Costa (2007) estudaram a alteração da cor das madeiras de *E. camaldulensis* e *E. pilularis* causadas pelos fungos *Ganoderma appalanatum* (podridão branca) e *Gloeophyllum striatum* (podridão parda) e encontraram redução na coordenada  $L^*$  e do ângulo de tinta ( $h^*$ ) e um aumento nas coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  e no parâmetro  $C$ . Porém, não houve alteração visual na cor, demonstrando a relevância do uso do sistema CIELAB. Souza et al. (2010), utilizando *Trametes versicolor* (podridão branca) e *Gloeophyllum trabeum* (podridão parda) em madeira de *Machaerium scleroxylon*, encontraram alterações nas medições colorimétricas, contudo essas alterações não implicaram em modificações significativas da cor da madeira avaliadas pela variação total da cor ( $\Delta E^*$ ). Por outro lado, essas variações foram classificadas como apreciáveis, segundo a classificação baseada em escalas de percepção visual.

De acordo com Costa et al. (2011b), a colorimetria se mostrou como uma técnica eficiente para determinar e diferenciar o ataque dos fungos *Trametes versicolor* (podridão branca) e *G. trabeum* nas madeiras de *Simarouba amara* e *Carapa guianensis*. Stangerlin et al. (2013) também diferenciaram o ataque desses dois fungos nas madeiras de *S. amara*, *Citrus micrantha* e *Dipteryx odorata*.

Com o intuito de avaliar a resistência biológica da madeira e de produtos à base de madeira de *Toona ciliata*, Almeida et al. (2012) encontraram que a variação da coloração após o ataque de fungos é mais pronunciada para *G. trabeum*, tanto para a madeira maciça como para os painéis aglomerados e OSB. Esses autores verificaram influência direta da variação da cor na perda de massa na madeira e nos painéis.

Okino et al. (2015) submeteram serragem e blocos de três espécies do gênero *Couratari* ao ataque de dois fungos de podridão branca (*T. versicolor* e *G. appalanatum*) e dois fungos de podridão parda (*G. trabeum* e *Lentimus lepideus*). Tanto a serragem quanto os blocos ficaram mais escuros após os ataques

fúngicos, com exceção da madeira de *C. stellata* quando exposta ao fungo *T. versicolor*, e mais avermelhados do que os tratamentos controle. A perda de massa teve boa correlação com a variação total da cor e com a coordenada  $a^*$ .

#### *Ações de intemperismo na madeira*

A cor da madeira é instável e sujeita a rápidas alterações. Essas alterações podem ser causadas por intemperismo, que é a ação combinada do sol, da chuva ou umidade e dos ventos (Hon, 2001). A madeira quando sujeita às intempéries sofre alterações na cor e na textura (Sudiyani et al., 1999).

A fotodegradação da madeira é um fenômeno superficial, devido à grande quantidade de grupos ou sistemas cromóforos dos componentes distribuídos na camada externa da madeira (Costa et al., 2011a). A radiação ultravioleta consegue penetrar até uma profundidade de 75  $\mu\text{m}$  e a radiação visível atinge cerca de 200  $\mu\text{m}$ , dependendo da cor original da madeira. Apesar de a radiação visível ter uma ação mais profunda, sua energia é inferior a 70  $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ , insuficiente para romper as ligações dos constituintes químicos da madeira. A radiação ultravioleta possui energia em torno de 90  $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ , portando mais danosa à madeira (Hon, 2001).

Camargos & González (2001) observaram que madeiras que sofreram exposição à luz ambiente apresentaram menor claridade e maior valor no matiz amarelo. Pereira et al. (2012) observaram o efeito da exposição das intempéries nas madeiras de *Hymenaea oblongifolia* e *Ocotea myriantha*. A primeira espécie passou de marrom-avermelhada para marrom muito escura, e a segunda de marrom-amarelada a marrom-acinzentada.

Mattos et al. (2014), estudando a ação do intemperismo natural sobre as madeiras de *E. saligna*, *E. tereticornis* e *C. citriodora*, durante 360 dias em dois tipos de incidência de intemperismo (direta e sob sombreamento de um povoamento florestal), encontraram maior variação colorimétrica nas amostras expostas diretamente. Nesse estudo, o intemperismo foi responsável por uma significativa descoloração das amostras das três espécies, que resultou em nova coloração acinzentada.

González et al. (2005); Silva et al. (2007) e Pastore et al. (2008), e afirmaram que as cores das madeiras sofrem com a ação do intemperismo, seja pela lixiviação ocasionada pela chuva ou pela incidência da luz. Para

Feist & Hon (1984), a cor da madeira continua a mudar lentamente após 160 h. Sternadt & Camargos (1991) também observaram que a exposição da madeira ao sol altera sua cor, com tendência da coloração ser alterada para o amarelo, marrom, vermelho e, em menor escala, o preto.

Para reduzir os custos e o tempo de duração de testes de campo para avaliação do intemperismo, foram desenvolvidos ensaios e testes em escala laboratorial que simulam o intemperismo e permitem avaliar e comparar a durabilidade natural das madeiras (González et al., 2010). Um exemplo desses ensaios aplicados à madeira é a norma ASTM G 154/2016, que preconiza testes de fotodegradação por radiação ultravioleta em materiais não metálicos (American Society For Testing Materials, 2016).

González et al. (2010) avaliaram o efeito da radiação ultravioleta na madeira de *Codia goeldiana*. A madeira foi caracterizada pela pigmentação amarela (parâmetro  $b^*$ ) e pela luminosidade ( $L^*$ ). Contudo, após o ataque da radiação ultravioleta observou-se pigmentação vermelha (parâmetro  $a^*$ ), que resultou em escurecimento da madeira. As madeiras de *Hymenaea courbaril* e *Couratari oblongifolia* sofreram variação de cor pela fotodegradação, e essa alteração foi classificada como muito apreciável. *Hymenaea courbaril* apresentou maior tendência para avermelhar-se, enquanto *Couratari oblongifolia* apresentou coloração oliva escura (Costa et al., 2011a).

A madeira de *Hymenolobium petraeum* em ensaios de fotointemperismo acelerado tenderam a escurecer nas primeiras 24 h, com diminuição da claridade (coordenada  $L^*$ ), e de estabilização após esse período inicial. Para as demais variáveis houve aumento da pigmentação vermelha (coordenada  $a^*$ ) e amarela (coordenada  $b^*$ ), seguido de diminuição destes parâmetros (Teles & Costa, 2014).

Segundo Zanatta et al. (2015), a madeira de *Pinus elliottii* exposta à radiação ultravioleta artificial teve sua cor variada de branca para amarela, principalmente nas primeiras horas de incidência. Os autores classificaram essa mudança de cor como uma variação colorimétrica muito apreciável. Essa mudança de coloração está relacionada com a fotodegradação da lignina na superfície da madeira, resultado da incidência da radiação ultravioleta (Feist & Hon, 1984).

Queiróz et al. (2016) e Mendes et al. (2016) utilizaram a colorimetria para avaliar o efeito da aplicação de



produtos de acabamentos em lâminas de madeira submetidas a ensaios de intemperismo artificial. A radiação provocou alterações colorimétricas nas madeiras ensaiadas, porém os resultados sugerem que essa variação é menor naquelas que receberam aplicações de produtos de acabamentos.

#### *Outras aplicações*

Além das aplicações já retratadas, a colorimetria pode ser usada para avaliar a produção de polpa celulósica, o processo de branqueamento e reversão da alvura do papel, o efeito de modificações e tratamentos químicos da madeira e as características energéticas de pellets de madeira.

De Andrade (2010) extraiu lignina kraf através da redução do pH do licor negro com a adição de ácido sulfúrico. A variação do pH causou variações na luminosidade ( $L^*$ ), saturação da cor ( $C^*$ ) e ângulo de tinta ( $h^*$ ) da lignina extraída, mostrando que as ligninas obtidas têm tonalidades distintas, de acordo com a faixa de pH. Em faixa mais ácida (pH = 2,0) a lignina apresentou valores superiores para a luminosidade, saturação e tonalidade, enquanto que estes foram gradativamente reduzidos à medida que aconteceu o aumento da faixa de pH. Estes resultados indicam que a precipitação da lignina em faixas mais baixas de pH contribui para destruição ou modificação dos grupos cromóforos (quinonas, ácidos carboxílicos e grupos carbonila) que promovem a coloração na lignina kraft.

A reversão da alvura é um fenômeno físico/químico, que altera a alvura da polpa branqueada, tornando-a mais escura e amarelada. Os mecanismos de reversão de alvura são complexos e de difícil entendimento, pois envolvem inúmeras reações químicas simultâneas, que são influenciadas pela interação entre a química da polpa e dos fatores do meio (Gomes & Colodette, 2015). A norma TAPPI T 524 om-13 (Technical Association of Pulp and Paper Industry, 2013) preconiza o uso do sistema CIELAB para medir essa reversão. O amarelamento da polpa é estimado pela variação na coordenada  $b^*$ . A norma recomenda, também, o cálculo da variação total da cor ( $\Delta E^*$ ). Seguindo esses ensaios, Mozina et al. (2007) estimaram a reversão de alvura em páginas de livros em duas idades diferentes, 29 e 89 anos, sendo que o mais velho apresentou maior pigmentação amarela.

A modificação química da madeira é uma possibilidade para melhorar sua estabilidade dimensional, sendo a

acetilação o processo de modificação mais estudado (Sander et al., 2003). Investigando a ação da acetilação em partículas de *P. taeda* De Castro et al. (2013) encontraram o  $\Delta L^*$  negativo, constatando o escurecimento da madeira. Não encontraram alteração na pigmentação vermelha (coordenada  $a^*$ ), mas a pigmentação amarela (coordenada  $b^*$ ) variou de acordo com os tratamentos aplicados.

A pré-hidrólise é outro processo de modificação química da madeira realizado com ácido ou simplesmente água, somado à aplicação de temperatura e pressão, para acelerar a remoção das hemiceluloses (Foelkel et al., 1979). Esse processo é muito usado como preparação da madeira para produção de celulose solúvel (Li et al., 2010; Liu et al., 2013). Assim como a acetilação e termorreificação, esse processo causa modificações nas características da madeira que podem diversificar a aplicação do material resultante. Carvalho et al. (2014) estudaram o efeito nas características químicas e colorimétricas da pré-hidrólise aquosa em partículas de pinus e de eucalipto e concluíram que a diminuição do teor do holocelulose e aumento do teor de extrativos reduziram o valor de  $L^*$ , causando o escurecimento da madeira, sendo a madeira de pinus mais resistente ao escurecimento do que a de eucalipto.

Brocco et al. (2017) utilizaram extrativos de *T. grandis* como produto preservante em madeiras claras, alburno de *T. grandis* e *Pinus* sp. A aplicação dos extrativos promoveu escurecimento da madeira e uniformidade da cor, fazendo com que após o tratamento as duas espécies apresentassem padrões colorimétricos mais próximos do padrão da madeira de cerne de *T. grandis* do que aos seus padrões naturais, sem tratamento.

Os pellets de madeira são pequenos cilindros altamente densos, compactos e com baixo teor de umidade, permitindo elevada eficiência na combustão (Couto et al., 2004). A pelletização da madeira é muito utilizada para melhor aproveitamento da biomassa oriunda de resíduos florestais. Em análise colorimétrica de pellets de madeira comercializados na Itália, Sgarbossa et al. (2014) encontraram correlações significativas entre os parâmetros do sistema CIELAB com todas as variáveis de qualidade (teor de cinzas, poder calorífico e umidade). No entanto, esses autores destacaram que a aplicação industrial da colorimetria para esse fim é improvável, devido ao alto investimento inicial dos dispositivos colorimétricos frente à alta disponibilidade de instrumentos para a qualificação on-line da qualidade do produto ainda no processo de produção.

## Considerações finais

O método de medição colorimétrica mais utilizado é o sistema CIELAB, descrito em 1976 por pesquisadores do Commission Internationale de L'Eclairage. Esse sistema se consolidou por apresentar maior precisão nos resultados das medições da cor, eliminando o caráter subjetivo ao explicar essa propriedade matematicamente em luminosidade ou brilho, tonalidade ou matiz e saturação ou cromaticidade, permitindo, por exemplo, calcular diferenças e variações na coloração.

Há na literatura muita informação sobre o uso da colorimetria na ciência e tecnologia da madeira, nas mais diversas linhas de pesquisa, evidenciando sua ampla aplicabilidade como ferramenta de caracterização e avaliação da qualidade das madeiras e dos produtos derivados de madeira. Isso cria um extenso leque para estudos vinculados à esta técnica, como por exemplo avaliar a ação do intemperismo, ataque de agentes biodeterioradores, efeitos de processos termorretrificadores ou produtos de acabamentos, processos de modificação da madeira, simples caracterização colorimétrica para identificação ou classificação da madeira, em métodos não destrutivos de determinação de algumas propriedades da madeira, caracterização da reversão de alvura do papel branqueado e avaliação de bicompostíveis de origem madeireira.

## Demandas de pesquisas futuras

Existem utilizações e propriedades das madeiras e de seus produtos diretamente relacionadas à cor que necessitam de pesquisas aprofundadas. Nesse sentido pode-se listar: i) necessidade de estudos que buscam apreciar a utilização da colorimetria na avaliação de resultados do melhoramento genético de espécies florestais de interesse comercial; ii) implantação da colorimetria no controle de qualidade de indústrias de processamento mecânico da madeira; iii) avaliação patológica de estruturas de madeira, estruturas em *wood-frame* e dormentes de madeira em ferrovias; iv) avaliação da penetração, retenção e eficiência de produtos e processos preservantes da madeira; v) estudos que buscam normatização da madeira por cor, para que a cor substitua o fator espécie como padrão de comercialização; vi) avaliação da qualidade e das propriedades de compósitos à base de madeira.

## Referências

- Almeida, G. et al. Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed on micro-samples of three *Eucalyptus* species. **Holzforschung**, v. 63, n. 1, p. 80-88, 2009. DOI: 10.1515/HF.2009.026.
- Almeida, N. A. et al. Biodeterioração de produtos à base da madeira de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem. Var. *australis*). **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 17-26, 2012. DOI: 10.1590/S0104-77602012000100003.
- American Society for Testing Materials. **D-2244-09**: standard practice for calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates. West Conshohocken, 2009.
- American Society for Testing Materials. **G 154-16**: standard practice for operating fluorescent ultraviolet (UV) lamp apparatus for exposure of nonmetallic materials. West Conshohocken, 2016.
- Amorim, P. G. R. et al. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 461-466, 2013. DOI: 10.1590/S0104-77602013000300013.
- Atayde, C. M. et al. Características colorimétricas entre as seções anatômicas da madeira de muirapiranga (*Brosimum* sp.). **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 231-235, 2011. DOI: 10.1590/S0104-77602011000200011.
- Autran, C. & Gonzalez, J. C. Caracterização colorimétrica das madeiras de muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) e de seringueira (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Müll Arg.) visando à utilização em interiores. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 4, p. 445-451, 2006. DOI: 10.5902/198050981926.
- Bal, B. C. & Bektas, I. The effects of heat treatment on physical properties of juvenile wood and mature wood of *Eucalyptus grandis*. **Bioresources**, v. 7, n. 4, p. 5117-5127, 2012.
- Barros, S. V. S. et al. Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da amazônia. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 337-342, 2014. DOI: 10.1590/01047760201420031421.
- Borges, L. M. & Quirino, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.
- Brito, J. O. et al. Chemical composition changes in *Eucalyptus* and *Pinus* woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 18, p. 8545-8548, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.03.069.
- Brocco, V. F. et al. Potential of teak heartwood extracts as a natural wood preservative. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, n. 4, p. 2093-2099, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.074.
- Bruno, T. J. & Svoronos, P. D. N. **CRC Handbook of fundamental spectroscopic correlation charts**. Boca Raton, FD: CRC Press, 2005. 240 p.
- Burger, L. M. & Richter, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo, SP: Ed. Nobel, 1991. 154 p.
- Cademartori, P. H. G. et al. Modification of static bending strength properties of *Eucalyptus grandis* heat-treated wood. **Materials Research**, v. 15, n. 6, p. 922-927, 2012. DOI: 10.1590/S1516-14392012005000136.

- Camargos, J. A. A. & Gonzalez, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, n. 71, p. 30-41, 2001.
- Carneiro, J. S. et al. Decay susceptibility of Amazon wood species from Brazil against White rot and Brown rot decay fungi. **Holzforschung**, v. 63, n. 6, p. 767-772, 2009. DOI: 10.1515/HF.2009.119.
- Carvalho, A. G. Colorimetric and chemical changes in pre-hydrolyzed strand board particles of *Pine* and *Eucalyptus*. **Bioresources**, v. 9, n. 4, p. 7234-7242, 2014.
- Commission Internationale de L'Eclairage. **Colorimetry**. 3rd. ed. Viena: Central Bureau of the CIE, 2004. 82 p.
- Conte, B. et al. Propriedades físicas e colorimétricas da madeira termorretrificada de *Pinus elliotii* var. *elliottii*. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 555-563, 2014.
- Costa, J. de A. et al. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari oblongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 133-139, 2011a. DOI: 10.1590/S0104-77602011000100016.
- Costa, M. A. et al. Caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras através da colorimetria e da espectroscopia de infravermelho. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 567-577, 2011b. DOI: 10.5902/198050983814.
- Couto, L. et al. Produção de pellets de madeira: o caso da Bio-Energy no Espírito Santo. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 45-52, 2004.
- Delucis, R. A. et al. Caracterização colorimétrica dos lenhos juvenil e adulto de quatro espécies de eucalipto. **Agrária**, v. 10, n. 2, p. 268-272, 2015. DOI: 10.5039/agraria.v10i2a3970.
- De Andrade, A. S. **Utilização de micropartículas de lignina kraft combinadas com amidoanfótero visando o aumento das propriedades do papel embalagem**. 2010. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- De Castro, V. C. et al. Avaliação colorimétrica de partículas de *Pinus taeda* submetidas a diferentes métodos de acetilação. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 265-270, 2013.
- Dubey, M. K. et al. Effect of oil heating age on colour and dimensional stability of heat treated *Pinus radiata*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 2, p. 255-262, 2011. DOI: 10.1007/s00107-010-0431-0.
- Dundar, T. et al. Effect of heat treatment on the physical and mechanical properties of compression and opposite wood of black pine. **Bioresources**, v. 7, n. 4, p. 5009-5018, 2012.
- Esteves, B. et al. Chemistry and ecotoxicity of heat-treated pine wood extractives. **Wood Science and Technology**, v. 45, n. 4, p. 661-676, 2011. DOI: 10.1007/s00226-010-0356-0.
- Esteves, B. et al. Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. **Wood Science and Technology**, v. 42, n. 5, p.369-384, 2008.
- Esteves, B. & Pereira, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **Bioresources**, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009. DOI: 10.1007/s00226-007-0157-2.
- Feist, W. C. & Hon, D. N. S. Chemistry of weathering and protection. In: Rowell, R. M. (Ed.). **Advances in chemistry series**. Washington, DC: American Chemical Society, 1984. P. 401-451.
- Foelkel, C. E. B. et al. Processo de pré-hidrolise/kraft para a produção de celulose para a dissolução a partir da madeira de eucalipto. **O Papel**, v. 40, p. 54-62, 1979.
- Freitas, A. S. et al. Tratamento termomecânico e seus efeitos nas propriedades da *Simarouba amara* (Aubl.). **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 565-572, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.144115.
- Garcia, R. A. et al. Colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 509-517, 2014a. DOI: 10.1590/01047760201420041316.
- Garcia, R. A. et al. Modificação da cor original da madeira de *Eucalyptus grandis* através de tratamentos termorretrificadores. **Cerne**, v. 20, n.3, p. 449-457, 2014b. DOI: 10.1590/01047760201420031410.
- Garcia, R. A. et al. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1, p. 41-52, 2012. DOI: 10.1007/s00226-010-0387-6.
- Garcia, R. A. & Marinonio, G. B. Variação da cor da madeira de teca em função da densidade e do teor de extrativos. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 124-134, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.035313.
- Gomes, F. J. B. & Colodette, G. L. Estabilidade de alvura. In: Colodette, G. L. & Gomes, F. J. B. (Ed.) **Branqueamento de polpa celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015. p. 691-704.
- Gonzalez, J. C. et al. Características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006. DOI:10.5902/198050981912.
- Gonzalez, J. C. et al. Colorimetria quantitativa: Uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, n.72, p.47-58, 2001.
- Gonzalez, J. C. & Macedo, D. G. Colorimetria aplicada à madeira de eucalipto. In: SEMINÁRIO DE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE EUCALIPTO, 2., 2003, Belo Horizonte. **Anais**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2003. p. 81-95. Editores: Silva, J. de C. & Gomes, J. M.
- Gonzalez, J. C. et al. Valorisation d'espèces brésiliennes de substitution pour l'industrie du meuble: tanimbuca et louro. **Bois et Forêts des Tropiques**, v. 286, n. 4, p. 55-64, 2005.
- Gonzalez, J. C. et al. Influência do sítio nas propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cerne**, v. 15, n. 2, p. 251-255, 2009.
- Gonzalez, J. C. et al. Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* Huber) após receber produtos de acabamentos. **Ciência Florestal** v. 20, n. 4, p. 657-664, 2010. DOI: 10.5902/198050982424.
- González-Pena, M. M. & Hale, M. D. C. Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine part 1: colour evolution and colour changes. **Holzforschung**, v. 63, n. 4, p. 385-393, 2009. DOI: 10.1515/HF.2009.078.

- Hikita, Y. et al. Weathering testing of timber: discoloration. In: Imamura, Y. (Ed.). **High performance utilization of wood for outdoor uses**. Kyoto, FU: Press-Net, 2001. p. 27-32.
- Hiller, C. R. et al. Relationships in black walnut heartwood between color and other physical and anatomical characteristics. **Wood and Fiber Science**, v. 4, n. 1, p. 38-42, 1972.
- Hon, D. N. S. Wethering and photochemistry of wood. In: Hon, D. N. S. & Shiraiishi, N. (Ed.). **Wood and cellulosic chemistry**. New York, NY: Marcel Dekker Inc., 2001. p. 512-546.
- International Association of Wood Anatomy. List of microscopic features for wood identification. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 3, p. 226-332, 1989.
- Janin, G. A. et al. Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. part 1. colorimetry theory for the cielab system. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 3, n. 1/2, p. 3-13, 2001. DOI: 10.4067/S0718-221X2001000100001.
- Kocaefe, D. et al. Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. **Holz Roh-Werkst**, v. 66, n. 5, p. 355-361, 2008. DOI: 10.1007/s00107-008-0233-9.
- Korkut, S. Performance of three thermally treated tropical wood species commonly used in Turkey. **Industrial Crops and Products**, v. 36, n. 1, p. 355-362, 2012. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.10.004.
- Lavisci, P. et al. Qualité Du bois de six essences Du maquis méditerranéen. **Forêt Méditerranéenne**, v. 11, n. 1, p. 69-78, 1989.
- Lazarotto, M. et al. Resistência biológica e colorimetria da madeira termorretrificada de duas espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 135-145, 2016. DOI: 10.1590/0100-67622016000100015.
- Leão, A. C. et al. Implementação de sistema de gerenciamento de cores para imagens digitais. In: WEB E MULTIMÍDIA: desafios e soluções. Belo Horizonte, MG: FUMARC, 2005. p. 61-96.
- Li, H. et al. Hemicellulose removal from hardwood chips in the pre-hydrolysis step PF the kraft-based dissolving pulp production process. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 30, n. 1, p. 48-60, 2010. DOI: 10.1080/02773810903419227.
- Liu, H. et al. Furfural formaion from the pré-hydrolysis liquor of hardwood kraft-based dissolving pulp production process. **Bioresource Technology**, v. 131, p. 315-320, 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.12.158.
- Luostarinen, K. & Mötönen, V. Effect of felling season, storage and drying on colour of silver birch (*Betula pendula*) wood from different growing sites. **Silva Fennica**, v. 43, n. 4, p. 699-709, 2009.
- Mattos, B. D. et al. Colour changes of brazilian eucalyptus wood by natural weathering. **Internacional Wood Products Journal**, v. 5, n. 1, p. 33-38, 2014. DOI: 10.1179/2042645313Y.0000000035.
- Mendes, T. J. et al. Efeito do intemperismo artificial na cor de lâminas de madeira tratadas com dois produtos de acabamento. **Cerne**, v. 22, n. 1, p. 101-110, 2016. DOI: 10.1590/01047760201622011911.
- Méndez-Mejías, L. D. & Moya, R. Effects on density, shrinking, color changing and chemical surface analysis through FTIR of *Tectona grandis* thermo-treated. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 122, p. 811-820, 2016. DOI: 10.18671/scifor.v44n112.03.
- Morais, F. M. & Costa, A. F. Alteração da cor aparente de madeiras submetidas ao ataque de fungos apodrecedores. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 2, n. 1, p. 44-50, 2007.
- Mori, C. L. S. O. et al. Influência das características tecnológicas na cor da madeira de eucaliptos. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 123-132. 2004. DOI: 10.5902/198050981812.
- Mori, C. L. S. O. et al. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* pp. **Cerne**, v. 11, n. 2, p.137-146, 2005.
- Moura, L. F. & Brito, J. O. Efeito da termorretrificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 69-76, 2011.
- Mozina, K. et al. Non-destructive methods for chemical, optical, colorimetric and typographic characterisation of a reprint. **Journal of Cultural Heritage**, v. 8, n. 4, p. 339-349, 2007. DOI: 10.1016/j.culher.2007.03.005.
- Nishino, Y. et al. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. **Journal of Wood Science**, v. 46, p. 267-272, 2000. DOI: 10.1007/BF00766215.
- Okino, E. Y. A. et al. Accelerated laboratory test of three amazonian wood species called tauari, exposed to white- and brown-rot fungi and color response according to CIE L\* a\* b\* system. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 3, p. 581-593, 2015. DOI: 10.5902/1980509819609.
- Pastore, T. C. M. et al. Efeito do intemperismo artificial em quatro madeiras tropicais monitorado por espectroscopia de infravermelho (DRIFT). **Química Nova**, v. 31, n. 8, p. 2071-2075, 2008. DOI: 10.1590/S0100-40422008000800030.
- Paula, M. H. de et al. Heat treatment effect on the color of the heartwood and sapwood in a sapucaia tree (*Lecythis Pisonis Cambess*). **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 10, n. 13. p. 108-115, 2016a.
- Paula, M. H. de et al. Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata Willd*). **Biodiversidade**, v. 15, n. 2, p. 136-149. 2016b.
- Pereira, K. R. M. et al. Avaliação da cor da madeira das espécies *Hymenaea oblangifolia* e *Ocotea myriantha* após a exposição à intempéries. In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE, 4., 2012, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Malinovski Florestal, 2012. p. 1-7.
- Petter, O. C. & Gliese, R. **Fundamentos de colorimetria**. Porto Alegre: Laboratório de Processamento Mineral, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. Apostila do Curso de Fundamentos de Colorimetria.
- Pertuzzatti, A. Propriedades físicas da madeira de *Pinus elliotti* var. *elliottii* termorretrificada sob diferentes atmosferas. **Ciência da Madeira**, v. 7, n. 15, p. 7-15, 2016. DOI: 10.12953/2177-6830/rm.v7n1p7-15.
- Queiróz, F. L. C. et al. Intemperismo artificial em lâminas de *Tectona grandis* tratadas com produtos de acabamento. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 15, p. 573-581, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.126315.
- Quirino, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília, DF: IBAMA, 2003. 31 p.



- Rappold, P. M. & Smith, W. B. An investigation of the relationships between harvest season, log age, and drying schedule on the coloration of hard maple lumber. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 12, p. 178–184, 2004.
- Ratnasingham, J. & Ioras, F. Effect of heat treatment on the machining and other properties of rubberwood. **European Journal of Wood Production**, v. 70, n. 5, p. 759-761, 2012. DOI: 10.1007/s00107-011-0587-2.
- Ribeiro, E. S. **Propriedades tecnológicas de vinte espécies de madeiras tropicais comercializadas pelo estado do Mato Grosso**. 2017. 210 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Sander, C. et al. Analysis of acetylated wood by electron microscopy. **Wood Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 39-46, 2003. DOI: 10.1007/s00226-002-0160-6.
- Severo, E. T. D. & Tomaselli, I. Efeito do tratamento de vaporização em toras e madeira serrada de *Eucalyptus dunnii* sobre a flexão estática. **Floresta**, v. 29, n. 13, p. 37-51, 2003.
- Severo, E. T. D. et al. Physical and chemical changes in juvenile and mature woods of *Pinus elliottii* var. *elliottii* by thermal modification. **European Journal of Wood Production**, v. 70, n. 5, p. 741-747, 2012. DOI: 10.1007/s00107-012-0611-1.
- Sgarbossa, A. et al. Colorimetric patterns of wood pellets and their relations with quality and energy parameters. **Fuel**, v. 137, p. 70-76, 2014. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.07.080.
- Shi, J. et al. Mechanical behaviour of Quebec wood species heat-treated using thermo wood process. **Holz Roh- Werkst**, v. 65, n. 4, p. 255-259, 2007. DOI: 10.1007/s00107-007-0173-9.
- Silva, J. O. et al. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 1, p. 17-23, 2007. DOI: 10.5902/198050981931.
- Souza, F. et al. Resistência natural e alteração da cor da madeira de *Machaerium scleroxylon* Tul. submetida ao ataque de fungos apodrecedores. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 449-457, 2010.
- Stangerlin, D. M. et al. Monitoramento da biodeterioração da madeira de três espécies amazônicas pela técnica da colorimetria. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 12, p. 178-184, 2013. DOI: 10.1590/S0044-59672013000400004.
- Sternadt, G. H. & Camargos, J. A. **Ação da luz solar na cor de 62 espécies de madeiras da Região Amazônica**. Brasília, DF: IBAMA, 1991. 14 p.
- Sudiyani, Y. et al. Chemical characteristics of surfaces of hardwood and softwood deteriorated by weathering. **Journal of Wood Science**, v. 45, n. 4, p. 348-353, 1999. DOI: 10.1007/BF0083350, 2.
- Sundqvist, B. & Morén, T. The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 60, p. 375-376, 2002. DOI: 10.1007/s00107-002-0320-2.
- Technical Association of Pulp and Paper Industry. **Tappi T 524 om-13: color of paper and paperboard (45/0, C/2)**. Atlanta, 2013.
- Teles, R. F. & Costa, A. F. Influência do intemperismo acelerado nas propriedades colorimétricas da madeira de angelim pedra. **Nativa**, v. 2, n. 2, p. 65-70, 2014. DOI: 10.14583/2318-7670.v02n02a02.
- Tsoumis, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York, NY: Chapman e Hall, 1991. 496 p.
- Tumen, I. et al. Changes in the chemical structure of thermally treated wood. **Bioresources**, v. 5, n. 3, p.1936-1944, 2010.
- Vetter, R. E. et al. Wood colour: a comparison between determination methods. **IAWA Journal**, v. 11, n. 4, p. 429-439, 1990. DOI: 10.1163/22941932-90000534.
- Yildiz, S. et al. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, v. 41, n. 12, p. 1762-1766, 2006. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.017.
- Zanatta, P. et al. Fotodegradação da madeira de *Pinus elliottii* exposta à radiação ultravioleta artificial. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 15., 2015, Curitiba. **Anais...** São Carlos: IBRAMEM, 2015.
- Zanuncio, A. J. V. et al. Physical and colorimetric changes in *Eucalyptus grandis* wood after heat treatment. **Bioresources**, v. 9, n. 1, p. 293-302, 2014a.
- Zanuncio, A. J. V. et al. Química e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden termorretificada. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 765-770, 2014b. DOI: 10.1590/S0100-67622014000400020.
- Zanuncio, A. J. V. et al. Termorretificação e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 1, p. 85-90, 2014c. DOI: 10.4322/foram.2014.005.
- Zenid, G. J. Madeiras e suas características. In: Oliveira, J. T. S. et al. (Ed.). **Tecnologia aplicada ao setor madeireiro**. Jerônimo Monteiro, ES: Suprema, 2007. p. 125-158.