

---

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

---

## A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- O fogo é um “**herbívoro**” eficaz em muitas comunidades vegetais.
- O fogo consome “**combustível**”, incluindo folhas, ramos e folhada inflamáveis, um alimento mais genérico que o dos herbívoros bióticos.
- Assim como as propriedades químicas e morfológicas das folhas e ramos as tornam mais ou menos susceptíveis à herbivoria, também algumas plantas são mais susceptíveis ao fogo do que outras.
- As adaptações das plantas para redução da herbivoria animal (ex. folhas duras, fibrosas e de vida longa), promovem a “herbivoria” pelo fogo.
- As folhas mais palatáveis e fracamente protegidas de ambientes altamente produtivos reduzem a probabilidade de consumo pelo fogo.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- O que torna as plantas **inflamáveis** ?
- Uma das características mais importantes é a retenção de biomassa morta, com teores baixos de humidade (5-15%).
- A combustão da fitomassa morta seca o material vivo, facilitando a sua queima.
- As partes vivas das plantas têm 50-250% de humidade e ardem tanto melhor quanto mais secas estiverem.
- Por isso, folhas bem defendidas contra a herbivoria, com elevados teores de fibra e peso específico foliar elevado ardem mais facilmente, devido ao seu baixo teor de humidade.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A susceptibilidade ao fogo também é muito influenciada pela **forma, tamanho e disposição** das partes das plantas.
- Folhas e caules finos absorvem calor com muita facilidade e, quando mortos, também secam facilmente, devido à sua elevada área superficial relativamente ao volume (ex. agulhas de pinheiro, ervas, urzes, tojos).
- Estratos vegetais em que a biomassa se encontra bem arejada, não demasiado compactada, como folhada de pinheiros de agulha longa, prados e matagais, também são bastante susceptíveis ao fogo.
- Outro factor importante é o **conteúdo energético**, ou calor de combustão, do material. Mas como varia pouco entre espécies deve ser menos importante do que a quantidade, dimensões, estrutura e humidade.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Os combustíveis vegetais podem descrever-se pelo seu **tipo** e **estado**. O tipo descreve o próprio combustível. O estado depende das variações das condições ambientais e relaciona-se com a humidade.
- As **propriedades extrínsecas** dos combustíveis variam em função do volume de vegetação que se considere. As que mais afectam o comportamento do fogo são:
  - Quantidade, ou carga
  - Tamanho e forma
  - Compactação e densidade aparente
  - Disposição

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A quantidade, ou **carga de combustível** é o peso seco em estufa existente numa dada área ( $\text{kg.m}^{-2}$  ou  $\text{t.ha}^{-1}$ ).
- A carga de combustível varia muito entre diversas formações vegetais: um **prado** pode ter  $1\text{-}2 \text{ t.ha}^{-1}$ , enquanto que uma área coberta de **sobrantes de exploração florestal** poderá ter  $50\text{-}80 \text{ t.ha}^{-1}$ .



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- O tamanho e a forma dos combustíveis condicionam a facilidade com que eles entram em ignição e sustentam a combustão.
- O tamanho de uma partícula de combustível é descrito pela sua **relação superfície / volume**,  $\sigma$  ( $\text{cm}^2.\text{cm}^{-3}$  ou  $\text{m}^2.\text{m}^{-3}$ ).
- Para combustíveis cilíndricos e alongados (ex. ramos e agulhas) vem:

$$\sigma = \frac{\cancel{2\pi} \cdot \cancel{r} \cdot \cancel{h}}{\cancel{\pi} \cdot r^2 \cdot \cancel{h}} \Leftrightarrow \frac{2}{r} \Leftrightarrow \frac{4}{d}$$

r – raio

d – diâmetro

h - altura

- Para folhas largas:

$$\sigma = \frac{\cancel{2A}}{\cancel{A} \cdot t} \Leftrightarrow \frac{2}{t}$$

A – área unilateral

t – espessura da folha

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Exemplos de valores de  $\sigma$  (cm<sup>2</sup>.cm<sup>-3</sup>)
  - *Cistus salvifolius* (folhas): 45
  - *Cistus salvifolius* (ramos): 22
  - *Quercus coccifera* (folhas): 41
  - *Quercus coccifera* (ramos): 8.5
  - *Arbutus unedo* (folhas): 66
  - *Arbutus unedo* (ramos): 6.0
  - *Pinus pinaster* (agulhas) 46
- $\sigma$  é uma medida adequada do tamanho das partículas de combustível, devido à sua relação com as taxas de variação de temperatura e humidade do combustível, tempo para ignição e velocidade de propagação do fogo.

## A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A **compactação** mede o espaçamento entre partículas de combustível. A proximidade e disposição das partículas afecta a ignição e a combustão. A velocidade de propagação tende a ser menor quando o combustível está muito compactado.
- Leitos de combustível pouco compactados reagem mais rapidamente a variações da humidade e são mais arejados, i.e. têm mais O<sub>2</sub> para a combustão.
- A **densidade aparente**,  $\rho_b$ , (kg.m<sup>-3</sup>) é uma medida da porosidade de um complexo de combustível.
- O **coeficiente de compactação**,  $\beta$  (adimensional), é função da profundidade do leito, carga de combustível e dimensão das partículas. A compactação também afecta a transferência de energia por radiação.

$$\beta = \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad \rho_p \text{ – densidade das partículas (ex. 500-700kg.m}^{-3}\text{)}$$

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Valores de  $\rho_b$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ):

■ <i>Rosmarinus officinalis</i>	2,2	
■ <i>Pterospartium tridentatum</i>	3,5	
■ <i>Quercus coccifera</i>	1,4	
■ <i>Cistus ladanifer</i>	1,2	
■ <i>Arbutus unedo</i>	1,5	
■ <i>Ulex sp.</i>	4,2	( <i>Ulex densus</i> >>)
■ <i>Erica sp.</i>	1,8	
■ <i>Pinus pinaster</i> (folhada)	20,4	

- Valores de  $\beta$

- Se assumirmos  $\rho_p$  *Q. coccifera* =  $600 \text{ kg.m}^{-3}$ :

$$\beta = \frac{\rho_b}{\rho_p} = \frac{1.4 \text{ kg.m}^{-3}}{600 \text{ kg.m}^{-3}} = 0,0023$$

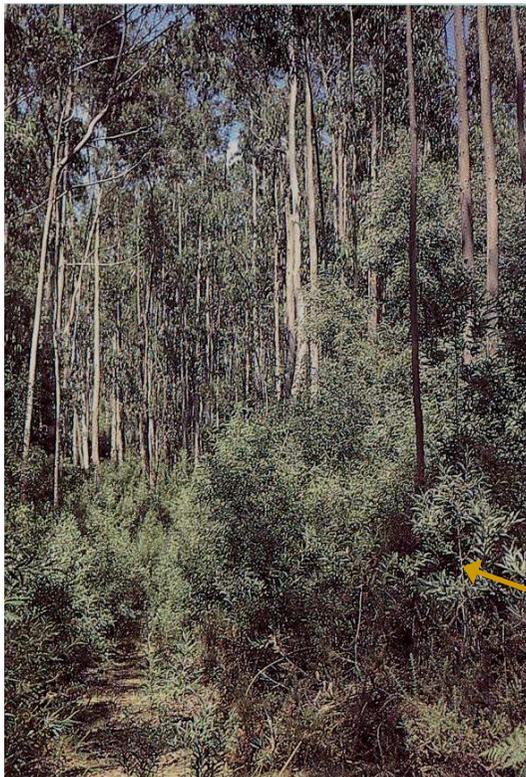
# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A **disposição** das partículas de combustível influencia muito o comportamento do fogo e inclui a **orientação** (vertical ou horizontal) e a relação espacial entre partículas.
- As árvores, arbustos e ervas têm orientação vertical. A folhada e os sobrantes de exploração têm orientação horizontal.



## A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

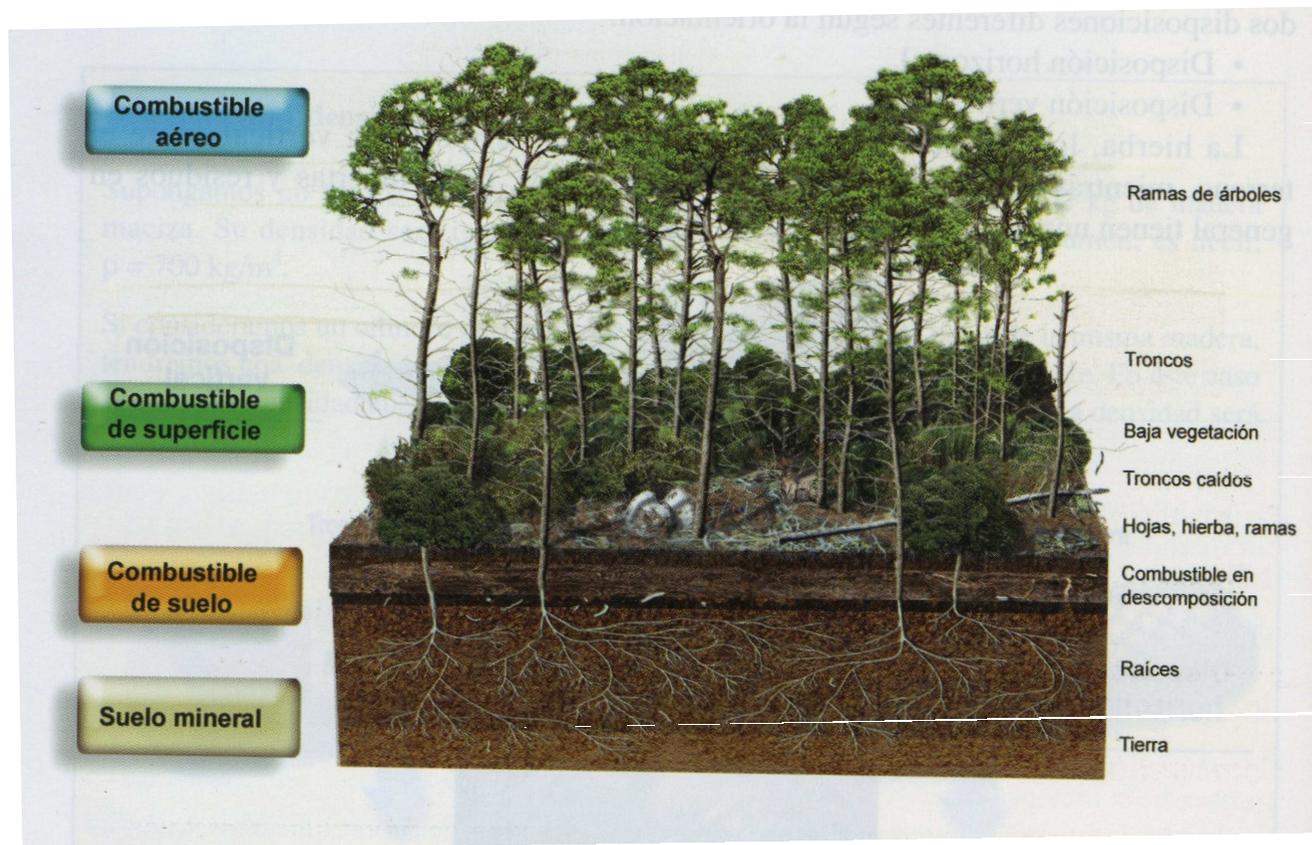
- A disposição das partículas também se refere ao quociente entre fitomassa viva e morta, à distribuição da carga total de combustível por classes de dimensão e ao grau de continuidade espacial (vertical e horizontal) do combustível.



Alta e baixa **continuidade vertical** do combustível em florestas.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Os **componentes** de um **complexo** de combustível descrevem-se de acordo com **estratos** horizontais, com base nas diferenças de comportamento potencial do fogo exibidas por cada estrato.



## A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- **Combustível de solo:** inclui as camadas de húmus e fermentação do solo orgânico. O topo desta camada é onde a folhada começa a decompor-se e a base é no solo mineral. É material bastante compactado, que tipicamente arde lentamente, sem chama.
- **Combustível de superfície:** é o estrato através do qual mais frequentemente se propaga o fogo. Inclui árvores em pé até 2m, arbustos, ervas, folhada e material lenhoso caído.
- **Combustível aéreo ou de copas:** inclui as árvores e arbustos com altura acima de 2m. Mesmo quando não ardem, as copas influenciam o comportamento do fogo, p.ex. afectando a velocidade do vento à superfície.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

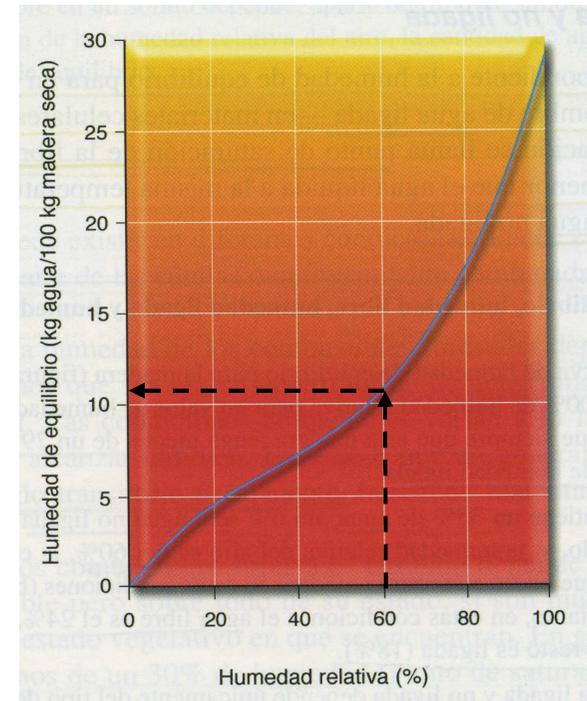
- O **estado** do combustível é determinado pelo seu conteúdo em humidade, que é bastante dinâmico.
- A quantidade de combustível disponível num dado fogo é determinada pelo **teor de humidade**, TH.
- O TH dos combustíveis afecta:
  - Pré-aquecimento e ignição dos combustíveis
  - Velocidade de propagação da frente de chamas
  - Taxa de libertação de energia pela combustão
  - Produção de fumo na combustão com e sem chama
  - Consumo de combustível
  - Mortalidade das plantas
- O TH é a massa de água contida em cada unidade de massa do combustível seco em estufa e exprime-se em %.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Quando um material é exposto ao ar, a dada temperatura e humidade, ele perde ou ganha água até que se estabeleça um equilíbrio.
- A **humidade de equilíbrio**,  $H_{eq}$  é o valor para que  $H$  tende se o combustível estiver exposto a temperatura e humidade constante durante muito tempo. Varia muito com a  $HR_{ar}$ .
- Se o material está, à partida mais húmido que o ar, irá secar até à humidade de equilíbrio.
- Chama-se **água livre** à diferença entre o teor total de humidade do combustível e o teor de  $H_{eq}$ .
- A água correspondente ao teor de  $H_{eq}$  para o ar saturado ( $HR_{ar}=100\%$ ) chama-se **água ligada**.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- No caso de materiais complexos, como a madeira, esta situação designa-se por **ponto de saturação da fibra**.
- Toda a água em excesso desta é chamada **água não ligada**.
- O ponto de saturação da fibra para a madeira é de 30%, i.e. sempre que a madeira tenha <30% de TH, toda ela será água ligada.
- Numa amostra com **TH=35%**, 5% é água não ligada e o resto é água ligada.
- Se  $HR_{ar}=60\% \Rightarrow H_{eq}=11\%$ . Neste caso, a água livre = 24%, da qual 6% é ligada e 18% é não ligada.



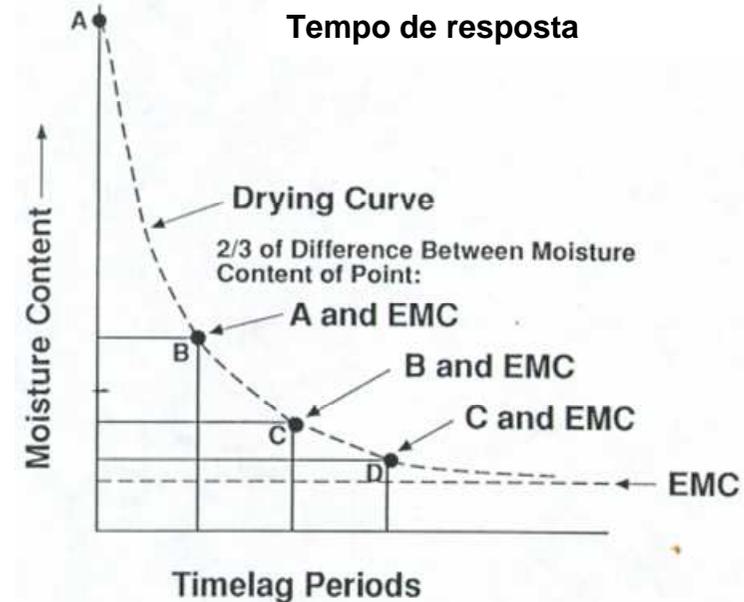
Humidade de equilíbrio da madeira em função da humidade relativa do ar a 20 °C.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- O TH dos **combustíveis mortos** varia constantemente. O humedecimento pode ser por água líquida ou vapor de água. A secagem faz-se por evaporação para o ambiente.
- TH depende das condições meteorológicas:
  - Chuva
  - Vento
  - Temperatura
  - Humidade relativa do ar
- Os **combustíveis verticais** absorvem água enquanto a sua superfície está molhada. Por isso, TH depende mais da duração da precipitação do que da quantidade.
- Nos **combustíveis horizontais**, TH depende da quantidade de precipitação, porque o solo retém água que depois cede ao combustível, mesmo depois de parar de chover.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Os combustíveis mortos podem ser classificados em função do tempo que levam a ajustar-se a variações da  $HR_{ar}$ .
- Chama-se **tempo de resposta** (TR, horas) ao tempo que um combustível morto leva a alcançar 63% ( $1-1/e$ ) da diferença entre a sua humidade inicial e a humidade de equilíbrio, a 27 °C e com  $HR_{ar} = 20\%$ .



- TR é uma característica do combustível que depende, sobretudo, do seu diâmetro. Combustíveis muito finos têm TR de poucas horas, enquanto que combustíveis muito grosseiros podem ter TR superior a um mês.

## A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Estabelecem-se as seguintes equivalências entre TR e o diâmetro de combustíveis ou a profundidade do leito de folhada:

TR(h)	Ø (cm)	Profundidade (cm)	combustíveis
1	<0.6	superficial	folhada, caruma, raminhos
10	0.6-25	< 1,5	ramos, caules, cascas
100	2.5-7.5	1,5 – 10	ramos e caules secos
1000	>7.5	> 10	troncos e ramos secos

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

Período TR 1  
(A-B)

$28\% - 5.5\% = 22.5\%$   
 $22.5\% \times 63\% = 14.2\%$   
 $28\% - 14.2\% = 13.8\%$

A humidade inicial de um combustível morto (ex. ramo de urze) é 28%. Este ramo de urze existe num ambiente onde o teor de equilíbrio da humidade é 5.5%. A diferença é de 22.5%. Após um período de tempo de resposta (independentemente da dimensão do combustível) a diferença de 22.5% é multiplicada pela constante 63% e vem igual a 14.2%. O teor de humidade alcançado pelo ramo é de  $28\% - 14.2\% = 13.8\%$ .

Período TR 2  
(B-C)

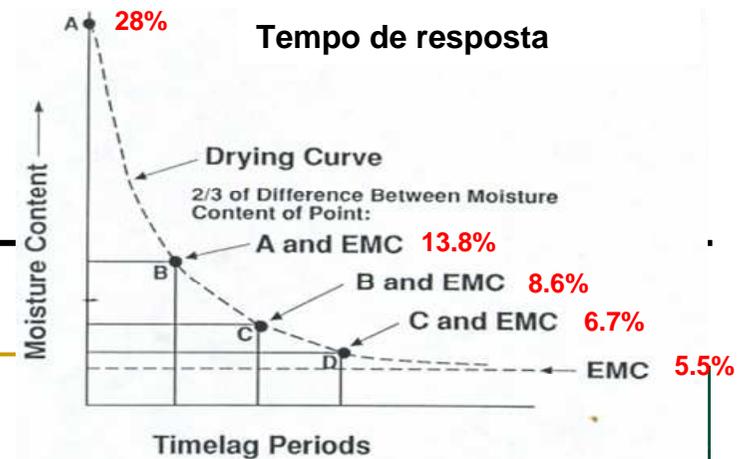
$13.8\% - 5.5\% = 8.3\%$   
 $8.3\% \times 63\% = 5.2\%$   
 $13.8\% - 5.2\% = 8.6\%$

Para determinar o teor de humidade após dois períodos: 13.8% menos o teor de equilíbrio da humidade de 5.5% = 8.3%. Multiplicando 8.3 pela constante 63% = 5.2%. Subtraindo 5.2% dos 13.8% iniciais dá um teor de humidade do combustível de 8.6%.

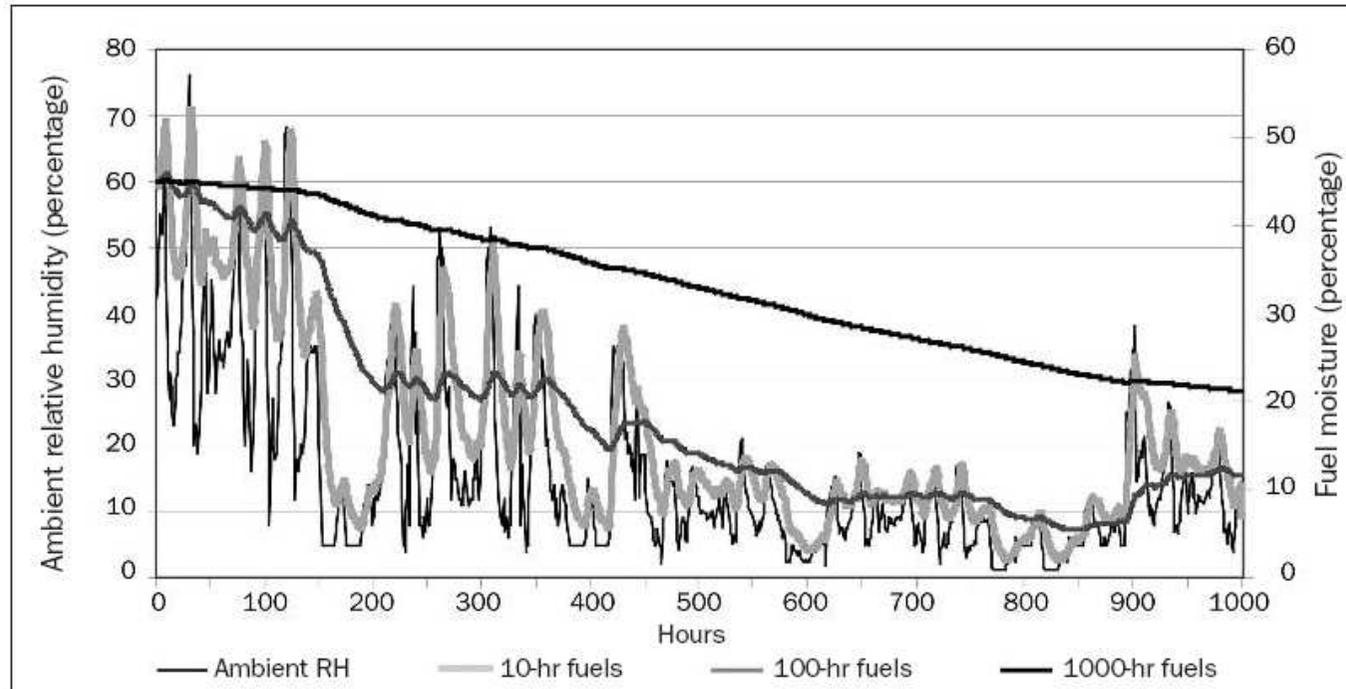
Período TR 3  
(C-D)

$8.6\% - 5.5\% = 3.1\%$   
 $3.1\% \times 63\% = 1.9\%$   
 $8.6\% - 1.9\% = 6.7\%$

Para determinar o teor de humidade do ramo de urze após três períodos, a mesma sequência de cálculos resulta num teor de humidade de 6.7%.



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL



*Figure 4. A theoretical example illustrating differences in fuel-moisture time lags for small (10-hour), intermediate (100-hour), and large (1000-hour) fuels. Small fuels dry out rapidly and respond more quickly to short-term variability in ambient relative humidity, while large fuels exhibit a more lagged response, requiring much longer dry periods to reach similar dryness.*

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A humidade dos **combustíveis vivos** também influencia o comportamento do fogo. A vegetação viva pode contribuir energia para a combustão, ou pode servir como sorvedouro de energia, retardando a propagação e atenuando a intensidade do fogo.
- TH dos combustíveis vivos varia sazonalmente, com os processos fisiológicos que controlam a fenologia das plantas.
- O TH da folhagem viva é máximo no período da emergência e cai rapidamente durante o crescimento e desenvolvimento foliar.

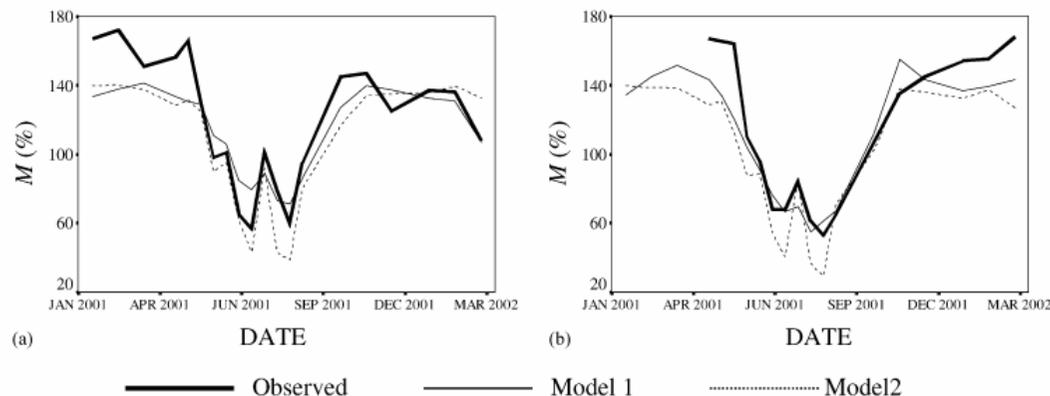


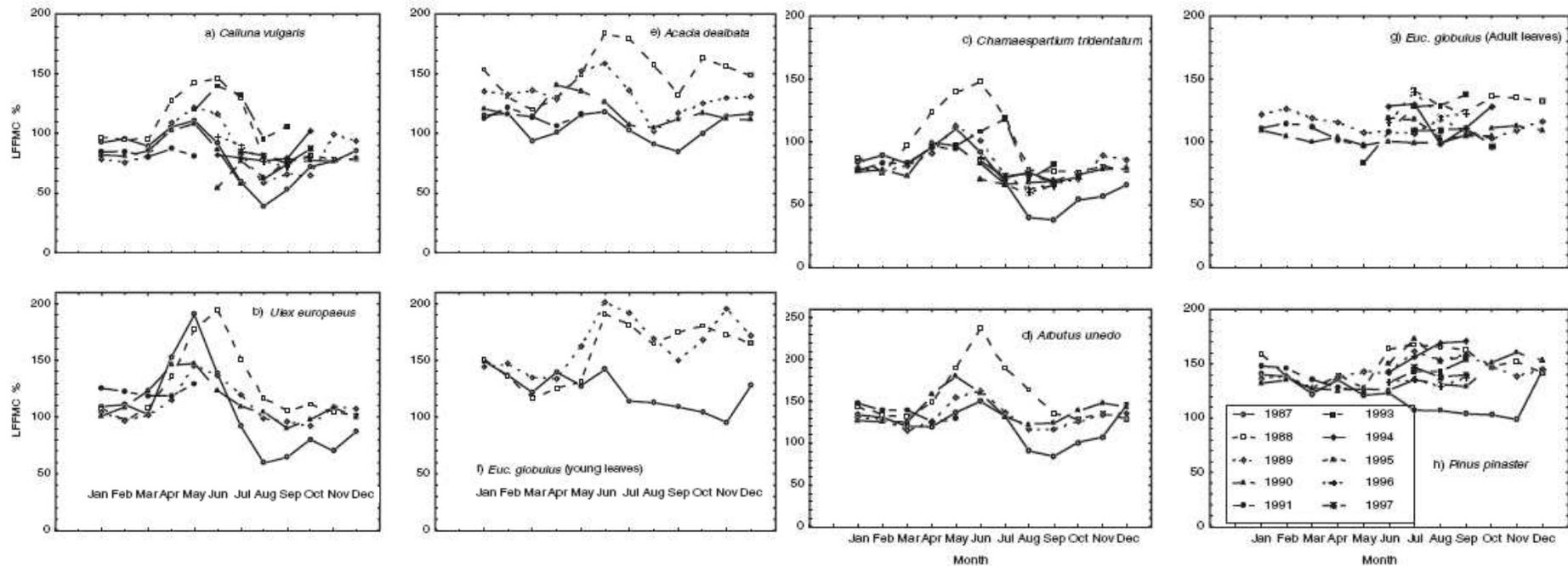
Fig. 4. Observed and predicted values of live fine fuel moisture ( $M$ ) in *C. mospeliensis* at two locations in Catalonia using validation period. Both the predictions by models 1 and 2 are shown: (a) Caldes de Malavella and (b) Port de la Selva.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Fenologia do TH dos combustíveis vivos

Estado de desenvolvimento da vegetação	Teor de água (%)
Folhagem tenra, plantas anuais no princípio do ciclo de crescimento.	300
Folhagem em maturação, mas ainda em desenvolvimento, com turgescência plena.	200
Folhagem madura, novo crescimento completo e comparável à folhagem perene antiga.	100
Começo do repouso vegetativo e da mudança de côr. Algumas folhas podem já ter caído.	50
Completamente seca.	< 30, considerado como combustível morto

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL



- Valores médios mensais (1987 – 1997) do TH de 8 combustíveis na Lousã.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

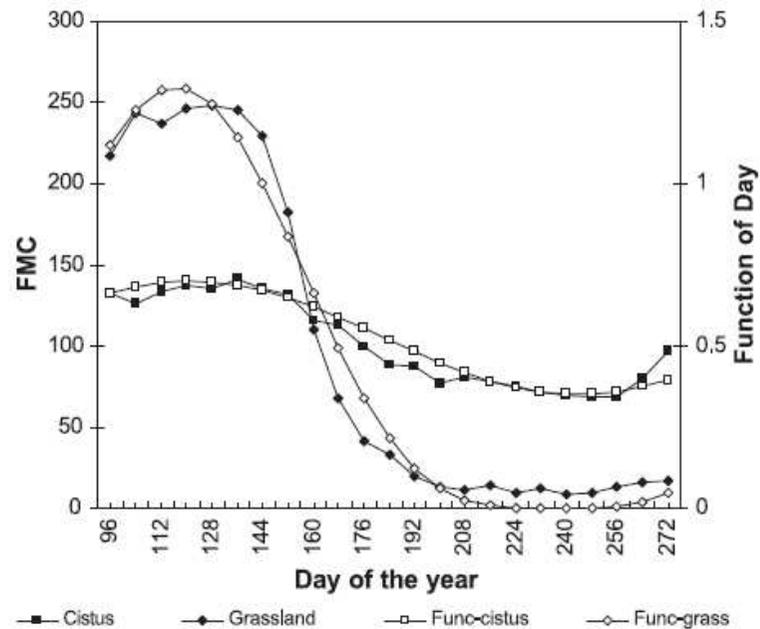


Fig. 3. Average values of FMC for grassland and *C. ladanifer* in 6 years of Cabañeros field data. The function of the Day of the Year for each vegetation type is also included.

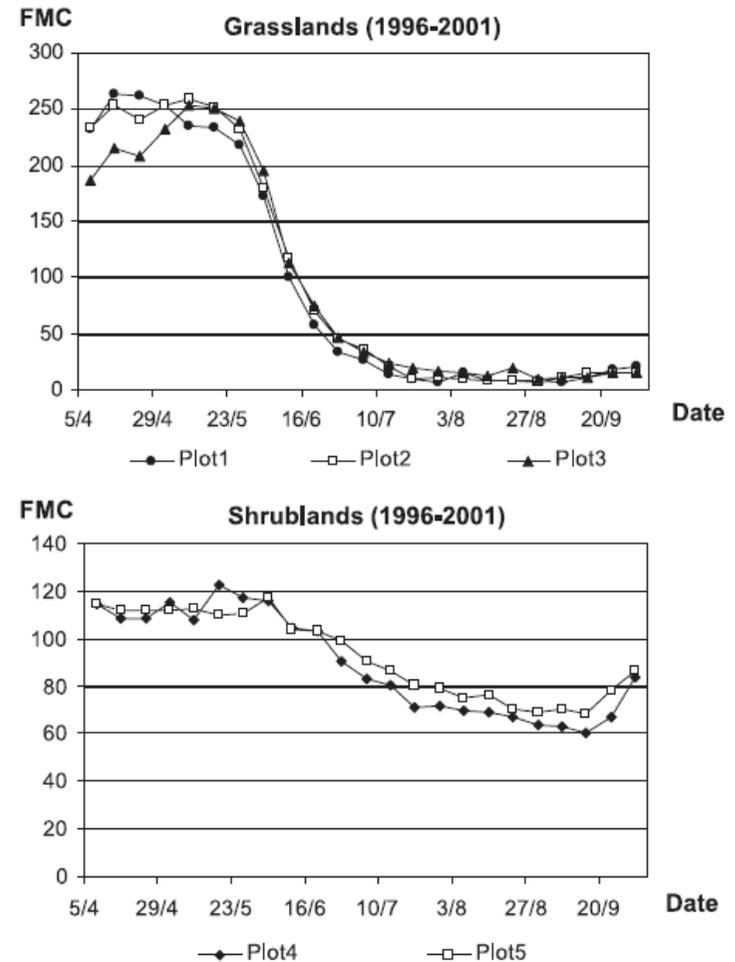


Fig. 4. Average temporal evolution of FMC for grassland and *C. ladanifer* in the different field plots of the Cabañeros National Park.

## A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Todas as folhas das **caducifólias** são do ano corrente, mantendo relativamente alto TH durante toda a época de crescimento.
- Nas **perenifólias**, as folhas podem durar vários anos e as mais velhas terão baixo TH durante a época de crescimento.
- A folhagem de anos anteriores ao corrente, mais seca, pode constituir 80% da biomassa foliar nalgumas perenifólias.
- As **herbáceas anuais** são, de todos os combustíveis, a vegetação mais sensível às variações sazonais e de mais curto prazo. As **herbáceas perenes** têm sistemas radicais mais fortes e profundos, pelo que são menos sensíveis às variações de humidade e têm um período mais longo de secagem estival.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Há vários métodos para determinar o TH dos combustíveis vegetais vivos e mortos:
  - Método directo
    - Amostragem no campo e secagem em estufa (combustíveis mortos e vivos).
  - Métodos indirectos
    - Estimativa a partir de dados meteorológicos (combustíveis mortos e vivos).
    - Estimativa a partir da reflectância espectral (combustíveis vivos).
- O objectivo dos métodos indirectos é, uma vez calibrados, dispensar as medições destrutivas, caras e trabalhosas.

## A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL



- 4 varas para medição do teor de humidade do combustível de 10h de tempo de resposta. Tem  $\varnothing$  1.27 cm e pesam 100g quando secas.

- Construíram-se e resolveram-se numericamente equações para descrever a transferência de calor e humidade à superfície e no interior de uma vara de 10hTR.



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Desenvolveu-se um modelo de predição do TH de varas de combustível morto de 10hTR, com base em observações da temperatura do ar, humidade relativa, insolação e precipitação.

Fig. 5. Burnsville, N.C., moisture content fraction (average of five arrays of 10-h sticks) as observed (broken line) and predicted (solid line) versus time expressed as calendar date.

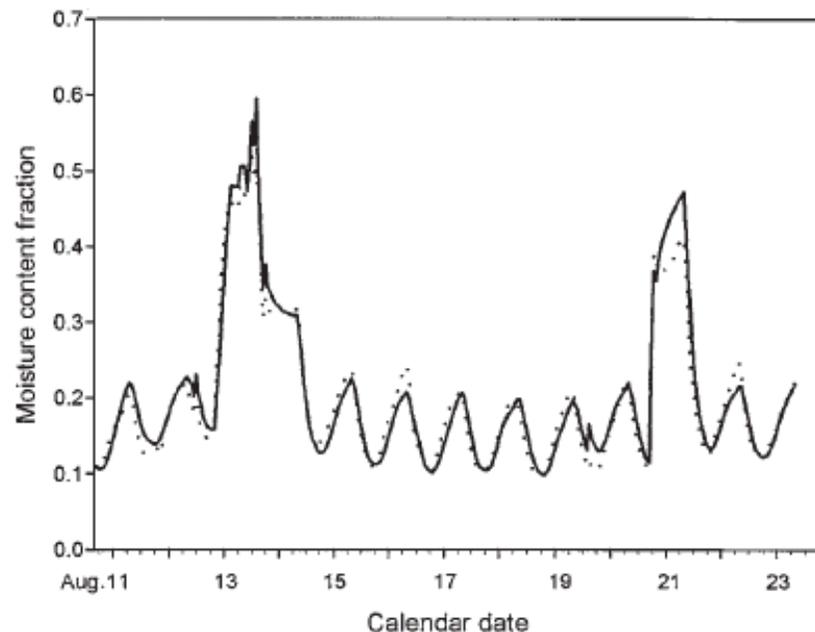
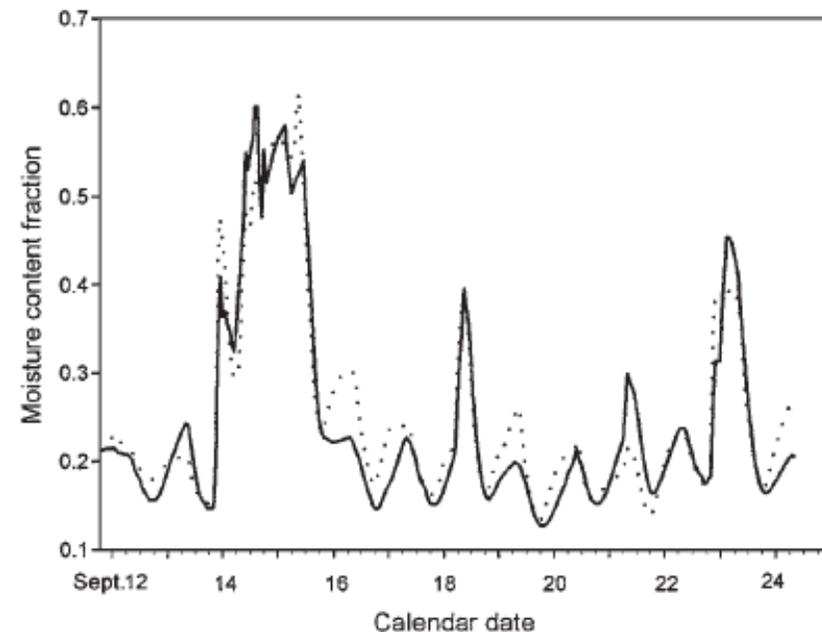
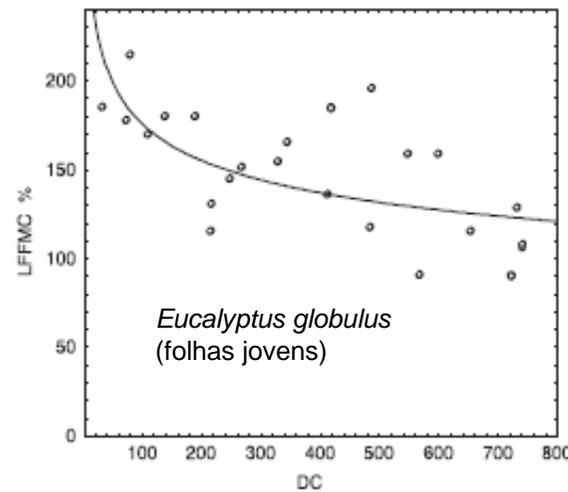
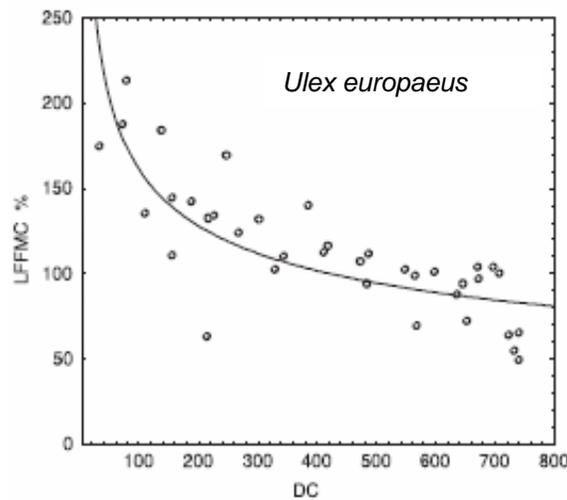
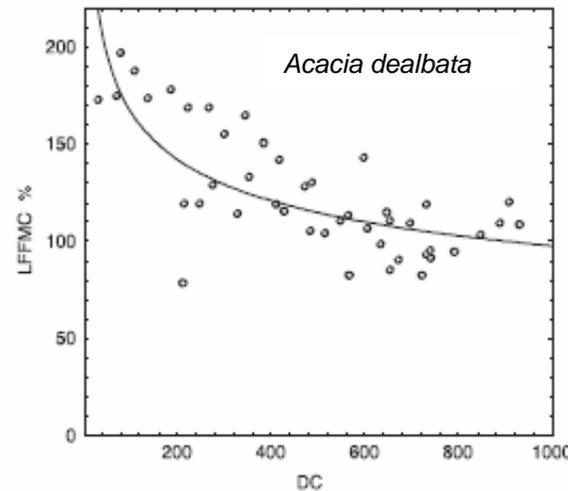
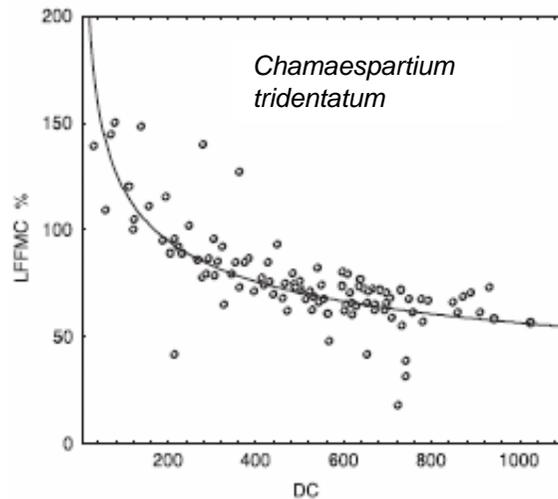


Fig. 6. Mio, Mich., moisture content fraction (average of five arrays of 10-h sticks) as observed (broken line) and predicted (solid line) versus time expressed as calendar date.

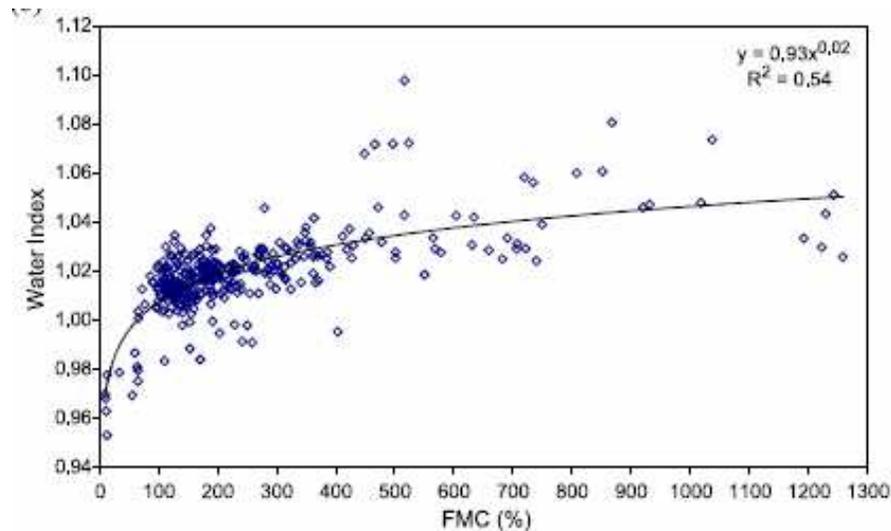


# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

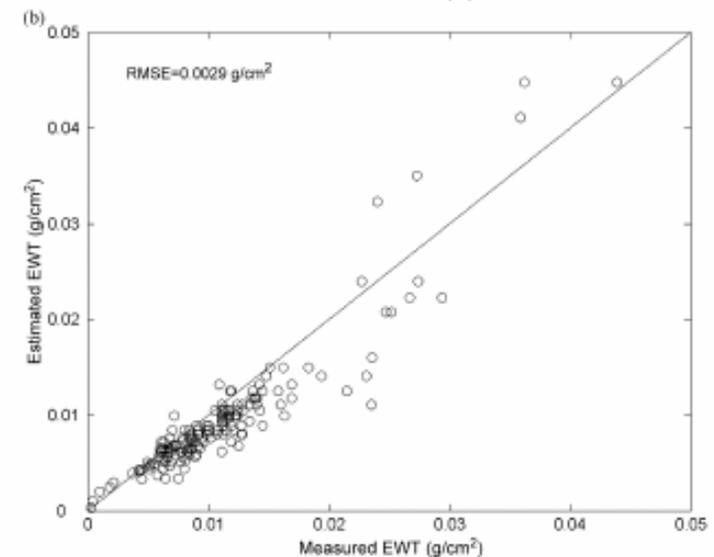
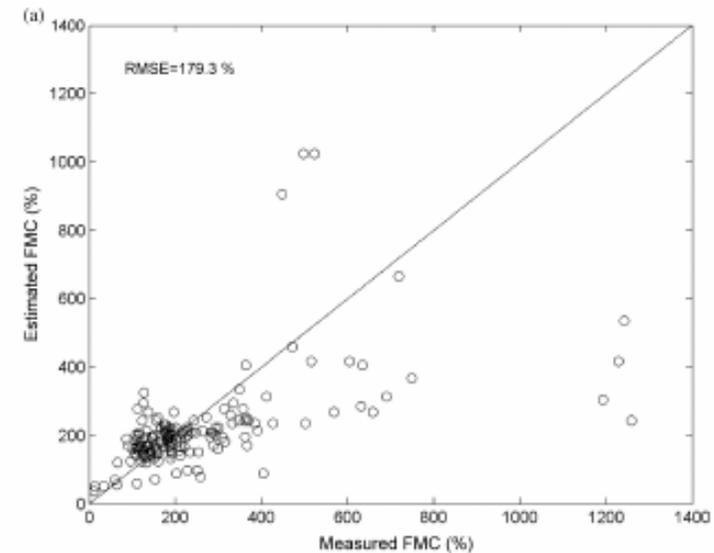


- No Verão, a resposta lenta do TH de combustíveis vivos às condições meteorológicas, nomeadamente à precipitação, é bem descrito pelo código de seca (DC).
- Dados da Lousã, 1987-1997.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL



- Relação entre o TH do combustível fino vivo e índices de reflectância espectral, que podem ser medidos no terreno, à escala da planta individual, ou por satélite, à escala da paisagem.



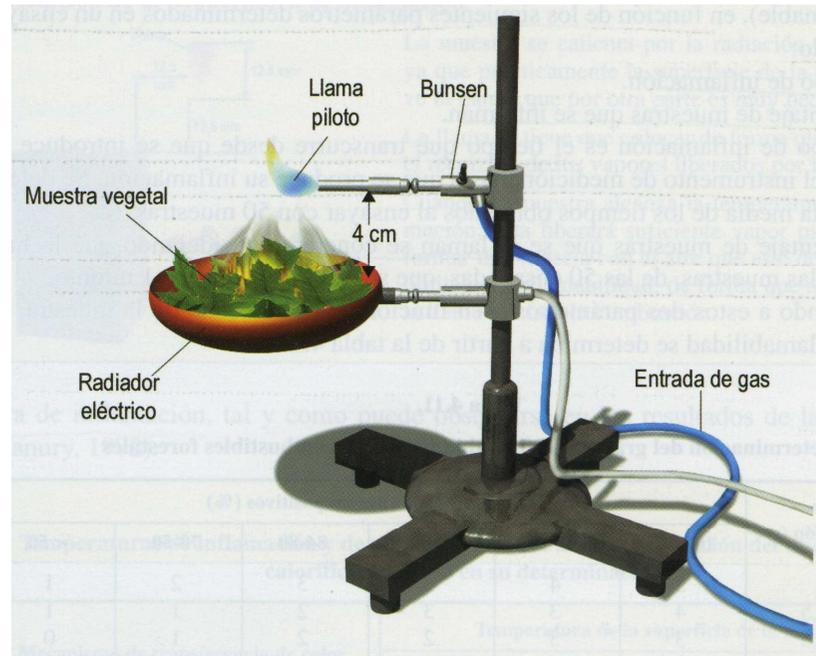
# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- As propriedades intrínsecas e extrínsecas dos combustíveis determinam a possibilidade de que eles entrem em ignição, o comportamento do fogo e o calor libertado.
- Do conjunto destas características emergem duas novas propriedades:
  - Inflamabilidade
  - Combustibilidade
- A **inflamabilidade** define-se como a facilidade com que um dado material entra em combustão, quando posto em contacto com uma fonte de ignição.
- A **combustibilidade** é a facilidade que um combustível tem de continuar a arder, uma vez iniciada a combustão.

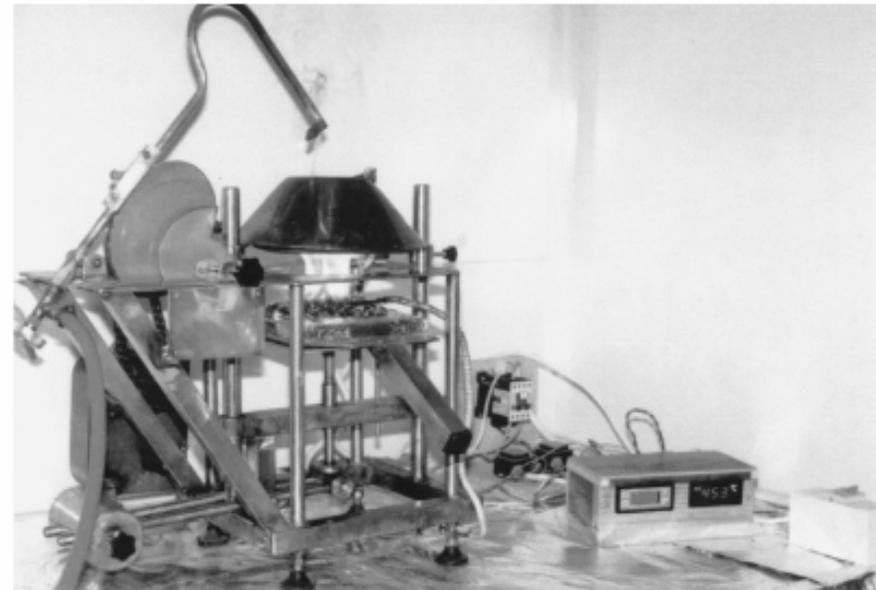
# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- O grau de inflamabilidade dos combustíveis vegetais costuma quantificar-se numa escala ordinal, com 3 a 5 níveis, em função do:
  - Tempo de inflamação
  - % de amostras inflamadas
- O **tempo de inflamação** é o tempo que decorre desde que se coloca a amostra no aparelho de medição, até que ocorra a inflamação.
- A **% de amostras inflamadas** calcula-se contando o nº de amostras que se inflamam em menos de 1 minuto, de um total de 50 testadas.
- Os ensaios sujeitam 50 amostras, com  $1 \pm 0,1\text{g}$  a um foco calorífico de 500 W de potência ( $7 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), colocando-as directamente sobre a superfície radiante.
- A frequência de inflamação é praticamente nula quando  $\text{TH} > 150\text{-}200\%$ .

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL



Instrumentação para determinação experimental da inflamabilidade.



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

INFLAMABILIDADE (INIA, Espanha)		INFLAMABILIDADE (INRA, França)	
Espécies muito inflamáveis todo o ano	Espécies muito inflamáveis no Verão	Muito forte	Bastante forte
<i>Calluna vulgaris</i>	<i>Anthyllis cytisoides</i>	<i>Erica scoparia</i>	<i>Quercus pubescens</i>
<i>Erica arborea</i>	<i>Brachypodium ramosum</i>	<i>Erica arborea</i>	<i>Pinus pinaster</i>
<i>Erica australis</i>	<i>Cistus ladanifer</i>	<i>Calluna vulgaris</i>	<i>Buxus sempervirens</i>
<i>Erica herbacea</i>	<i>Lavandula stoechas</i>	<i>Quercus suber</i>	<i>Juniperus phoenicea</i>
<i>Erica scoparia</i>	<i>Pinus pinaster (caruma)</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Cupressus sempervirens</i>
<i>Eucalyptus globulus (folhada)</i>	<i>Quercus suber</i>	<i>Pinus halepensis</i>	
<i>Phillyrea angustifolia</i>	<i>Rosmarinus officinalis</i>	<i>Thymus sp.</i>	
<i>Pinus halepensis (caruma)</i>	<i>Rubus idaeus</i>	<i>Ulex sp.</i>	
<i>Quercus ilex</i>	<i>Stipa tenacissima</i>		
<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Ulex parviflorus</i>		
	<i>Ulex europaeus</i>		

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

## INFLAMABILIDADE (INIA, Espanha)

### Espécies moderadamente ou pouco inflamáveis

*Arbutus unedo*  
*Atriplex halimus*  
*Buxus sempervirens*  
*Cistus albidus*  
*Cistus laurifolius*  
*Cistus salvifolius*  
*Halimium sp.*  
*Juniperus oxycedrus*  
*Olea europaea*  
*Pinus sylvestris (caruma)*  
*Pistacia lentiscus*

## INFLAMABILIDADE (INRA, França)

### Moderada

*Cistus monspelliensis*  
*Cytisus triflora*  
*Quercus coccifera*  
*Cupressus arizonica*  
*Juniperus oxycedrus*  
*Rosmarinus officinalis*  
*Viburnum tinus*

### Baixa

*Cedrus sp.*  
*Arbutus unedo*

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

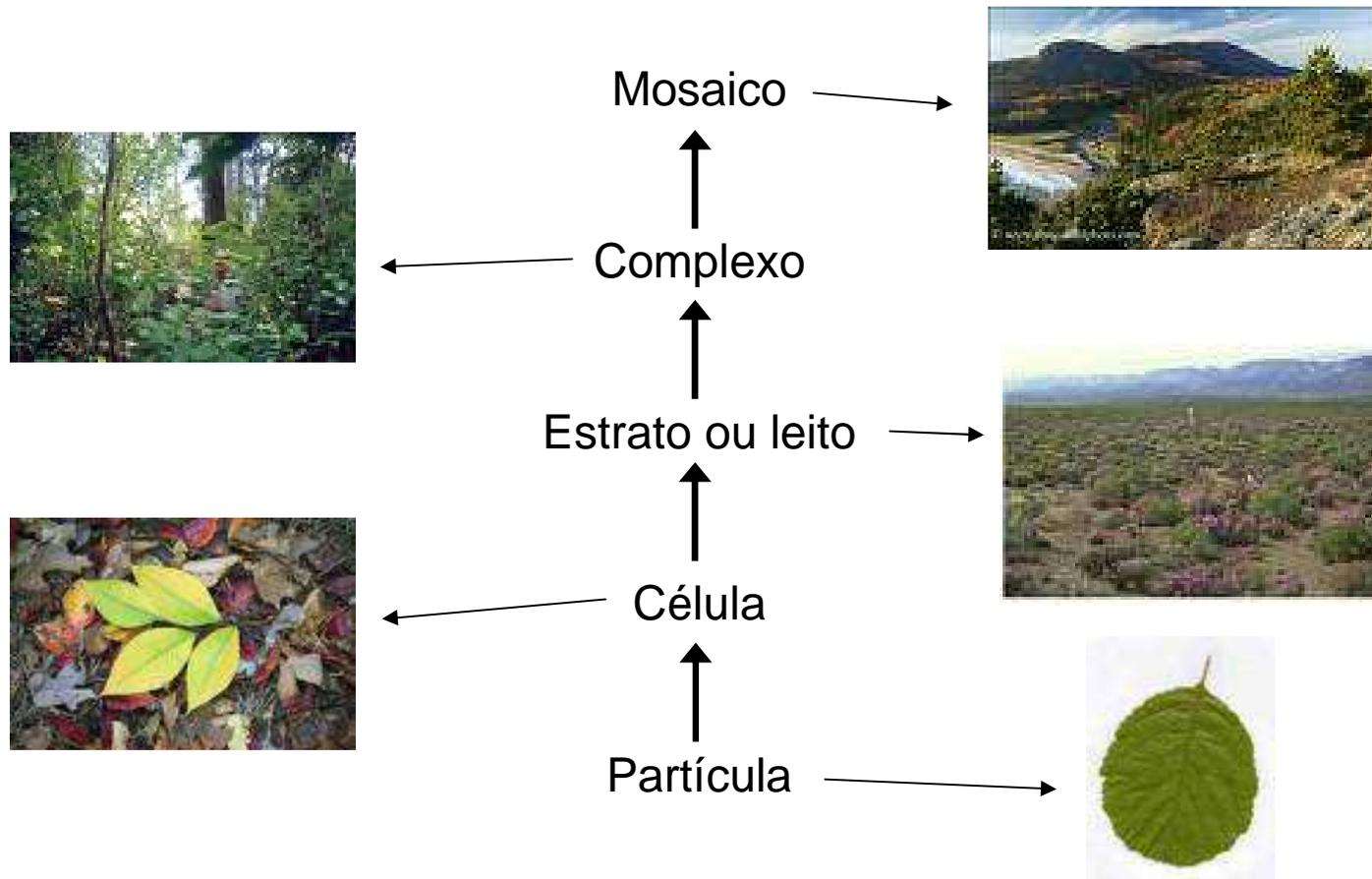
**TABLE 1**

**Flammability classification, regression models of time-to-ignition vs moisture content, and moisture of extinction of dominant Mediterranean natural fuels**

Flammability group	Natural fuels species (common names)	Regression models ( $y = \alpha + \beta x$ )		$R^2$ (%)	Moisture of extinction (% o.d.w.)
		$\beta$	$\alpha$		
I: Less flammable	<i>Calicotome villosa</i> (thorny broom)	0.721	20.081	80	> 63
	<i>Tamarix smyrnensis</i> (tamarisk)	0.687	18.160	91	> 78
	<i>Sarcopoterium spinosum</i> (burnet)	0.677	11.003	81	50–70
	<i>Juniperus oxycedrus</i> (juniper)	0.532	16.698	86	90–140
	<i>Nerium oleander</i> (oleander)	0.520	13.981	80	> 70
	<i>Platanus orientalis</i> (plane)	0.509	6.404	93	40–60
	<i>Castanea sativa</i> (chestnut)	0.503	8.906	94	85–120
II: moderately flammable	<i>Cistus salvifolius</i> (sage cistus)	0.473	13.981	85	> 112
	<i>Phlomis fruticosa</i> (Jerusalem sage)	0.470	9.573	94	> 82
	<i>Cistus creticus</i> (gum cistus)	0.443	6.053	89	< 105
	<i>Ceratonia siliqua</i> (carob tree)	0.360	7.039	88	60–118
	<i>Quercus coccifera</i> (kermes oak)	0.359	7.682	82	> 80
	<i>Pistacia lentiscus</i> (lentisc)	0.356	4.212	77	80–85
III: flammable	<i>Cupressus sempervirens</i> (cypress)	0.327	6.592	76	> 117
	<i>Pinus brutia</i> (brute pine)	0.322	5.018	82	81–130
	<i>Pinus halepensis</i> (Aleppo pine)	0.311	5.246	81	89–138
	<i>Arbutus unedo</i> (strawberry tree)	0.306	7.981	84	58–96
	<i>Erica arborea</i> (heath)	0.298	13.273	80	> 87
	<i>Pistacia terebinthus</i> (terebinth)	0.280	5.770	73	> 115
	<i>Quercus pubescens</i> (valonia oak)	0.277	11.512	90	> 93
	<i>Olea europea</i> (olive)	0.251	9.261	92	70–120
	<i>Quercus ilex</i> (holm oak)	0.249	8.884	94	> 67
IV: extremely flammable	<i>Laurus nobilis</i> (laurel)	0.163	4.266	76	> 123
	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> (gumtree)	0.149	4.089	78	> 140

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Os combustíveis descrevem-se através das suas propriedades termofísicas e termoquímicas, segundo uma hierarquia de níveis de organização:



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- **Partícula:** unidade elementar, o menor objecto constituinte, e.g. folha, agulha, raminho seco caído. Descrevem-se sobretudo pelas propriedades intrínsecas – PCI, teor de minerais, densidade, razão superfície/volume.
- **Célula:** menor volume de partículas representativo do tipo de combustível.
- **Estrato ou leito:** agregações de células, descritas em termos de propriedades extrínsecas – carga, razão vivo/morto, profundidade, compactação, densidade aparente, teor de humidade, distribuição da carga por classes de dimensão.
- **Complexo:** conjunto de estratos, tipicamente solo orgânico, estrato superficial e estrato aéreo. A **continuidade vertical** emerge como descritor importante.
- **Mosaico:** caracteriza a heterogeneidade espacial dos combustíveis à escala da paisagem. Fundamental para estudar o comportamento dos grandes incêndios. A **continuidade horizontal** emerge como descritor importante.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A tipificação da combustibilidade em função do tipo e estado da vegetação faz-se recorrendo a **modelos de combustível**.
- Um modelo de combustível é uma descrição estilizada, simplificada, de um combustível, para uso num modelo matemático de comportamento do fogo; é um conjunto de números que descreve o combustível para o modelo de comportamento do fogo.
- O conjunto de modelos de combustível mais utilizados para prever o comportamento do fogo foi desenvolvido na década de 1970, no então Northern Forest Fire Laboratory (NFFL) do USDA Forest Service.
- Comporta um total de 13 modelos, divididos por 4 grandes grupos:
  - vegetação herbácea
  - matos
  - folhada
  - resíduos de exploração

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A **classificação** dos combustíveis inclui três tarefas distintas
  - **Caracterização**: identificação dos parâmetros físicos e químicos fundamentais para descrever as partículas, leitos e complexos de combustível.
  - **Inventariação**: medição ou amostragem destes parâmetros, no terreno.
  - **Avaliação**: estimativa da probabilidade de ignição e do comportamento potencial do fogo no combustível inventariado. Pode ser mais quantitativa, recorrendo a modelos matemáticos e a cenários meteorológicos, ou ser mais qualitativa e subjectiva, baseada na opinião de especialistas.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

## DESCRIÇÃO QUALITATIVA DOS MODELOS DE COMBUSTÍVEL

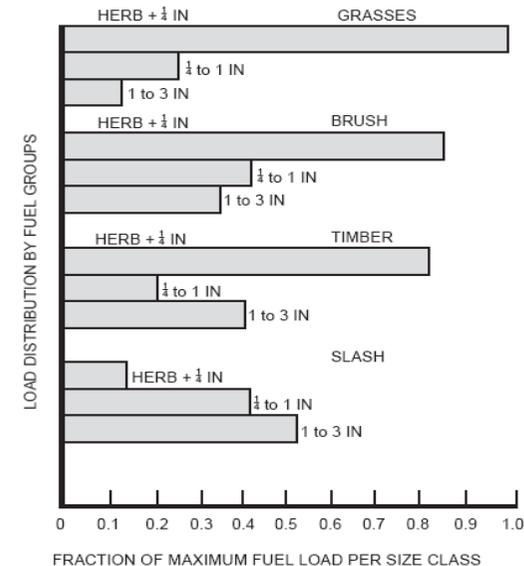
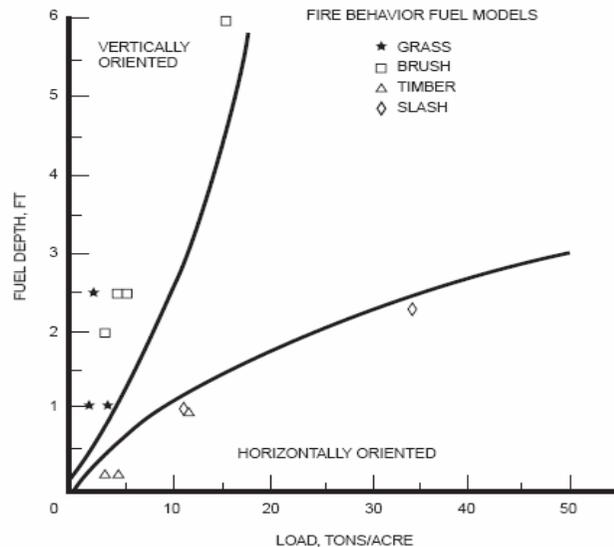
Grupo	Modelo #	Descrição
Vegetação herbácea	1	Erva fina, seca e baixa, que cobre completamente o solo. Podem aparecer algumas plantas lenhosas dispersas ocupando menos de um terço da superfície. Quantidade de combustível (peso seco): 1-2 t/ha.
	2	Erva fina, seca e baixa, que cobre completamente o solo. As plantas lenhosas dispersas cobrem de um a dois terços da superfície, mas a propagação do fogo faz-se pela erva. Quantidade de combustível (peso seco): 5-10 t/ha.
	3	Erva grosseira, densa, seca e alta (mais de um metro). É o modelo típico das savanas e das zonas pantanosas com clima temperado-quente. Os campos de cereais são representativos deste modelo. Pode haver algumas plantas lenhosas dispersas. Quantidade de combustível (peso seco): 4-6 t/ha.
Matos	4	Matagal ou plantação jovem muito densa, de mais de 2 m. de altura; com ramos morto no seu interior. Propagação do fogo pelas copas das plantas. Quantidade de combustível (peso seco): 25-35 t/ha.
	5	Matagal denso e verde, de menos de 1 m. de altura. Propagação do fogo pela folhada e erva. Quantidade de combustível (peso seco): 5-8 t/ha.
	6	Parecido com o modelo 5, mas com espécies mais inflamáveis ou com restos de corte e com plantas maiores. Propagação do fogo com ventos moderados a fortes. Quantidade de combustível (peso seco): 10-15 t/ha.
	7	Matagal de espécies muito inflamáveis; de 0,5 a 2 m. de altura, situado como sub-bosque em matas de coníferas. Quantidade de combustível (peso seco): 10-15 t/ha.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

## DESCRIÇÃO QUALITATIVA DOS MODELOS DE COMBUSTÍVEL

Grupo	Modelo #	Descrição
Folhada sob arvoredo	8	Floresta densa, sem mato no sub-bosque. Propagação do fogo pela folhada muito compacta. As matas densas de <i>Pinus sylvestris</i> ou de <i>Fagus</i> são exemplos representativos. Quantidade de combustível (peso seco): 10-12 t/ha.
	9	Parecido com o modelo 8, mas com folhada menos compacta, formada por agulhas longas e rígidas ou por folhas grandes. São exemplos as matas de <i>Pinus pinaster</i> , de <i>Castanea</i> ou de <i>Quercus pyrenaica</i> . Quantidade de combustível (peso seco): 7-9 t/ha.
	10	Floresta com grande quantidade de lenha e árvores caídas, em consequência de vendavais, pragas intensas, etc. Quantidade de combustível (peso seco): 30-35 t/ha.
Sobrantes de exploração	11	Floresta aberta ou fortemente desbastada. Restos de poda ou desbaste, podendo estar dispersos, intercalados com rebentação de plantas herbáceas. Quantidade de combustível (peso seco): 25-30 t/ha.
	12	Predomínio dos resíduos relativamente ao arvoredo. Restos de poda ou desbaste cobrindo todo o solo. Quantidade de combustível (peso seco): 50-80 t/ha.
	13	Grandes acumulações de sobrantes de grande dimensão e pesados, cobrindo todo o solo. Quantidade de combustível (peso seco): 100-150 t/ha.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL



- A erva e o mato têm **orientação** predominantemente **vertical**, i.e. quando a carga aumenta o volume aumenta. A folhada e os resíduos têm **orientação** predominantemente **horizontal**, i.e. quando a carga aumenta, aumenta a compactação do leito de combustível.
- A predominância dos combustíveis finos diminui da erva para a folhada. Nos resíduos de exploração a maior proporção de biomassa é de material grosseiro, de 2.5 - 7.5cm Ø.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

## DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DOS MODELOS DE COMBUSTÍVEL

Modelo	Descrição	Carga de combustível (t.ha <sup>-1</sup> )					Altura (m)	PCI <sub>0</sub> (kJ.kg <sup>-1</sup> )	H <sub>ext</sub> (%)
		1h	10h	100h	Vivo	Total			
<b>Vegetação herbácea</b>									
1	Erva baixa	1,6	---	---	---	1,6	0,3	18.900	12
2	Erva c/ arbustos	4,5	2,2	1,1	1,1	8,9	0,3	18.900	15
3	Erva alta	6,7	---	---	---	6,7	0,75	20.580	25
<b>Matos</b>									
4	Mato alto contínuo	11,2	9,0	4,5	11,2	35,9	2,0	21.840	20
5	Mato verde	2,2	1,1	---	4,5	7,8	0,6	21.840	20
6	Mato + inflamável	3,4	5,6	4,5	---	13,5	0,75	20.580	25
7	Sub-bosque florestal	2,5	4,2	3,4	0,83	10,9	0,75	21.000	40
<b>Folhada</b>									
8	Folhada compacta	3,4	2,2	5,6	---	11,2	0,06	18.900	30
9	Folhada fofa	6,5	0,9	0,3	---	7,7	0,06	18.900	25
10	Ramos mortos + regeneração	6,7	4,5	11,2	4,5	26,9	0,30	18.900	25
<b>Resíduos de exploração</b>									
11	Resíduos ligeiros	3,4	10,1	12,3	---	25,8	0,3	18.900	15
12	Resíduos médios	9,0	31,4	37,0	---	77,4	0,75	18.900	20
13	Resíduos pesados	15,7	51,6	62,8	---	120,1	1,00	18.900	25

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

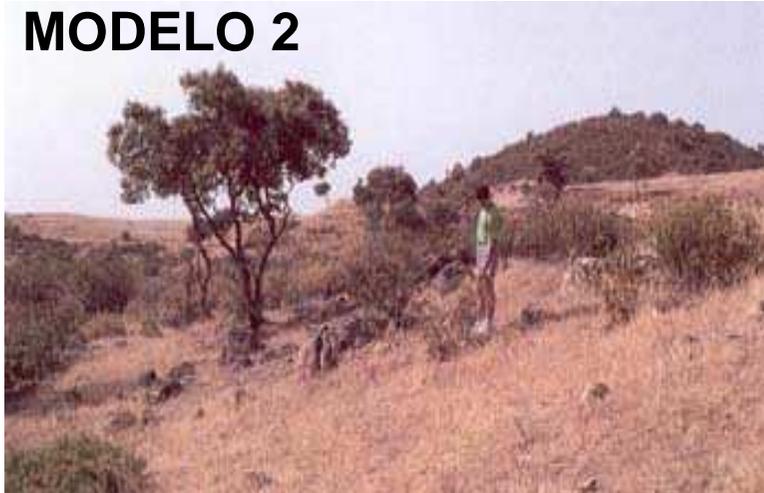
**MODELO 1**



Erva fina, seca e baixa, que cobre completamente o solo. Podem aparecer algumas plantas lenhosas dispersas ocupando menos de um terço da superfície. Quantidade de combustível (peso seco): 1-2 t/ha.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

## MODELO 2



Erva fina, seca e baixa, que cobre completamente o solo. As plantas lenhosas dispersas cobrem de um a dois terços da superfície, mas a propagação do fogo faz-se pela erva. Quantidade de combustível (peso seco): 5-10 t/ha.

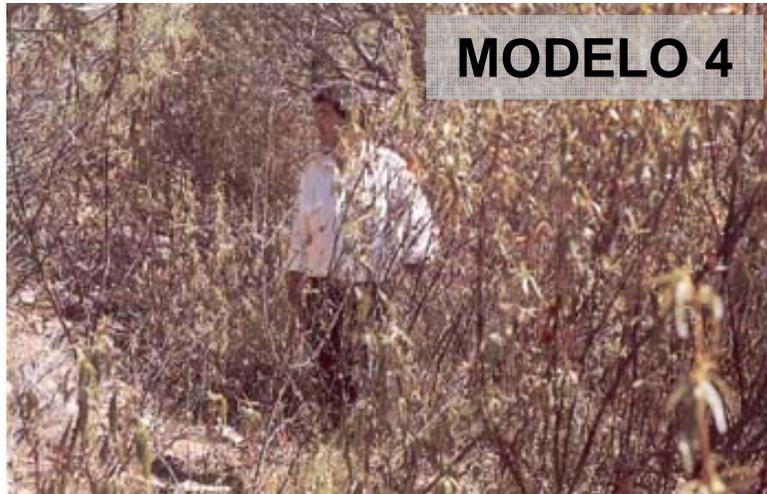
# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

## MODELO 3



Erva grosseira, densa, seca e alta (mais de 1m). É o modelo típico das savanas e das zonas pantanosas com clima temperado-quente. Os campos de cereais são representativos deste modelo. Pode haver algumas plantas lenhosas dispersas. Quantidade de combustível (peso seco): 4-6 t/ha.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

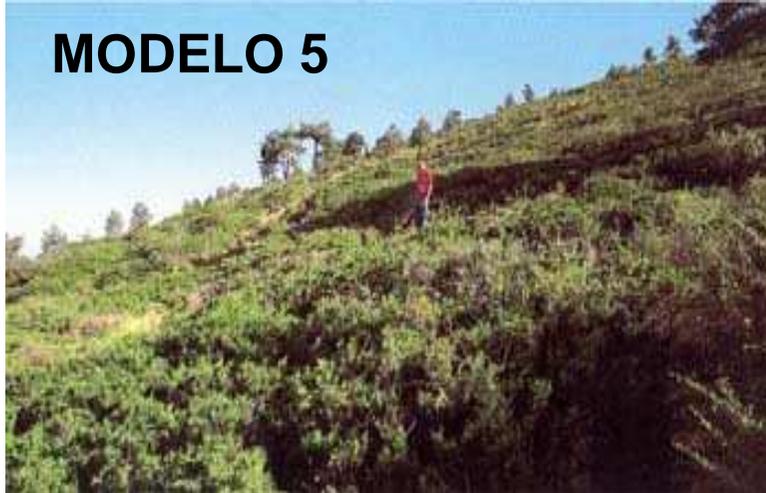


**Matagal ou  
plantação  
jovem muito  
densa, de mais  
de 2m de altura,  
com ramos  
mortos no seu  
interior.  
Propagação do  
fogo pelas  
copas das  
plantas.  
Quantidade de  
combustível  
(peso seco):  
25-35 t/ha.**



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

## MODELO 5



Matagal denso e verde, de menos de 1 m de altura. Propagação do fogo pela folhada e erva. Quantidade de combustível (peso seco): 5-8 t/ha.



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

## MODELO 6



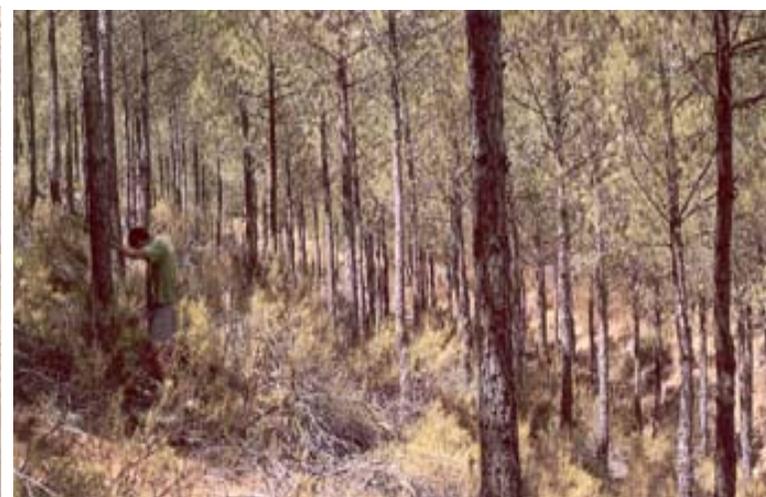
Parecido com o modelo 5, mas com espécies mais inflamáveis ou com restos de corte e com plantas maiores. Propagação do fogo com ventos moderados a fortes. Quantidade de combustível (peso seco): 10-15 t/ha.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

**MODELO 7**



**Matagal de espécies muito inflamáveis; de 0,5 a 2m de altura, situado como sub-bosque em matas de coníferas. Quantidade de combustível (peso seco): 10-15 t/ha.**



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL.

**MODELO 8**

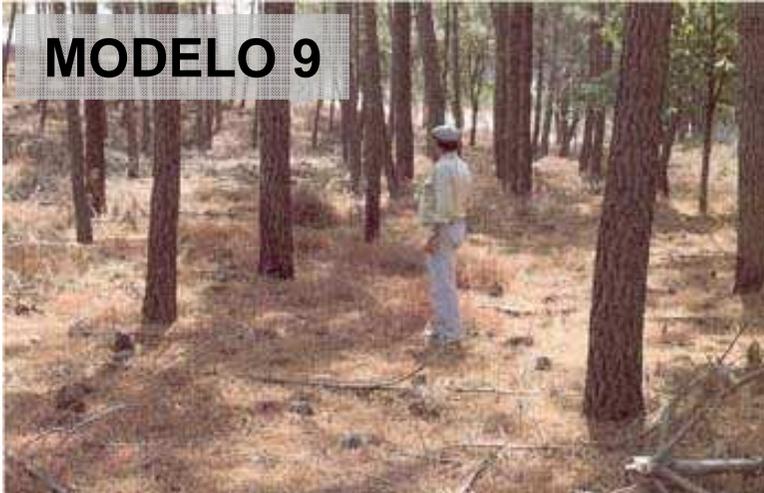


Floresta densa, sem mato no sub-bosque.  
Propagação do fogo pela folhada muito compacta.  
As matas densas de *Pinus sylvestris* ou de *Fagus sylvatica* são exemplos representativos.  
Quantidade de combustível (peso seco): 10-12 t/ha.



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

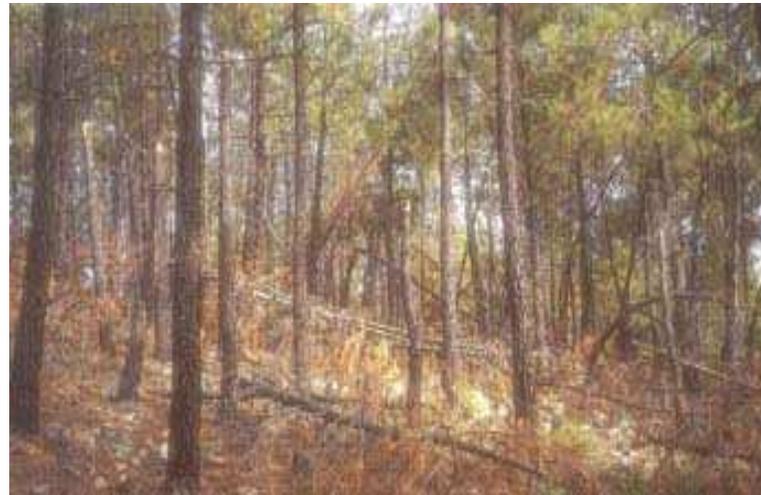
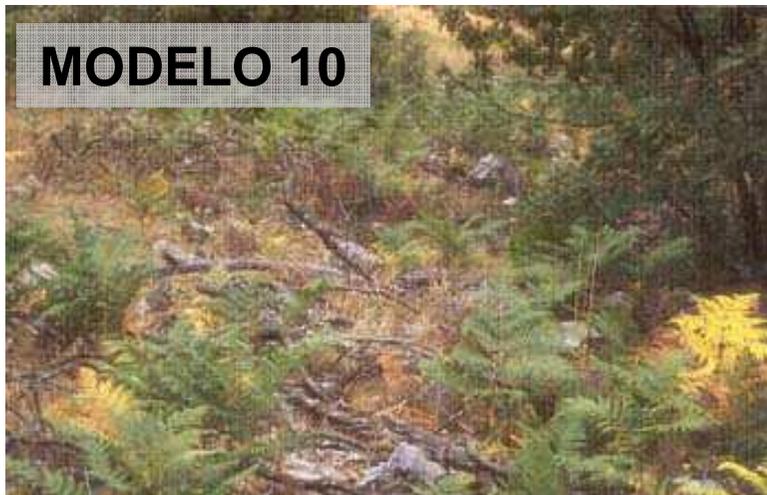
**MODELO 9**



Parecido com o modelo 8, mas com folhada menos compacta, formada por agulhas longas e rígidas ou por folhas grandes. São exemplos as matas de *Pinus pinaster*, de *Castanea sativa* ou de *Quercus pyrenaica*. Quantidade de combustível (peso seco): 7-9 t/ha.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

**MODELO 10**



**Floresta com grande quantidade de lenha e árvores caídas, em consequência de vendavais, pragas intensas, etc. Quantidade de combustível (peso seco): 30-35 t/ha.**



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

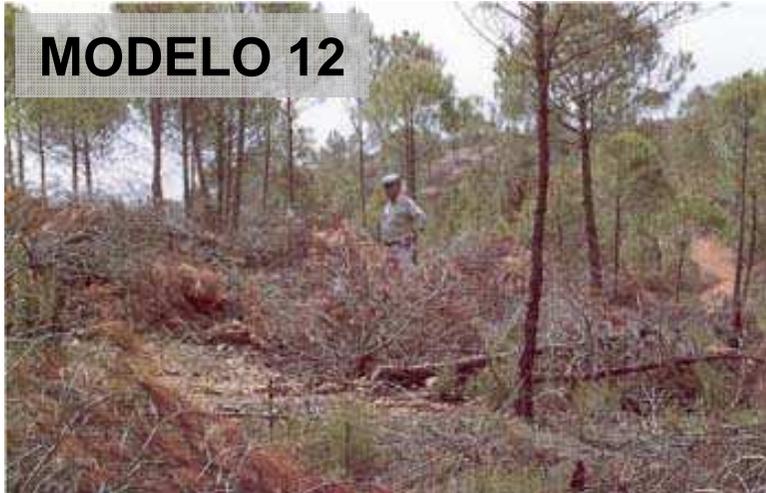


Floresta aberta ou fortemente desbastada. Restos de poda ou desbaste, podendo estar dispersos, intercalados com rebentação de plantas herbáceas. Quantidade de combustível (peso seco): 25-30 t/ha.



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

**MODELO 12**



**Predomínio dos resíduos relativamente ao arvoredo. Restos de poda ou desbaste cobrindo todo o solo. Quantidade de combustível (peso seco): 50-80 t/ha.**



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

**MODELO 13**



Grandes acumulações de sobranes de grande dimensão e pesados, cobrindo todo o solo. Quantidade de combustível (peso seco): 100-150 t/ha.



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

■ Correspondência entre modelos de combustível e tipos de coberto vegetal comuns em Portugal:

- **Modelo 1:** Zonas de pastoreio queimadas frequentemente.
- **Modelo 2:** Montado.
- **Modelo 3:** Searas, alguns sapais (*Carex* sp.).
- **Modelo 4:** Áreas agrícolas abandonadas há muito tempo. Regeneração pós-fogo de pinhal, misturada com mato.
- **Modelos 5 e 6:** Etapas na progressão desde o incêndio até ao modelo 4.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Correspondência entre modelos de combustível e tipos de coberto vegetal comuns em Portugal:
  - **Modelo 7:** Matas pouco densas, sub-bosque com regeneração natural das espécies arbóreas, misturada com mato.
  - **Modelo 8:** Floresta densa de *Pinus sylvestris* e *Fagus sylvatica*.
  - **Modelo 9:** Floresta densa de *Pinus pinaster* e *Quercus pyrenaica*.
  - **Modelo 10:** Pouco frequente. Material lenhoso derrubado por vendavais ou fortes nevões, misturado com sub-bosque.
  - **Modelos 11 e 12:** São os modelos de sobrantes mais comuns. O **modelo 13** ocorre raramente.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

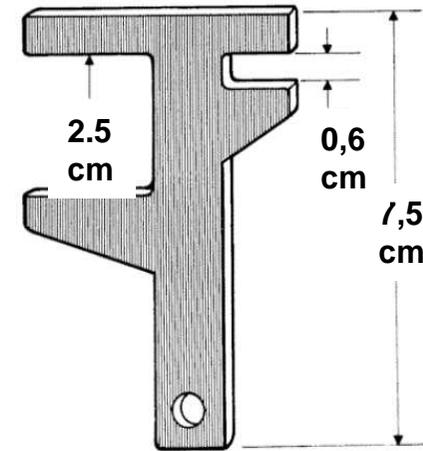
**Table 1. Mean values of the pyric properties of the Mediterranean species that were used in the statistical analysis (raw data matrix)**

Species abbreviations are given inside the parentheses. (Data from Dimitrakopoulos and Panov 2001). SA/V, surface area-to-volume ratio

Species	Heat content (kJ/kg)	Total ash content (%)	Silica-free ash (%)	SA/V (1/m <sup>3</sup> )	Particle density, (kg/m <sup>3</sup> )
<i>Cistus salvaefolius</i> leaves (CISTL)	18 654	7.41	5.32	4449	310
<i>Cistus salvaefolius</i> branches (CISTB)	19 046	2.58	2.32	2228	620
<i>Pistacia lentiscus</i> leaves (PISTL)	20 264	5.06	4.83	3532	540
<i>Pistacia lentiscus</i> branches (PISTB)	18 16	3.66	3.55	606	740
<i>Quercus ilex</i> leaves (QILEXL)	20 690	3.15	2.91	8782	450
<i>Quercus coccifera</i> leaves (QCOCCL)	19 253	5.56	5.40	4141	450
<i>Quercus coccifera</i> branches (QCOCCLB)	18 582	4.25	4.13	854	670
<i>Phlomis fruticosa</i> leaves (PHLOML)	19 233	8.00	6.68	2446	210
<i>Phlomis fruticosa</i> branches (PHLOMB)	19 250	4.16	4.01	745	590
<i>Arbutus unedo</i> leaves (AUNEDL)	21 467	3.81	3.63	6585	570
<i>Arbutus unedo</i> branches (AUNEDB)	19 077	2.35	2.27	598	630
<i>Pinus brutia</i> needles (PBRUTL)	20 625	3.18	2.81	5554	310
<i>Pinus halepensis</i> needles (PHALEPL)	22 137	3.94	3.52	6249	290

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

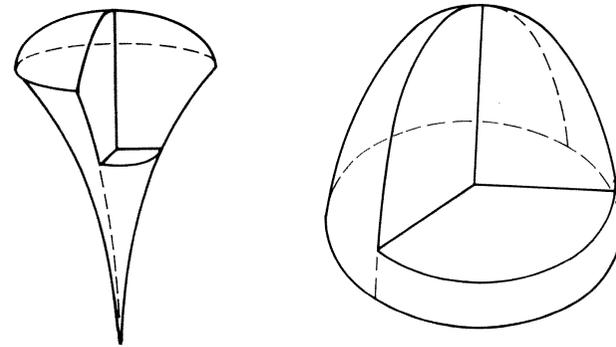
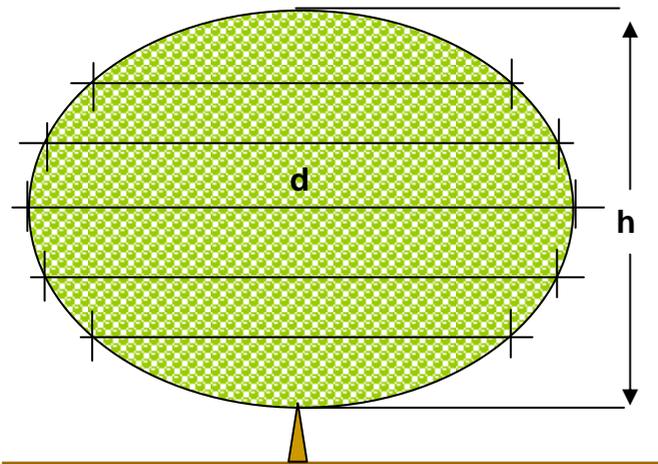
- Estimativa não-destrutiva da **biomassa arbustiva**:
  - correlação com somatório do  $\emptyset$  **basal**
  - correlação com o **volume da copa**
- Para a correlação com o somatório do  $\emptyset$  basal, conta-se o n<sup>o</sup> de caules em cada classe de diâmetro.
- Aplica-se facilmente a arbustos altos. É muito trabalhoso em arbustos pequenos com muitos caules. É bastante exacto, porque há forte correlação entre a “área basal” da planta e a sua biomassa.



Instrumento para determinação expedita da classe de diâmetro dos caules arbustivos.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- O método do volume da copa baseia-se na correlação entre biomassa, área da copa e volume da copa. Este método requer medições de diâmetros da copa e da altura das plantas.
- É bastante rápido e adequado para arbustos de pequenas e médias dimensões.

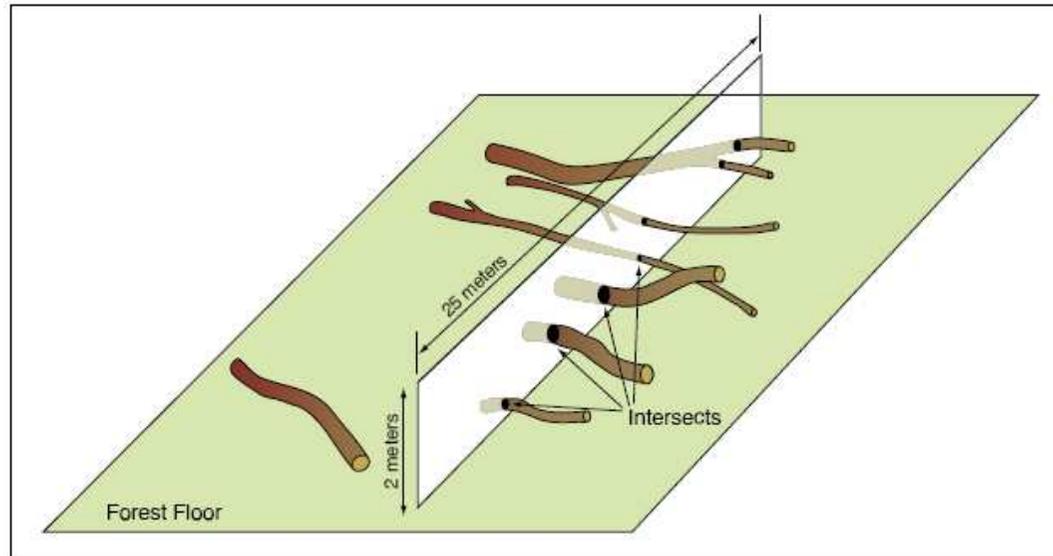


- Há programas de cálculo do volume para formas mais complexas, como o neilóide elíptico ou o parabolóide.

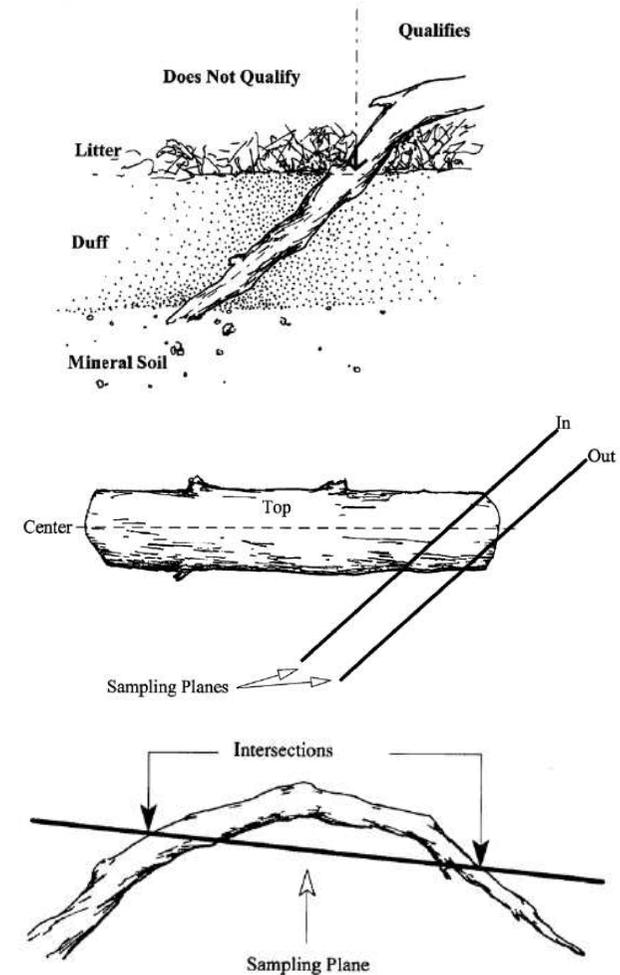
# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- O **material lenhoso caído** inclui troncos e ramos mortos, de árvores e arbustos. As suas cargas variam muito com a produtividade do local e a história do povoamento.
- Para estimar a carga deste combustível usa-se a técnica dos planos de intersecção, não-destrutiva e que tem a mesma base teórica que a dos transectos lineares.
- A técnica requer a contagem das intersecções de pedaços de lenho com um plano vertical e a sua alocação a uma classe de dimensão.
- A partir desta área de intersecção estima-se um volume e calcula-se a biomassa, considerando a gravidade específica do lenho.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL



- Técnica do plano de intersecção e regras de inclusão / exclusão de objectos a amostrar.



## A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A classificação de combustíveis tem servido, sobretudo, para calcular a velocidade de propagação, comprimento da chama e resistência ao controle de fogos em combustíveis de superfície, visando o planeamento quantitativo da supressão.
- Para isto, os 13 modelos estilizados são adequados e suficientes. Mas não aborda a previsão de comportamentos extremos, nem modela efeitos relacionados com o tempo de residência da chama, ou com o calor total libertado pelo fogo.
- O novo **sistema de classificação das características do combustível (FCCS)** estratifica os leitos de combustível em 6 estratos horizontais, que representam ambientes de combustão distintos.
- Cada estrato é desagregado em um ou mais tipos de combustível, com características de combustão semelhantes, chamados **categorias de leito de combustível**.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

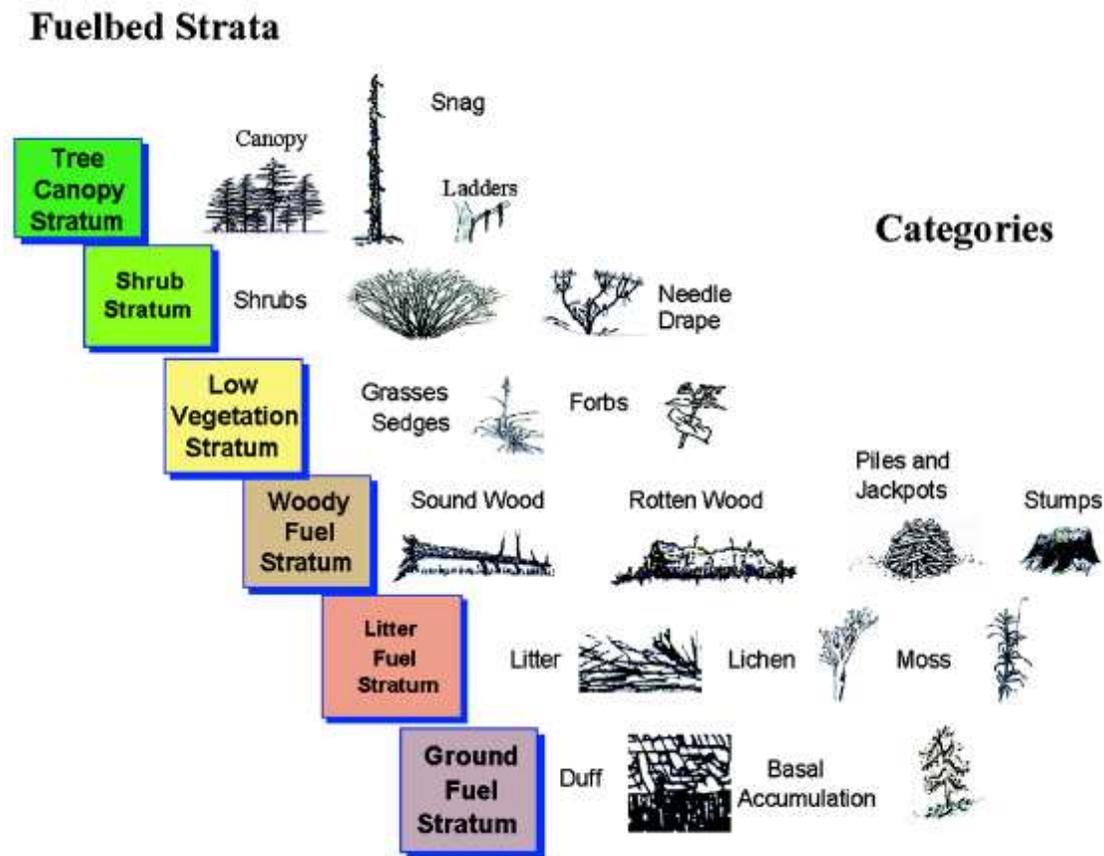


Fig. 3. Fuelbed strata and categories.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

**Table 1. Fuelbed strata and categories, and their physiognomic and gradient variables**

Fuelbed strata	Fuelbed categories	Physiognomic variables	Gradient variables
Canopy	Tree	Canopy structure	Canopy height
		Crown type	Height to live crown Percentage cover
	Snag	Snag class	Diameter Height Snags per acre Significance
Shrub	Ladder fuels	Vegetation type	Percentage cover Height
	Shrub	Foliage type Growth habit Accelerant potential	Percentage live vegetation Significance
	Needle drape		
Low vegetation	Grass/sedge	Leaf blade thickness Growth habit	Percentage cover Height Percentage live vegetation
	Forb		Percentage cover Height
Woody fuel	Sound wood	Size class	Loading (tons/acre) Fuelbed depth
	Rotten wood Stumps	Size class Decay class	Loading (tons/acre) Stems/acre Diameter
	Woody accumulations	Piles, windrows or jackpots Clean or dirty	Height Width Length Number/acre
Moss/lichen/litter	Moss	Moss type	Percentage cover Depth
	Lichen		Percentage cover Depth
	Litter	Litter Type Litter Arrangement	Percentage cover Depth
Ground fuel	Duff	Character	Depth Percentage rotten wood
	Basal accumulation	Accumulation type, e.g. litter, bark slough	Depth Trees per acre affected

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- Há um total de 16 categorias de leito, cada uma descrita por **variáveis fisionómicas e de gradiente**.
- As variáveis fisionómicas representam atributos morfológicos, químicos e fisiológicos. P.ex. a categoria **erva** tem variáveis fisionómicas como a espessura da folha (usada para inferir  $\sigma$ ) e o hábito de crescimento (e.g. **estolonífero** vs **rizomatoso**, que serve para inferir a disposição do combustível).



## A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- As variáveis de gradiente caracterizam a abundância relativa do combustível. A categoria erva inclui variáveis de gradiente como a % de coberto, altura, % de biomassa viva.
- Com esta informação sobre características do combustível (var. fisionómicas) e abundância (var. de gradiente), o FCCS calcula a carga total de combustível,  $\sigma$ ,  $\rho_b$  e outros parâmetros de input para modelos de comportamento do fogo.
- O FCCS fornece um conjunto de valores quantitativos, contínuos de características do combustível, e de comportamento potencial do fogo, a partir de inputs do utilizador e de uma classificação estilizada de características do combustível.
- O FCCS incorpora na classificação de combustíveis aspectos das classificações taxonómicas e ecológicas da vegetação.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

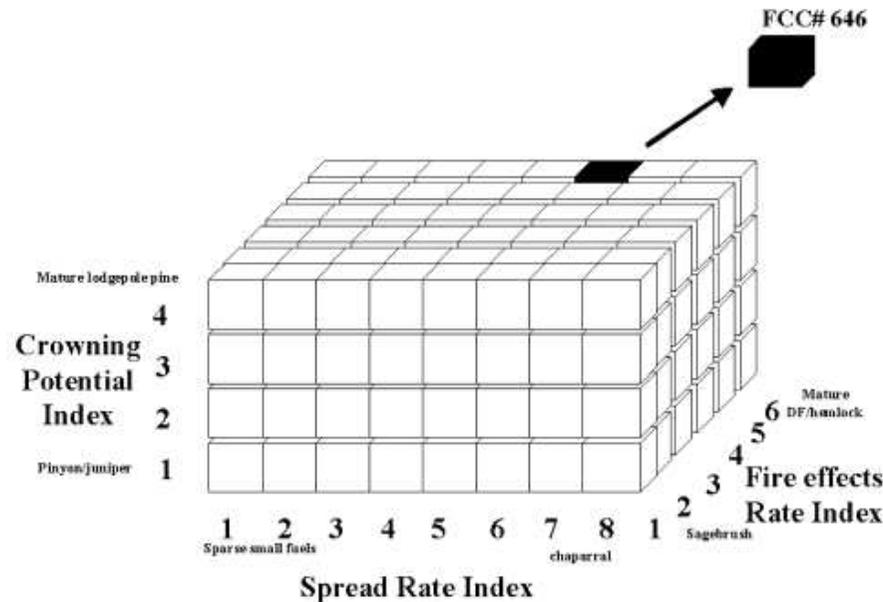


Fig. 4. 192 stylized fuel characteristic classes in 3-dimensional space grouped by three critical attributes of spread rate, crowning potential, and fire effects.

- Os descritores do comportamento potencial do fogo incluídos no FCCS baseia-se em três índices:
- de comportamento potencial do fogo (velocidade de propagação).
- de potencial para fogo de copas.
- de combustível disponível potencial (calor libertado / efeitos do fogo).

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A inventariação de combustíveis a larga escala espacial é cara e trabalhosa, pelo que se tem explorado o uso da detecção remota para cartografar tipos de combustível e seus atributos quantitativos.
- A cartografia do tipo de combustível é uma modalidade de cartografia da ocupação do solo e pode abranger áreas muito extensas.

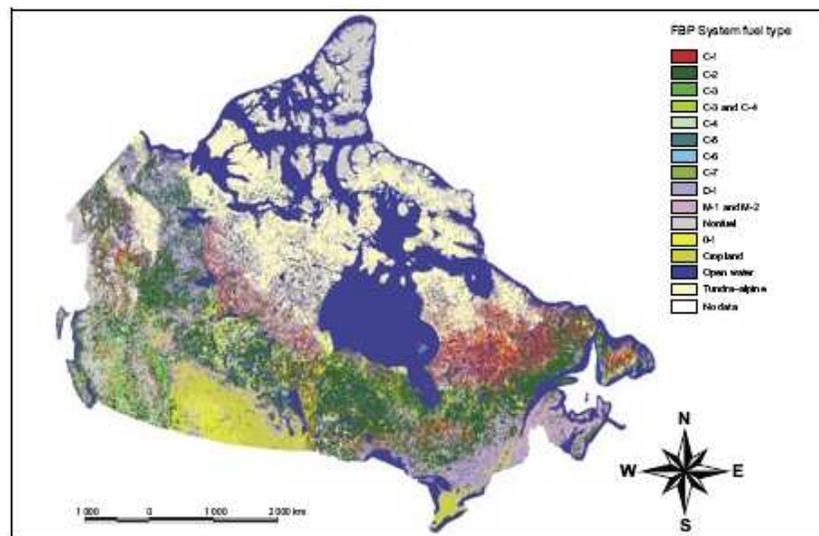
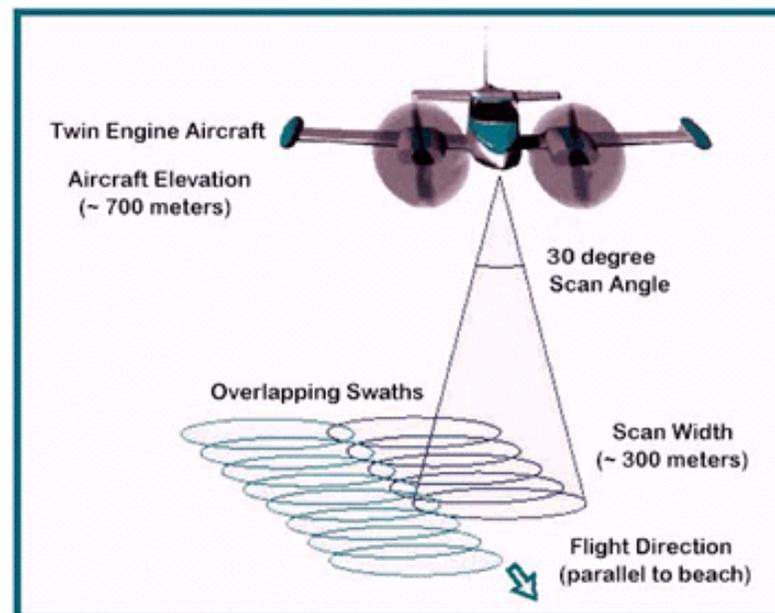


Figure 2. New Canadian fuel-type map, based on Land Cover 2000 (Natural Resources Canada 2004b), ecozones and ecoregions of Canada (Environment Canada 2003), and Canadian Forest Inventory 2001 (Natural Resources Canada 2004a). FBP = Forest Fire Behavior Prediction. C-1 (Spruce-Lichen Woodland), C-2 (Boreal Spruce), C-3 (Mature Jack or Lodgepole Pine), C-4 (Immature Jack or Lodgepole Pine), C-5 (Red and White Pine), C-6 (Conifer Plantation), C-7 (Ponderosa Pine/Douglas-fir), D-1 (Leafless Aspen), M-1, M-2 (Boreal Mixedwood), M-3, M-4 (Dead Balsam Fir/Mixedwood), S1 (Jack or Lodgepole Pine Slash), S-2 (Spruce/Balsam Slash), S-3 (Coastal Cedar/Hemlock/Douglas-fir Slash), and O-1 (Grassland).

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

- A cartografia de parâmetros quantitativos dos combustíveis com recurso à DR é mais difícil, mas há resultados experimentais interessantes com LiDaR.
- O LiDaR é uma espécie de Radar, mas que funciona com raios laser, em vez de ondas de rádio.



# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

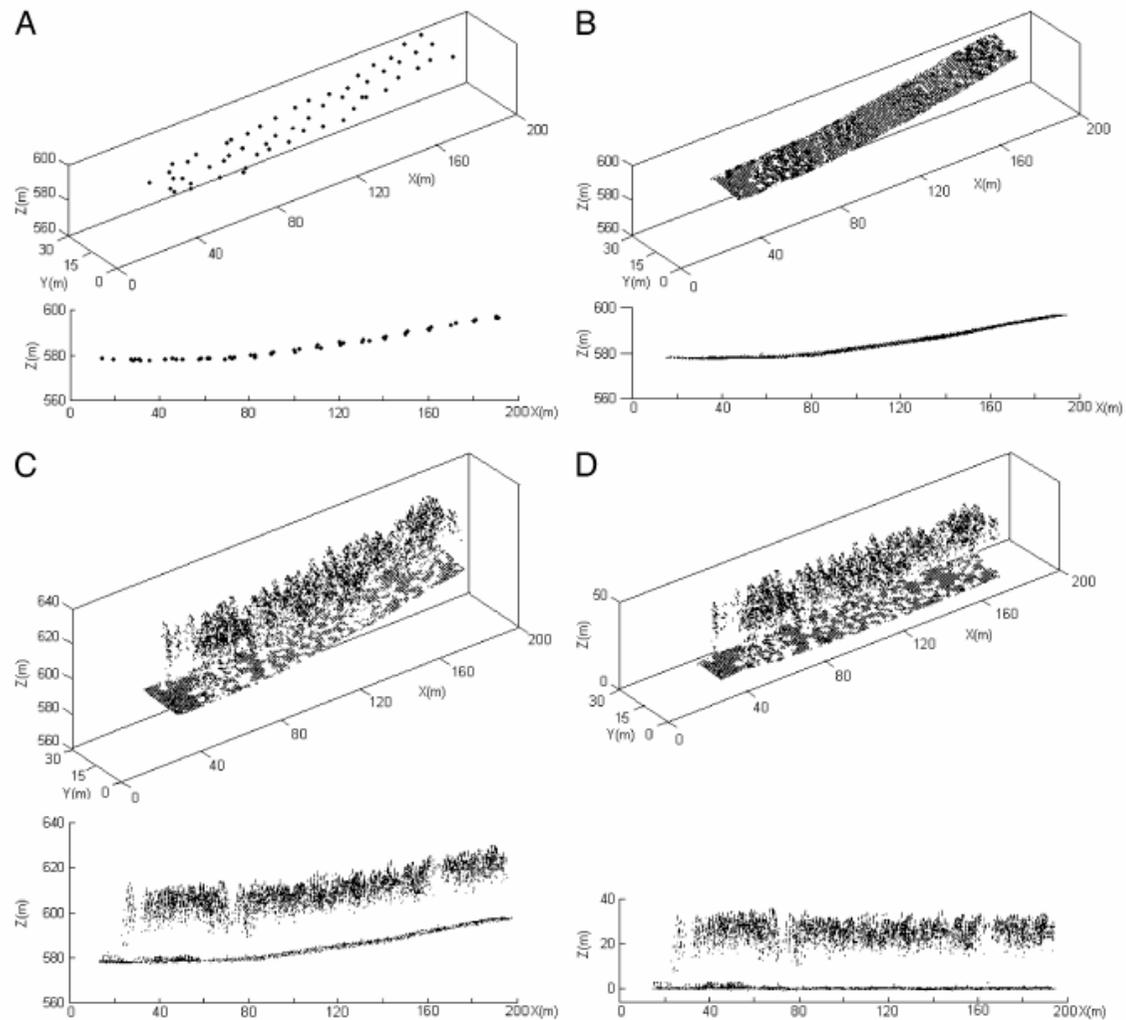


Fig. 4. (A) Laser points selected for the generation of the DGM. A subsample of 180 m in  $x$  and 30 m in  $y$  directions is selected. (B) Ground height above the sea level of each laser pulse calculated using a spline function interpolation. (C) Laser pulse heights above the sea level. (D) Laser pulse height above the ground.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

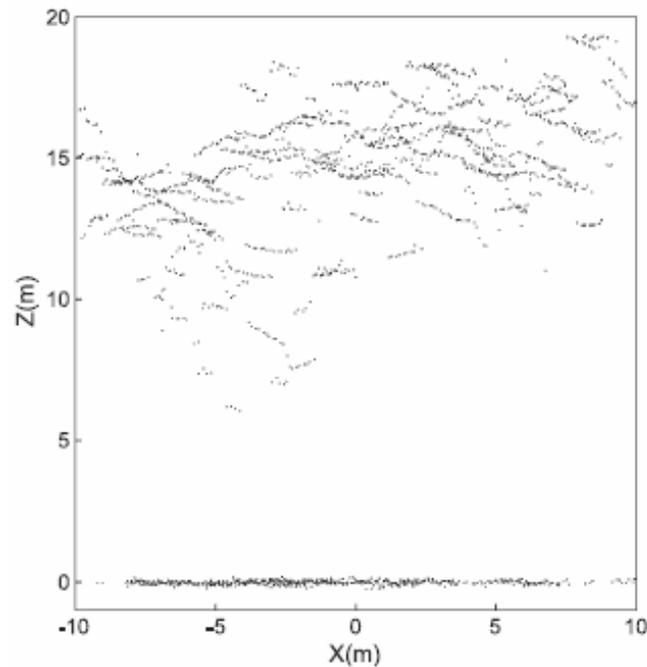


Fig. 4. Representation of laser pulses for one of the plots, which was an outlier due to a tree much smaller than the rest of the canopy, causing crown volume overestimation.  $X$  coordinates represent distance to plot center.

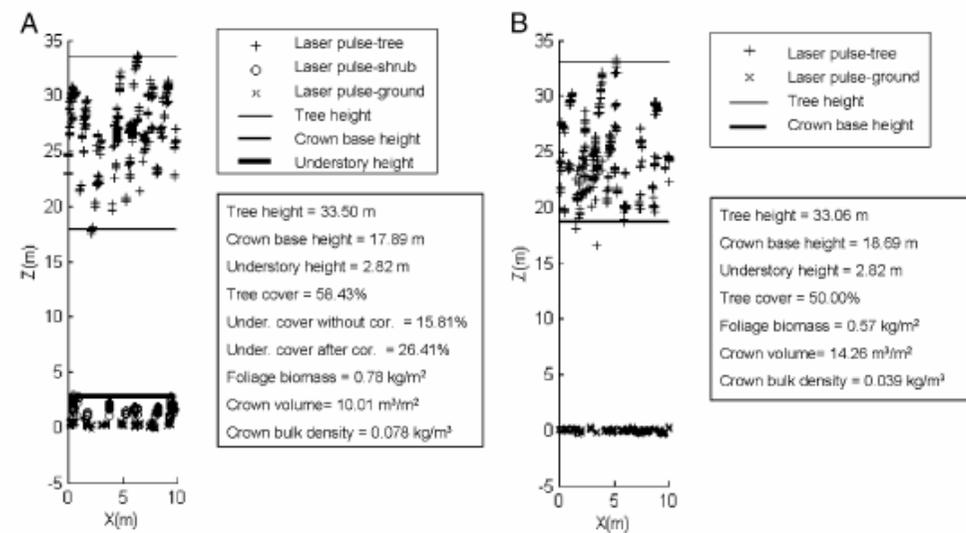


Fig. 5. (A) Estimation of forest parameters in a cell with understory. (B) Estimation of forest parameters in a cell without understory.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

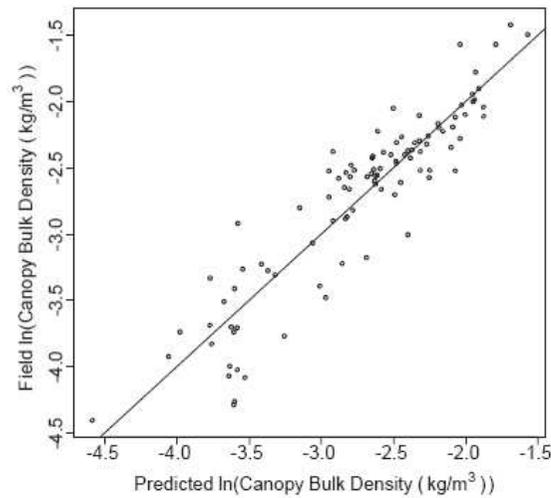


Fig. 4. Field-measured versus predicted (log-transformed) canopy bulk density ( $R^2=0.84$ ;  $P$ -value  $<0.0001$ ). Line shows 1:1 relationship.

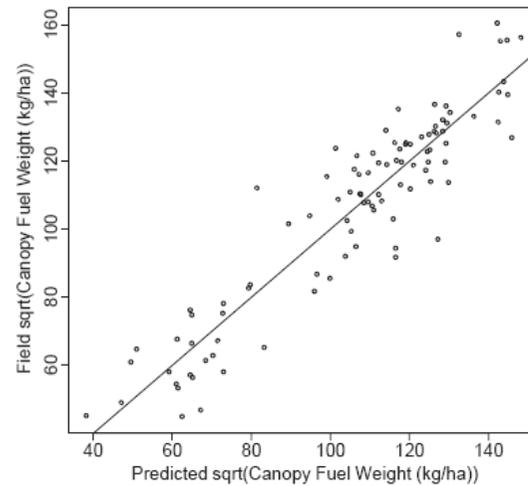


Fig. 3. Field-measured versus predicted (transformed) foliage weight ( $R^2=0.86$ ;  $P$ -value  $<0.0001$ ). Line shows 1:1 relationship.

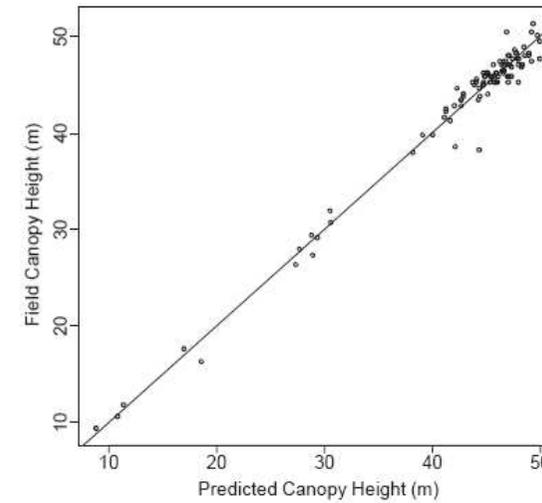


Fig. 6. Field-measured versus predicted canopy height ( $R^2=0.98$ ;  $P$ -value  $<0.0001$ ). Line shows 1:1 relationship.

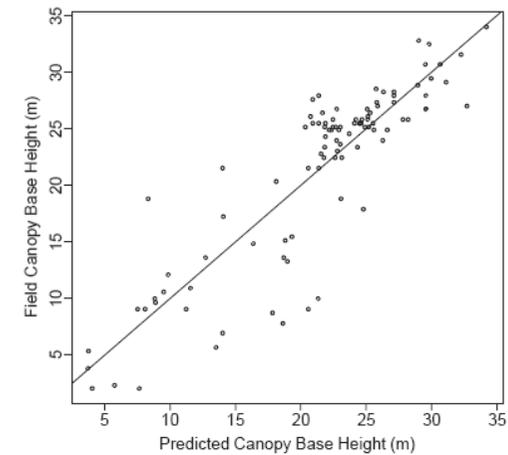


Fig. 5. Field-measured versus predicted canopy base height ( $R^2=0.77$ ;  $P$ -value  $<0.0001$ ). Line shows 1:1 relationship.

# A VEGETAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL

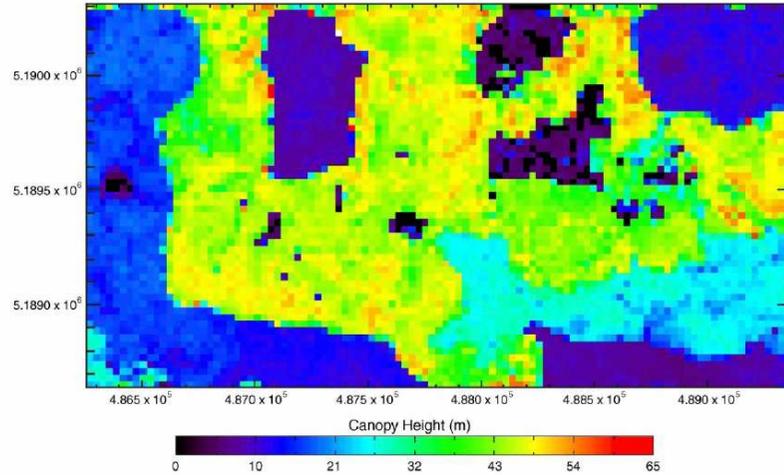


Fig. 7. Canopy height map (30-m resolution), Capitol Forest study area.

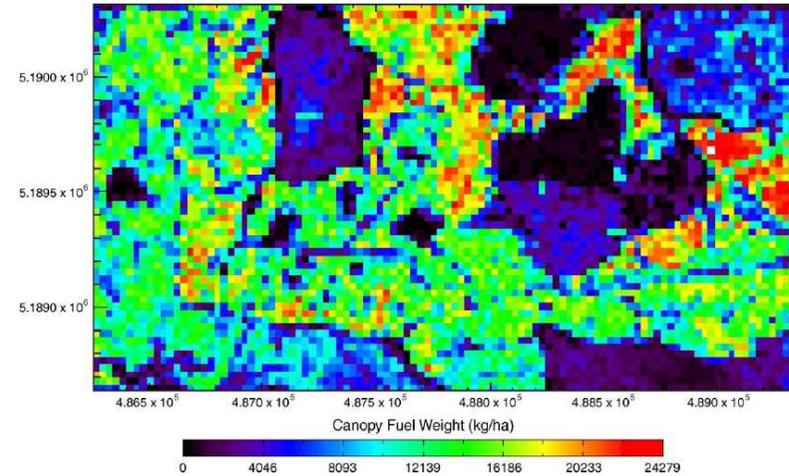


Fig. 8. Canopy fuel weight map (30-m resolution), Capitol Forest study area.

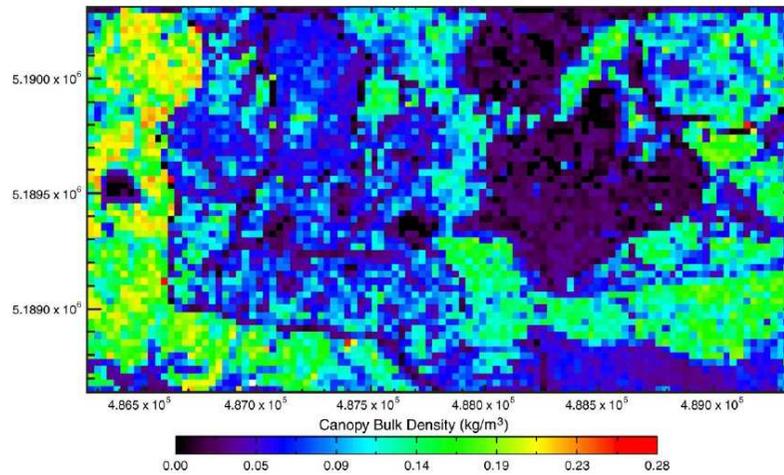


Fig. 9. Canopy bulk density map (30-m resolution), Capitol Forest study area.

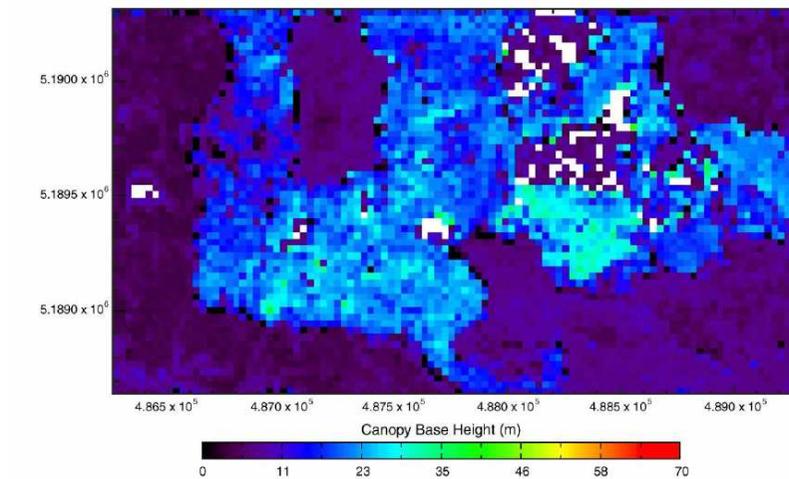


Fig. 10. Canopy base height map (30-m resolution), Capitol Forest study area. Areas with no canopy vegetation present are shown in white.