

Modelos e simuladores

o StandsSIM.md

The banner features a background image of a forest. In the foreground, a laptop and a smartphone display the Simflor.online web platform interface. The laptop screen shows a detailed simulation of a forest stand with various data points and a timeline. The smartphone screen shows a simplified version of the same interface. The banner includes the following text and icons:

- Simflor.online** (large, semi-transparent text at the top)
- SIMULATORS AND TOOLS WEB PLATFORM** (text below the main title)
- StandsSIM's** new web application (text next to a cube icon)
- Forest Stand Growth Simulator** (text below StandsSIM's)
- FCTools** (text next to a wrench icon)
- Tools and Simulators** (text below FCTools)
- For Change Legacy Applications** (text below Tools and Simulators)
- www.simflor.online** (vertical text on the right side)
- simflor.online** (text at the bottom right)
- CEF** (Centro de Estudos Florestais logo at the bottom right)

27 Outubro 2025

Modelos e Simuladores para Apoio à Gestão da Floresta

Susana Barreiro, Nuno Leitão e Margarida Tomé

Manual do Utilizador dos Simuladores StandsSIM.md e SUBER

Agradecimentos

O desenvolvimento da plataforma SIMfLOR e, em grande parte o desenvolvimento dos modelos de crescimento integrados nos simuladores de crescimento da floresta decorreu no âmbito de diversos projetos de investigação (nacionais e internacionais), consultorias e investigação integrada em doutoramentos e pos-doutoramentos.

EFORWOOD: Tools for Sustainability Impact Assessment of the Forestry-Wood Chain (FP6-2004-518128-2);

MOTIVE: Models for Adaptive Forest Management (FP7-ENV-2008-1-226544);

AFORE: Forest biorefineries: Added-value from chemicals and polymers by new integrated separation, fractionation and upgrading Technologies (CP-IP 228589-2);

SIMWOOD: Sustainable Innovative Mobilisation of Wood – Regional forest governance dialogues fostering conscious forest ownership and sustainable wood mobilisation in Europe (EU FP7-KBBE-2013.1.2-07);

StarTree: Multipurpose trees and non-wood forest products: a challenge and opportunity (FP7-ENV-2012-311919);

Agforward: AGroFOREstry that Will Advance Rural Development (FP7-KBBE-2013-7-613520).

SADRI: Models and Decision Support Systems for Addressing Risk and Uncertainty in Forest Planning (SADRI) - PTDC/AGR-FOR/4526/2012 - funded by the Portuguese Science Foundation (FCT);

ForEAdapt: Knowledge exchange between Europe and America on forest growth models and optimization for adaptive forestry. Funded by the 7th European Community Framework Programme (project under grant agreement PIRSES-GA-2010-269257).

1. Modelos e Simuladores Florestais: conceitos e abordagens

As florestas são sistemas biológicos de longa duração que desempenham muitas funções, incluindo o fornecimento de matérias-primas e energia renováveis, a manutenção da biodiversidade e a proteção dos recursos e os recursos hídricos. Inicialmente, a silvicultura e a gestão florestal centravam-se principalmente na produção de madeira e biomassa em pé disponível para corte. À medida que a gestão florestal se tornou mais complexa e com a necessidade de ter em conta valores sociais, económicos e ambientais, as tabelas de produção, as primeiras ferramentas de apoio à gestão começaram a ser substituídas por modelos de crescimento e produção. Com a introdução do conceito de "gestão multifuncional sustentável", foram desenvolvidos modelos melhorados de crescimento e rendimento para incluir adicionalmente produtos e serviços florestais não lenhosos (Rennolls et al. 2007), o que conduziu a novas melhorias na capacidade de modelação. Para além disso, face às constantes perturbações naturais e induzidas pelo homem a que as florestas estão sujeitas as quais conduzem a mudanças contínuas, são necessárias ferramentas que permitam prever o crescimento tendo em conta o impacto dos fatores de perturbação de modo a apoiar a tomada de decisões (Peng 2000).

1.1 Etapas para o desenvolvimento de um modelo de crescimento

Desenvolver um modelo de crescimento e rendimento é um processo complexo que compreende as seguintes fases:

1. Recolha de dados
2. Seleção do modelo
3. Definição da estrutura do modelo
4. Seleção das funções de crescimento e equações de previsão e sua parametrização correspondente
5. Avaliação/validação do modelo
6. Implementação do modelo num programa de computador.

A fase de recolha de dados tem um enorme impacto na qualidade do modelo. O desempenho do modelo depende muito da qualidade dos dados utilizados para o desenvolver. A segunda fase consiste na seleção do tipo de modelo a construir: modelo ao nível do povoamento com ou sem distribuição de diâmetros ou modelo ao nível da árvore dependente ou independente da distância. Depois de decidido isto, é altura de definir a estrutura do modelo, escolhendo as variáveis de estado e de controlo que irão integrar o modelo, bem como a relação entre elas. No que diz respeito às variáveis de estado, é necessário definir quais serão projetadas diretamente pelo modelo — as variáveis principais — e quais serão estimadas com base nos valores projetados das variáveis principais — as variáveis derivadas.

O crescimento em altura dominante e, conseqüentemente, o índice de qualidade da estação (S), são modelados como uma variável principal independente. As variáveis de controlo ambiental são frequentemente substituídas pelo índice de qualidade da estação; no entanto, os modelos também as podem incluir.

Por outro lado, a inclusão de variáveis de controlo silvicultural depende da disponibilidade de dados capazes de refletir o efeito desses tratamentos no crescimento das árvores e dos povoamentos. Uma análise cuidadosa dos dados disponíveis permitirá determinar os tratamentos silviculturais que o modelo será capaz de simular. Uma vez selecionadas as variáveis, será necessário estabelecer as relações entre elas, o que representa a conceção do modelo.

Uma grande variedade de funções de crescimento pode ser usada para simular o crescimento de árvores e povoamentos, direta ou indiretamente. A sua escolha baseia-se geralmente na teoria da regressão — linear ou não linear —, que nos fornece um conjunto de ferramentas para nos ajudar no processo de seleção da melhor função. O ajustamento consiste em encontrar os valores mais adequados para os parâmetros das funções de crescimento, equações de previsão ou quaisquer outras equações que fazem parte do modelo de modo a que as suas estimativas apresentem o menor valor de soma de quadrados dos resíduos quando comparados com os valores observados da variável a modelar. Com todos os parâmetros definidos e antes de utilizar o modelo, é necessário avaliar a credibilidade das nossas simulações, de preferência aplicando o modelo a um conjunto de dados independente do usado no processo de ajustamento. A avaliação dos modelos pode ser realizada comparando as simulações com dados reais ou, por vezes, com os resultados de outro modelo previamente desenvolvido e validado.

Também é necessário garantir que o modelo se comporta de acordo com as teorias da biologia e ecologia florestal, verificando por exemplo se os valores dos parâmetros fazem sentido do ponto de vista biológico. Ou seja, se assumirmos que o crescimento de determinada espécie apresenta uma relação linear (positiva: mais precipitação ⇔ mais crescimento), o parâmetro associado a esta variável no modelo não deverá apresentar um valor negativo, porque isso faria com que a espécie crescesse menos para precipitações mais elevadas.

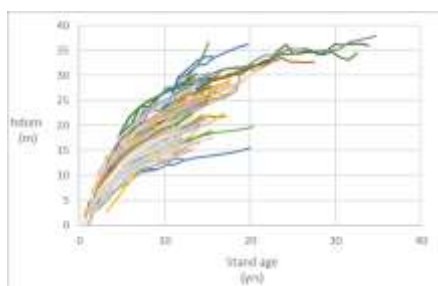
A fase final do desenvolvimento de um modelo consiste na sua implementação num programa de computador que facilite a sua utilização sem um conhecimento exaustivo da sua estrutura. O utilizador só terá de fornecer ao programa as características do povoamento que pretende simular e as opções de gestão que gostaria de comparar. O resultado do modelo mostrará a evolução de uma área florestal ao longo do tempo para as opções de gestão definidas nos *inputs*, indicando a quantidade e, por vezes, a qualidade dos produtos esperados, bem como o momento em que esses produtos estarão disponíveis. Às vezes, o utilizador tem a oportunidade de definir interativamente

as suas opções de gestão, passo a passo, com base nos resultados da simulação obtidos até o momento.

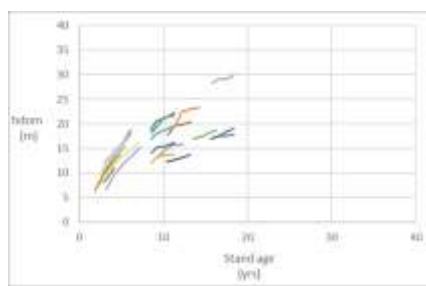
Por fim, é importante salientar que estas fases não são necessariamente sequenciais. O desenvolvimento do modelo é um processo iterativo durante o qual os resultados são constantemente avaliados, permitindo voltar atrás em qualquer decisão se os resultados se revelarem insatisfatórios, a fim de obter o melhor modelo possível.

1.2 Tipos de dados disponíveis para o desenvolvimento de modelos

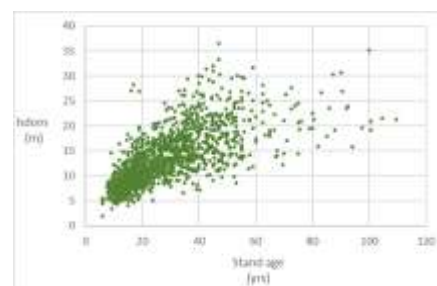
As **PARCELAS PERMANENTES** são parcelas idênticas às parcelas de inventário, diferenciando-se apenas em relação ao rigor com que as medições são feitas e na necessidade de identificar as parcelas no campo com clareza, de preferência com geo-referenciação, de modo a permitir que a sua remedição em anos seguintes se realize sem dificuldades. Estas parcelas são instaladas em povoamentos alvo de gestão “corrente”, cobrindo a maior gama possível de variação existente na população que se pretende modelar, quer em termos das características ambientais, quer em termos de alternativas de silvicultura. As parcelas permanentes são estabelecidas para o estudo do crescimento dos povoamentos sendo medidas em intervalos de tempo regulares, de acordo com critérios estabelecidos. São parcelas cuja instalação e monitorização envolve orçamentos elevados e que representam um compromisso a longo prazo. No entanto, estas parcelas podem fornecer dados de precisão superior e informação sobre o crescimento das árvores e povoamentos que, de outro modo, não se poderia obter já que as características e desenvolvimento de árvores individuais podem ser seguidas no tempo. Para o período de observação, as parcelas permanentes proporcionam pontos em séries de crescimento real. Estas parcelas proporcionam o historial completo do desenvolvimento do povoamento, dos tratamentos efetuados, das respostas a esses tratamentos e da evolução do povoamento em termos de perdas e mortalidade – informação que não é possível obter nas parcelas temporárias. Designam-se por parcelas permanentes, parcelas que acompanham o povoamento durante um longo período de tempo, eventualmente toda a sua vida (regeneração – corte), passando a designar-se **PARCELAS DE INTERVALO** se acompanham o povoamento durante apenas algum tempo, sendo remedidas pelo menos uma vez. Por sua vez, as **PARCELAS TEMPORÁRIAS** proporcionam séries de crescimento artificial, as quais são construídas a partir de uma única medição em diversos povoamentos de idades diferentes, para representar estados sucessivos de desenvolvimento.



parcelas permanentes hdom de eucalipto



parcelas de intervalo hdom de eucalipto



parcelas temporárias hdom de eucalipto

Para além dos dados provenientes destes três tipos de parcelas, devem usar-se também dados provenientes de **ENSAIOS EXPERIMENTAIS** de silvicultura ou genética. Estes ensaios consistem em parcelas de estudo estabelecidas propositadamente para avaliar o impacto no crescimento da árvore e do povoamento de diferentes práticas silvícolas ou uso de material genético diferente. Estes permitem estudar o impacto de 1 ou 2 práticas silvícolas (aplicadas em simultâneo) apresentando normalmente um desenho experimental e repetições em blocos. Por exemplo, num ensaio de compassos podem testar-se diferentes números de árvores à plantação (1x2, 1x3, 1x4, 2x2, 2x3, 3x2, 4x2, 2x4, 3x3, 4x3, 3x4, 4x4) em cada parcela e garantir a existência de um certo número de repetições, normalmente entre 2 a 4 em que se fazem variar as localizações das parcelas de diferentes tratamentos dentro de cada bloco.

Por fim, dados provenientes de **ANÁLISE DO TRONCO**, podem também ser usados para estudar a evolução do crescimento em altura dominante. A análise do tronco estuda o crescimento das árvores a partir da análise e medição dos anéis de crescimento e como tal restringe-se às espécies cuja madeira apresenta anéis de crescimento nítidos e às regiões com um clima que implica uma paragem nítida do crescimento. A análise de tronco pode ser de dois tipos: i) parcial através da análise de verrumadas recolhidas a 1.30 m de altura (ao nível do diâmetro à altura do peito); ou ii) total através da análise de vários discos de árvore recolhidos ao longo do fuste. A análise do tronco total recorre ao abate da árvore e à recolha de rodela extraídas ao longo do tronco indicando a altura a que são recolhidas e permite avaliar a evolução em altura, diâmetro e volume. Idealmente, o disco do cepo deve ser tirado a uma altura < à altura esperada no ano 1.



Discos para análise de tronco total



Verrumadas para análise de tronco parcial

Em cada rodela deve contar-se o número de anéis devendo haver um anel por cada ano de idade no disco do cepo sendo que o seu nº diminuirá nos discos que se encontram mais acima. A diferença entre o número de anéis no cepo e o disco cortado a qualquer outra altura representa o número de anos que a árvore demorou a crescer até à altura a que esse disco foi tirado.

1.3 Modelos e Simuladores florestais e as suas componentes

Um **modelo de crescimento florestal** pode definir-se como uma representação quantitativa dinâmica da floresta, em qualquer nível de complexidade, baseada num conjunto de (sub)modelos ou módulos que, em conjunto, predizem a dinâmica da floresta definida pelos valores de um conjunto de variáveis que caracterizam a floresta num determinado momento (Tomé e Faias 2011). Para aplicações práticas, os modelos florestais devem ser implementados em programas informáticos com interfaces amigáveis - normalmente designados por **simuladores florestais**. Estes baseiam-se num conjunto de modelos florestais e permitem prever o estado da floresta numa região bem definida, com base em cenários climáticos específicos, políticas florestais e/ou alternativas de gestão (Tomé e Faias 2011). Os simuladores florestais preveem a produção de madeira, o estado da floresta, e podem prever adicionalmente a produção de produtos não lenhosos para cada instante no tempo.

O núcleo de qualquer simulador florestal é o módulo de crescimento responsável pela atualização dos valores das variáveis de estado. Este módulo inclui o conjunto de funções/sub-modelos de crescimento ajustados, no caso de modelos empíricos, ou algoritmos que representando processos, no caso de modelos de base fisiológica. O valor de cada variável de estado no instante seguinte no tempo é previsto dinamicamente com base nas características atuais do povoamento e do ambiente.

***“Variáveis de estado** são as variáveis que caracterizam a floresta e podem pertencer a vários níveis hierárquicos desde o povoamento (área basal, altura dominante, número de árvores por hectare), passando pela árvore (diâmetro, altura total, volume da árvore) até à folha (área foliar).”*

***“Variáveis de controle** são as variáveis que afetam as variáveis de estado podem ser de natureza ambiental caracterizando o ambiente em que a floresta se situa (índice de qualidade da estação, clima, solo); antropogénicas refletindo a intervenção humana (alternativas de gestão/práticas silvícolas) ou mesmo ocorrência de perturbações (fogo, pragas e doenças, tempestades, seca).”*

Por sua vez, o módulo de cálculo contém funções/sub-modelos ajustados e outros componentes que permitem a estimativa de outras variáveis das árvores e do povoamento. Este módulo é estático, o que significa que todas as variáveis se referem ao mesmo instante no tempo. Por razões de simplicidade, os sub-modelos serão designados por modelos.

As práticas silvícolas influenciam o desenvolvimento dos povoamentos e as características do local a longo prazo. Para além da gestão, as simulações são normalmente afetadas por fatores externos adicionais, tais como perturbações, procura de mercado por um determinado produto ou alterações de uso do solo, sendo todos eles normalmente implementados em módulos individuais: módulo de gestão, módulo económico, módulo de procura, módulo de pragas e doenças, módulos de fogo, módulo de alterações de uso do solo, etc.

A maioria dos simuladores florestais é movida pela gestão sendo o desbaste e corte final as operações neles integradas. A implementação do desbaste no módulo de gestão difere muito, principalmente em função do tipo de modelo utilizado: árvore individual, povoamento ou distribuição de diâmetro. Nos simuladores mais simples os desbastes são fixos em termos de periodicidade e intensidade, enquanto que o corte final é normalmente definido pela idade do povoamento. Em simuladores mais desenvolvidos a decisão desbastar pode depender de variáveis ao nível do povoamento, como o aumento da área basal desde o último desbaste, a densidade do povoamento, o tamanho das árvores ou uma combinação de variáveis como a altura dominante e a área basal. A espécie florestal, a idade ou o recurso a uma função de prioridade podem ser também usadas como critério de decisão. Por sua vez, a intensidade do desbaste a praticar pode depender da estrutura do povoamento ou da densidade do povoamento e pode ser expressa através da área basal a remover ou residual, da densidade, ou de alguma medida de espaçamento relativo que relacione por exemplo a altura dominante e a densidade do povoamento, como é o caso do fator Wilson (Wilson 1946). Já a seleção das árvores individuais a remover pode basear-se

no tamanho da árvore, pode tentar imitar métodos de desbaste como o desbaste pelo alto, pelo baixo ou o desbaste sistemático, ou ainda recorrer a algoritmos responsáveis por imitar os padrões de desbaste observados numa determinada região.

Na maioria dos casos, o efeito do desbaste nas árvores restantes reflete-se num aumento do crescimento das restantes árvores devido à redução da competição expresso através de funções de resposta ao desbaste desenvolvidas com dados experimentais (Jonsson 1974).

No caso dos modelos baseados em classes de idade podem usar-se várias abordagens para simular o desbaste como aplicar uma taxa de desbaste a uma percentagem do volume em pé, aplicar uma probabilidade função da idade do povoamento ou mover de um determinado número de hectares de uma determinada classe de volume para uma classe de volume mais pequena, sendo a diferença entre as classes o volume desbastado.

Alguns simuladores incluem um módulo de regeneração do povoamento após o corte raso ou desbaste o que pode ser conseguido através de regeneração artificial, natural ou incluir ambas as opções. A regeneração por plantação permite geralmente a escolha das espécies de árvores e da densidade de plantação. Alternativamente, podem imputar-se os dados de regeneração natural observados em parcelas permanentes, parcelas de inventário florestal nacional ou em parcelas provenientes de ensaios de regeneração para inicializar o povoamento previamente cortado.

Os módulos de alteração do uso do solo (LUC) podem considerar tanto a florestação de novas áreas como a desflorestação ou apenas uma delas, podendo para isso ser utilizadas diferentes abordagens para simular a LUC. No caso das novas plantações uma abordagem possível é incluir no ficheiro de input que caracteriza os povoamentos a simular a listagem de novas plantações com um índice de qualidade da estação que caracterize cada um deles e decidir em que ano de simulação cada nova plantação é plantada. Por sua vez a implementação de desflorestação é mais simples podendo atingir-se bastando impedir a replantação após um corte final.

1.4 Tipos de modelos: a filosofia por trás do módulo de crescimento

As primeiras ferramentas de previsão eram simples **tabelas de produção** desenvolvidas para prever o rendimento de povoamentos regulares. Estas tabelas assumem que a densidade é constante para densidades normais ou médias, e só podem incluir duas variáveis. Ao contrário, os modelos de crescimento e produção consideram a densidade como um componente dinâmico da predição do povoamento. Apesar da sua simplicidade, as estimativas de crescimento obtidas a partir de tabelas

de produção continuam a ser incluídas hoje em dia em alguns sistemas de projeção de crescimento, nomeadamente na Europa de Leste.

Os modelos de crescimento florestal podem ser baseados em diferentes filosofias. os **modelos baseados em processos** descrevem os processos fisiológicos que conduzem ao desenvolvimento da floresta (Landsberg 2003), nomeadamente a fotossíntese, interceção de luz, respiração, transpiração, alocação, etc. No entanto, estes modelos contêm muitos parâmetros, muitas vezes mal conhecidos, para que as suas predições sejam consideradas tão fiáveis como as empíricas. Além disso, estes modelos requerem valores para variáveis de input tais como condições pormenorizadas do clima e do solo, que não se encontram facilmente disponíveis.

Quer as tabelas de produção quer os modelos de base fisiológica saem fora do âmbito da UC e são tratados nas UC de Silvicultura II (Licenciatura) e de Modelação (mestrado).

Por outro lado, os **modelos empíricos** de crescimento e produção, que descrevem comportamentos sem tentar identificar as causas subjacentes, fornecem previsões biologicamente realistas que são exatas dentro dos limites da amostragem e da exatidão das medições com que foram desenvolvidos (Vanclay 1994). No entanto, estes modelos carecem de flexibilidade e da capacidade de simular stresses ambientais (Landsberg 2003) não são válidos para simular novos tratamentos de gestão silvícola (Reed 1999; Reed et al. 2003) que difiram dos observados durante o período em que foram efetuadas as medições em que se baseiam (Landsberg 2003).

Ao longo do tempo, têm sido utilizados dois tipos de funções para modelar o crescimento dos modelos empíricos:

Funções de crescimento empíricas (não-sigmóides) - o modelador descreve o comportamento da variável resposta com base nos dados e em que a relação entre a variável dependente (a que queremos modelar) e as variáveis independentes é expressa por uma função matemática, por exemplo, linear, parabólica, sem tentar identificar as causas ou explicar o fenómeno. Portanto, quando utilizadas para modelar o crescimento requerem cuidados acrescidos na sua utilização em particular no que respeita a extrapolações feita para intervalos de dados distintos dos utilizados na modelação (para ajustar os parâmetros). A esta preocupação acresce a necessidade de verificação dos sinais dos parâmetros, que devem garantir que as estimativas respeitam o crescimento biológico.

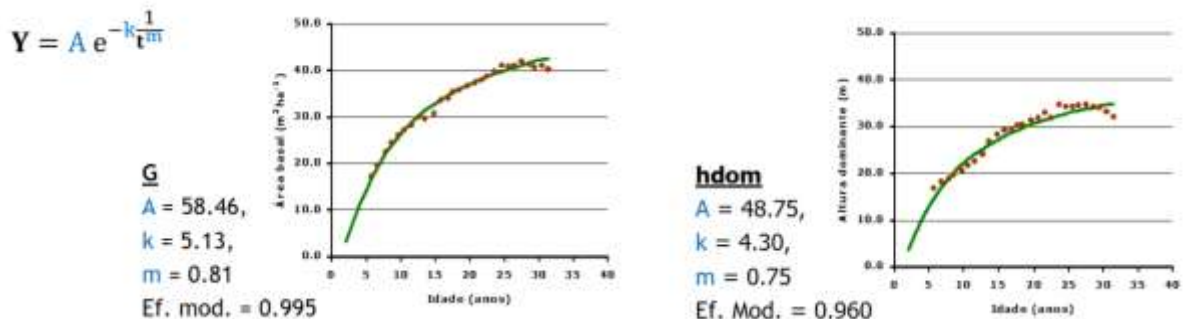
Funções de crescimento teóricas - o modelador descreve o comportamento a variável de resposta tendo normalmente uma hipótese subjacente associada aos princípios do crescimento florestal (ex^o “a taxa de crescimento relativo tem uma relação linear com o

inverso de $t+1$, o que significa que diminui não linearmente com o tempo”). Desta forma, os parâmetros do(s) modelo(s) assumem um significado biológico que ajuda à sua interpretação.

Lundqvist-Korf type	Richards type	Hossfeld IV type
$Y = A e^{-k \frac{1}{t^m}}$	$Y = A \left(1 - c e^{-kt}\right)^{\frac{1}{1-m}}$	$Y = \frac{A}{1 - \left(1 - \frac{A}{Y_0}\right) \left(\frac{t_0}{t}\right)^k}$

No caso da função de Lundqvist os parâmetros representam: A – assintota, limita o crescimento máximo; K – inversamente relacionado com a taxa de crescimento; m – influencia a idade a que ocorre o ponto de inflexão

Existem várias funções de crescimento teóricas, cada uma baseada na sua hipótese, e qualquer uma pode ser usada para expressar o comportamento de qualquer variável, ao nível da árvore ou do povoamento, através da combinação de parâmetros encontrados no processo de ajustamento da função aos dados.



A mesma função pode ser usada para mais do que uma variável da mesma forma que se podem desenvolver equações para uma mesma variável recorrendo a qualquer uma das funções teóricas.

Existem algumas metodologias para tornar as funções de crescimento mais robustas quando se trata do ajustamento para famílias de curvas (conjuntos de parcelas) de modo a que consigam espelhar diferentes características das parcelas.

- expressar os parâmetros em função de outras variáveis quer do local quer da árvore/povoamento**
- expressar as funções de crescimento às diferenças e os parâmetros em função de outras variáveis**

$$G = A e^{-k \left(\frac{1}{t}\right)^m}$$

$$hdom_2 = A \left(\frac{hdom_1}{A} \right)^{\left(\frac{1}{t_2}\right)^n}$$

$$A = a_0 S^2$$

$$k = k_0 + k_1 S + k_2 \frac{Npl}{1000} + k_3 fe \quad fe = \frac{100}{S \sqrt{Npl}}$$

$$m = m_0 + m_1 \ln(S) + m_2 \frac{N}{1000}$$

G = Área basal; S = índice de qualidade da estação;
NPL = nº de árvores à plantação; N = nº de árvores;
fe = coeficiente de espaçamento relativo adaptado

$$A = a_0 + a_1 DR$$

hdom1 = altura dominante no instante 1;
hdom2 = altura dominante no instante 2; t1
= idade no instante 1; t2 = idade no instante
2; DR = nº de dias de chuva

No que respeita à sua utilização, havendo medições de inventário disponíveis que caracterizem o povoamento no instante 1 é preferível usar as equações às diferenças, embora a prática mais comum seja a combinação das duas metodologias, (exemplo b). Contudo, na ausência de inventário realizado previamente que sirva para caracterizar o ano de partida da simulação, apenas a metodologia a) fica disponível. Assim, as equações do tipo a) são comumente encontradas nos módulos de inicialização dos simuladores, enquanto que as equações do tipo b) são típicas do módulo de crescimento.

1.5 Classificação dos modelos florestais relativamente à unidade elementar de simulação: árvore média, árvores individuais e povoamento

Burkhart e Tomé (2012), seguindo Munro (1974), classificam os modelos empíricos de crescimento em relação à unidade de predição. Os **MODELOS DE POVOAMENTO** (exº *GLOBULUS*) predizem o número de árvores, a área basal e/ou o volume por povoamento, geralmente com base na idade do povoamento, na densidade do povoamento e no índice de qualidade da estação no caso de povoamentos regulares. Os **MODELOS BASEADOS EM CLASSES DE DIMENSÃO** (exº *PBRAVO*) predizem o número de árvores por classe (normalmente classes de diâmetro sendo geralmente designados por modelos de distribuição de diâmetros). Neste tipo de modelos, o número de árvores por classe é posteriormente convertido em volume e/ou biomassa por classe de diâmetro utilizando equações de volume e/ou biomassa ao nível da árvore que são aplicadas à árvore média de cada classe. As distribuições futuras por classe de diâmetro, normalmente complementadas por curvas de classe de qualidade e modelos de crescimento em área basal e previsão do número de árvores (equações de mortalidade) podem basear-se numa função de densidade de probabilidade, ou em transições entre classes (modelo matricial). Os **modelos de árvore individual** (exº, *Pinaster*, *Pinea.pt*, *Suber*, *Castanea*) predizem o crescimento das árvores (por exemplo, acréscimos de diâmetro e altura) para árvores individuais (eventualmente classes de tamanho de árvores) em função da dimensão atual da árvore e variáveis ao nível do povoamento, como a idade, a densidade do povoamento e o índice de qualidade da

estação. Estes modelos podem ainda ser subdivididos em modelos independentes ou dependentes da distância, consoante sejam ou não utilizadas as localizações individuais das árvores, sendo os primeiros mais comumente utilizados por evitarem a recolha no terreno das coordenadas das árvores (azimutes, distâncias).

Espécies	Estrutura do povoamento	Composição do povoamento	Nome do modelo	Tipo de modelo	Inputs do modelo	Time-step do modelo
<i>Eucalyptus globulus</i>	regular	puro	Globulus3.0	empirico	povoamento	anual
	regular	puro	3PG-out+	processual (hibrido)	povoamento	mês
	irregular	puro	GYMMA	empirico	povoamento	anual
<i>Pinus pinaster</i>	regular	puro	PINASTER	empirico	árvore	anual
	irregular	puro	PBirrol	empirico	árvore	anual
<i>Pinus pinea</i>	(ir)regular	misto	PINEA.pt	empirico	árvore	anual
<i>Castanea sativa</i>	regular	puro	Castanea.pt	empirico	árvore	anual
<i>Quercus suber</i>	(ir)regular	puro	suber	empirico	árvore	anual

1.6 A escala e aplicabilidade dos simuladores florestais

A utilização dos modelos da floresta pela sociedade implica a sua implementação em interfaces computacionais que facilitem a simulação eficiente de um elevado número de cenários, ou seja, das condições presentes durante um horizonte de simulação (clima, medidas de política, alternativas de gestão, etc). Estas interfaces computacionais são geralmente designadas por simuladores da floresta e estes podem ser desenvolvidos para aplicação a diversas escalas espaciais. Os simuladores designados “de povoamento” focam-se na simulação de um determinado povoamento, enquanto que os “de unidade de gestão” aplicam-se normalmente para a simulação conjunta de todos os povoamentos que fazem parte de uma área sujeita a um mesmo plano de gestão. Por sua vez, os simuladores designados de “regionais/nacionais” podendo apresentar espacialização ou não, utilizam-se para a simulação de todos os povoamentos de uma região.

Os simuladores da floresta podem ir desde uma simples folha de EXCEL até sofisticados programas que representam a floresta a três dimensões. Contudo o utilizador tem de ser crítico e procurar informar-se acerca das características, incluindo as limitações, da ferramenta que vai utilizar. A “qualidade” do modelo nem sempre está relacionada com a “qualidade” do simulador, existindo bons modelos de crescimento da floresta implementados em simuladores pouco amigáveis, do mesmo modo que podem encontrar-se simuladores de aparência muito “sofisticada”, mas que integrem modelos de crescimento de fraca prestação publicados na literatura ou ainda modelos de crescimento, que embora sejam adequados tenham sido integrados no simulador de forma inexata.

Horizonte de planeamento:

Nº de anos da simulação, período de predição

Forest management alternative (FMA):

Alternativas de gestão florestal ou padrão de silvicultura: implementação de um sistema de silvicultura (calendário de operações) que expresse a sequência de operações durante uma rotação da regeneração ao corte

Prescrição florestal:

FMA ou sequência de FMAs a aplicar durante o horizonte de planeamento que retratam os calendários de operações sucessivos ao longo da simulação.

Cenário:

Condições durante a simulação que pretendemos comparar (clima, alternativas de gestão, etc)

2. As plataformas SIMfLOR desktop e simflor.online

2.1 Um pouco de história sobre a plataforma de simuladores

A equipa ForChange é um dos 4 grupos de investigação do Centro de Investigação Florestal (CEF), um dos 3 centros de investigação da Escola Superior Agrária (ISA). O CEF foi criado em 1976 e foi inicialmente orientado para a investigação do ecossistema do eucalipto. Atualmente, abrange tópicos de investigação mais amplos que cobrem a multifuncionalidade dos ecossistemas, a gestão sustentável sob alterações climáticas, sociais e económicas, com uma utilização plena dos recursos num contexto de bioeconomia.

O grupo ForChange centra-se na gestão das florestas atlânticas e mediterrânicas do sul da Europa, abrangendo uma variedade de ecossistemas que vão desde plantações florestais intensivas para produção de madeira a florestas de estabilização de dunas costeiras e sistemas agro-florestais. Devido à colaboração do ForChange em vários projetos de investigação nacionais e internacionais, o grupo dedica-se a atividades de inventário e monitorização florestal, recolhendo dados valiosos sobre o impacto da silvicultura nos ecossistemas. O desenvolvimento de modelos de crescimento e rendimento é um dos principais tópicos de investigação do grupo, que tem estado envolvido no desenvolvimento de uma vasta gama de modelos de crescimento e rendimento florestal. No entanto, os modelos são tão valiosos quanto o número de profissionais que os podem utilizar nos processos de

tomada de decisão. Por esta razão, esta equipa de investigação tem-se dedicado à integração de modelos de crescimento florestal em programas de computador, vulgarmente designados por simuladores florestais, e ao desenvolvimento de uma interface de fácil utilização – SIMfLOR desktop.

A plataforma SIMfLOR desktop, uma plataforma de simuladores, foi criada para harmonizar as interfaces dos diferentes modelos e simuladores de crescimento desenvolvidos no âmbito do ForChange. Esta interface foi criada para ajudar os utilizadores na preparação dos ficheiros de entrada necessários para executar os simuladores. A plataforma visava encorajar os utilizadores de diferentes áreas de investigação, gestores florestais e proprietários florestais a utilizar os simuladores florestais de uma forma fácil.

Não seria fácil para um utilizador sem conhecimentos de Excel conseguir preparar todos estes ficheiros manualmente. Assim, integrou-se o StandsSIM na plataforma SIMfLOR de modo a facilitar a sua utilização. Sempre que possível o utilizador preenche a informação de input em janelas (input_stand.csv, input_clima.csv, input_presc.csv, ini_standsSIM.csv). Em alguns casos pode usar ficheiros “default” (input_economics.csv, input_consumables.csv, Input_assortments_”espécie”.csv). Contudo, se pretender introduzir alguma alteração aos custos e categorias de aproveitamento pode utilizar o GERADOR e carregar o conteúdo destes ficheiros, edita-los e guardar as alterações. O GERADOR permite ainda facilitar a calendarização das FMAs, contudo não permite carregar o conteúdo de uma FMA existente para proceder a edições, exigindo sempre que estas sejam criadas de raiz. O único ficheiro cuja responsabilidade de preparação é exclusivamente do utilizador, é o que caracteriza as árvores (input_arv.csv) uma vez que poderia dar-se o caso do utilizador ter de introduzir os dados de centenas de árvores manualmente na interface para poder realizar uma simulação.

Diferentes simuladores de nível regional e de povoamento, incluindo o StandsSIM e o SUBER, foram integrados num ambiente comum em que o utilizador podia encontrar outras ferramentas desenvolvidas para apoiar as simulações, tais como o “Gerador” que ajudava a criar os *inputs* relacionados com a gestão.

O site do Forchange Tools, FCTools (<http://www.isa.ulisboa.pt/cef/forchange/fctools/en>) foi criado para facilitar o acesso de todos os utilizadores às ferramentas existentes, permitindo o download gratuito das suas versões mais recentes (sendo necessário o registo no FCTools antes do download). Neste site o utilizador encontrará as descrições dos modelos e simuladores de crescimento desenvolvidos para as principais espécies arbóreas em Portugal, bem como bibliografia de apoio.

2.2 SIMfLOR desktop: download e requisitos a plataforma

Após feito o registo o utilizador terá acesso aos downloads. A pasta zipada SIMfLOR_2017 deve ser guardada e descomprimida num local que não seja o ambiente de trabalho(desktop)

ou a pasta de downloads. Certifique-se de que o caminho para a pasta SIMfLOR_2017 não apresenta espaços em branco ou acentos. Tenha em atenção que, por vezes, as aplicações graphs.exe e Graphs_DD.exe (dentro da pasta STANDsSIM) têm de ser descomprimidas num passo seguinte. A versão mais recente do JAVA é aconselhável; caso contrário, a funcionalidade dos gráficos não ficará disponível. É essencial que os detentores de sistemas operativos iOS ou Linux instalem uma máquina virtual para poder utilizar o Windows. A instalação no Windows está ainda dependente de versão de alguns componentes deste sistema operativo, como por exemplo determinadas versões de *frameworks* da Microsoft que pode ser necessário instalar no sistema operativo do utilizador.

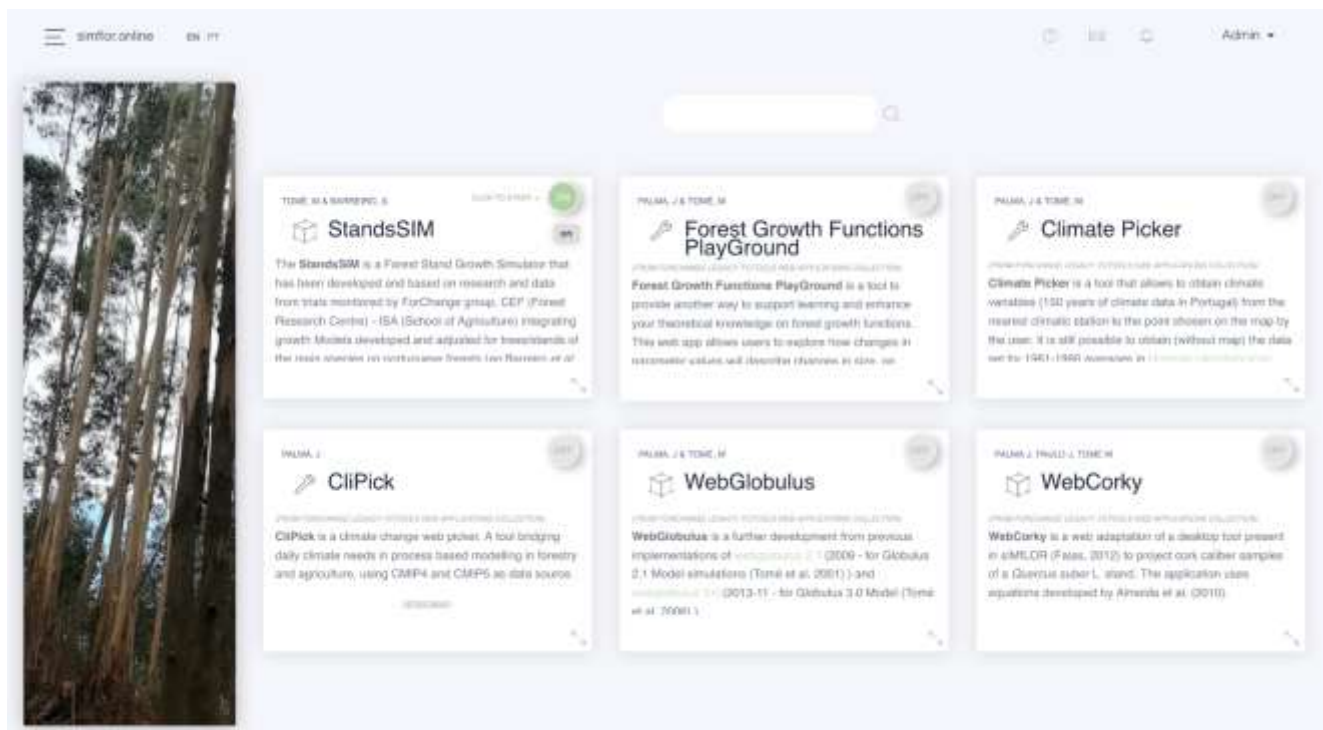
O software não tem requisitos específicos, mas o utilizador deve seleccionar as definições regionais para Inglês e certificar-se de que o símbolo decimal está definido para "." (e não ",") e o separador de lista está definido para "," (e não para ";"). Caso a ferramenta continue a não funcionar, é possível que tenha aberto um dos ficheiros csv de entrada no Excel e o tenha guardado. Se o fez, reabra todos os ficheiros de input que abriu anteriormente utilizando o "Bloco de Notas" para se certificar de que não tem nenhum ";". Caso tenha ";", no Word, vá a: Home \ Editing \ Replace \ Find What: ";" \ Replace with "," \ Replace All.

"Assegure-se que extraiu a pasta SIMfLOR do ficheiro comprimido, que a guardou no seu PC numa pasta que não o ambiente de trabalho (desktop), num caminho que não contenha espaços ou acentos, que as definições regionais estão configuradas para Inglês (separador decimal é o ponto, e não a virgula)"

2.3 simflor.online

As dificuldades de instalação do simulador associadas a falta de flexibilidade da interface levaram a que desde 2023 sejam feitos esforços para desenvolver uma plataforma de simuladores de crescimento online que permita uma utilização mais flexível destas ferramentas evitando problemas de instalação e de atualizações do sistema operativo dos utilizadores. Assim surgiu o simflor.online (<https://www.simflor.online>). A utilização desta plataforma requer apenas que o utilizador solicite acesso, indicando que simuladores / ferramenta(s) pretende utilizar, independentemente do aparelho/sistema operativo que esteja a utilizar, uma vez que todos os recursos da aplicação web se encontram num servidor online com um único ambiente tecnológico.

A plataforma serve de suporte a um conjunto de simuladores florestais e ferramentas. Uma vez recebido o acesso o utilizador pode aceder às ferramentas que solicitou de entre as quais como o simulador StandsSIM.md (Figura 1).



2.3. A estrutura do StandsSIM.md

O simulador permite prever a evolução de povoamentos florestais (novas plantações ou povoamentos existentes) sob diferentes alternativas de gestão produzindo uma vasta gama de indicadores ambientais e económicos.

INICIAR SIMULAÇÃO



POVOAMENTO NOVO
(TABELA DE PRODUÇÃO)



POVOAMENTO EXISTENTE

O simulador integra diferentes modelos de crescimento e produção florestal para as principais espécies de árvores em Portugal: Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) e pinheiro manso (*Pinus pinea*). As predições são feitas recorrendo a modelos de

crescimento de árvore individual ou a modelos de povoamento, dependendo da espécie e/ou da estrutura do povoamento. Quando se definem as espécies e a estrutura do povoamento, o StandsSIM.md seleciona o modelo adequado a utilizar na simulação. Atualmente, o simulador apenas considera a simulação de povoamentos puros (regulares e irregulares). Os modelos de crescimento encontram-se organizados em módulos responsáveis pela inicialização de novos povoamentos, de crescimento de povoamentos novos e existentes ou módulos que simulam os desbastes:

- a) Módulo de inicialização de povoamentos: simula a distribuição do diâmetro das árvores quando o povoamento atinge uma altura dominante de 5 m. A distribuição é baseada em dados de ensaios monitorizados pelo grupo ForChange.
- b) Módulo de desbaste: considera vários tipos de desbaste. Desbaste pelo baixo, de acordo com probabilidades definidas pelo utilizador ou dependendo do tamanho da árvore e considerando diferentes critérios, como o fator Wilson, a área basal residual ou a percentagem de coberto.

As simulações de crescimento são feitas para o período temporal (horizonte de planeamento) definido pelo utilizador com um passo temporal anual. É necessário fornecer informação que caracterize os recursos florestais no ponto de partida da simulação, nomeadamente a espécie florestal, o calendário de operações silvícolas (FMA), os dados económicos associados às operações (custo da operação e os respetivos consumíveis, bem como a definição do valor serviços), uma vez completa a caracterização dos recursos e da estação no ponto de partida, segue-se a definição da sequências de calendários de operações (FMAs) durante o período de simulação (prescrição).

The screenshot displays the StandsSIM.md interface with the following elements:

- *ESPÉCIE:** A dropdown menu showing "Eucalyptus globulus" with a tree icon.
- *TIPO DE MODELO:** A dropdown menu showing "Povoamento".
- *HORIZONTE DE PLANEAMENTO (ANOS):** A horizontal slider bar with a green circle marker positioned at the value "30".
- PADRÕES DE SILVICULTURA (FMA) >**: A text input field.
- DADOS ECONÓMICOS >**: A text input field.
- POVOAMENTO >**: A text input field.
- PRESCRIÇÃO >**: A green button with white text.

O StandsSIM.md começa com a informação do inventário florestal ao nível da parcela/talhão para caracterizar os recursos florestais de uma região. Uma vez caracterizados os recursos florestais para o primeiro ano de simulação, utiliza os modelos de crescimento e produção para prever a evolução dos povoamentos/árvores, tendo em conta a influência de variáveis

externas - normalmente designadas por “drivers” - como a gestão florestal). A gestão florestal pode descrever-se com base nas operações tabeladas pelo CAOOF que se encontram organizadas por nível de mecanização (manuais, mistas, mecânicas, infraestruturas) ou por categoria (exº mobilização do solo, plantação, desbaste, limpeza, ...).



De modo a permitir que cada simulação de crescimento tenha uma análise económica associada é necessário conhecer os custos das operações silvícolas disponíveis para integrar o calendário de operações. É de salientar, que salvo poucas exceções, a maioria destas operações não tem impacto direto no crescimento e produção. Isto porque os modelos de base empírica integrados no standsSIM.md não têm a capacidade de refletir o impacto da ocorrência de um número maior ou menor de operações como a mobilização do solo, limpeza de mato ou fertilização. De entre as exceções salienta-se: o número de árvores à plantação, a seleção de varas e os desbastes.

A análise económica baseia-se no valor atual líquido (VAL), que é como a soma, ao longo de todo o período de planeamento, da diferença entre as receitas e os custos em cada ano Reportado ao ha

$$NPV = \sum_{t=1}^T \left(\frac{CF_t}{(1+i)^t} \right) - C_0$$

onde CF_t é o balanço entre custos e receitas ocorrido durante o ano de simulação (t), T é o horizonte de planeamento, nas mesmas unidades que t , i é a taxa de juro, e C_0 é o investimento inicial.

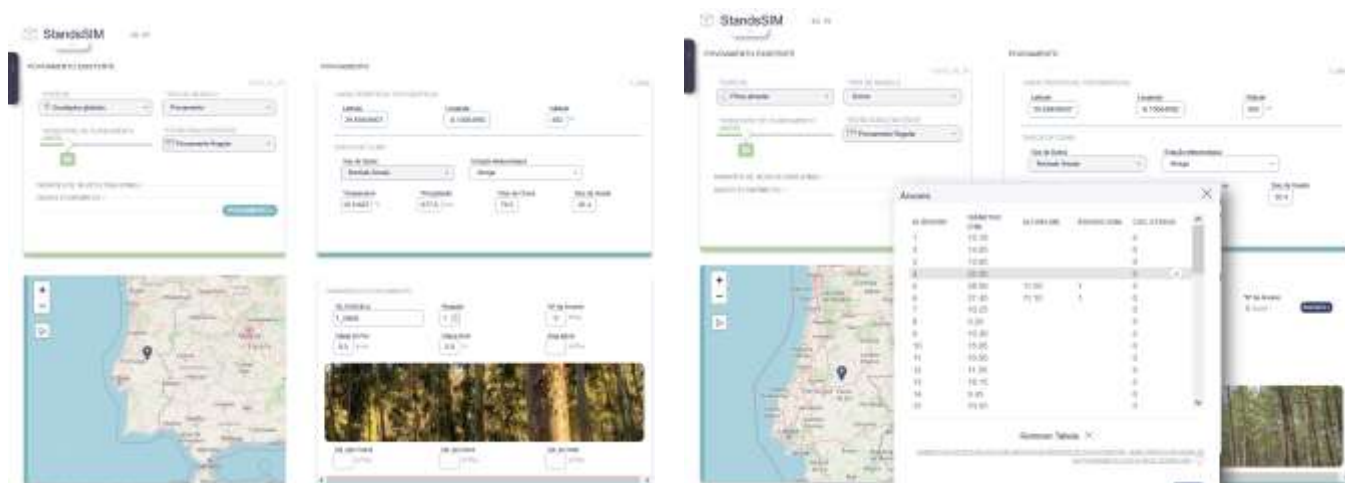
O cálculo e a interpretação do VAL podem ser encontrados em manuais e livros de economia florestal. Normalmente, o VAL é utilizado para determinar quais os investimentos ou projetos que devem ser financiados. Se o VAL for positivo, o investimento pode ser aceitável,

dependendo do VAL de outros investimentos alternativos. No entanto, quando é negativo, deve provavelmente ser rejeitado, porque o balanço entre custos e receitas não cobrirá os custos periódicos. Finalmente, se o VAL for zero, o investimento pode ser considerado neutro para a taxa de juro (i) aplicada.

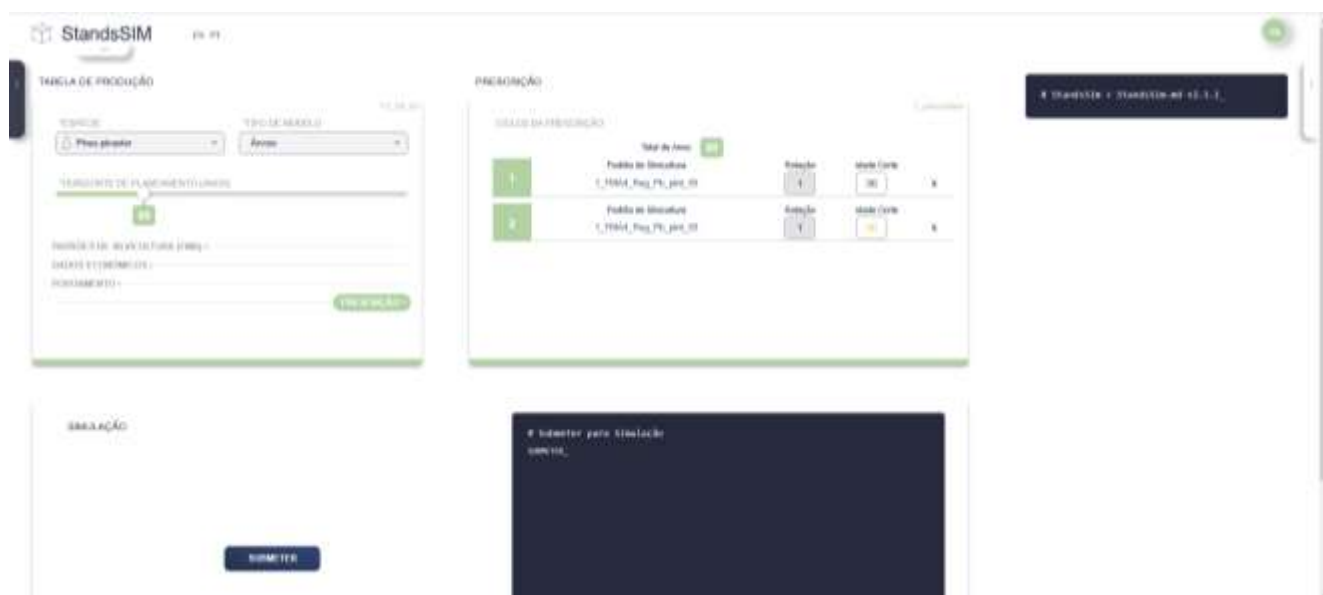
Os custos das operações estão disponíveis desde 2002 e são atualizados de 2 em 2 anos (CAOF 2022). Os custos dos produtos utilizados na gestão, tais como plantas ou fertilizantes são também tido em conta. O utilizador pode optar por visualizar o custo da totalidade das operações ou apenas os custos associados às operações que incluiu no calendário de operações. Os custos variam consoante as condições de trabalho estando os custos máximos associados a situações de declive acentuado, pedregosidade abundante e da existência de muitos arbustos ou arbustos de grandes dimensões, enquanto que os custos mínimos estão associados a condições de trabalho fáceis. Os custos utilizados nos cálculos são os custos médios que podem ser editados pelo utilizador. Neste separador, terá também de definir a taxa de atualização que será utilizada no cálculo do valor atual líquido (VAL) e o número de taxas de desconto adicionais e das taxas de desconto adicionais que gostaria de utilizar para calcular a Renda Anual Equivalente (RAE).

Na seção dos Diversos Lenhosos é necessário definir e caracterizar o número de categorias de aproveitamento, definindo os diâmetros limite do toro (cm), se se pretende considerar madeira com ou sem casca e, finalmente, o valor da madeira de cada categoria de aproveitamento (€/m³). No caso do eucalipto, pelo facto da madeira ser utilizada para pasta de papel, é apenas necessário definir o diâmetro de despona enquanto que para outras espécies fará sentido incluir mais categorias de aproveitamento.

exige a importação de uma lista de árvores que pode ser feita a partir de um ficheiro .csv ou .xlsx. O simulador apresenta instruções que ajudam à correta estruturação deste ficheiro e alertas que permitem apontar qualquer incorreção que este possa conter antes de permitir que se avance na simulação.



O ultimo passo consiste na descrição da sequência de FMAs/ calendários de operações que se pretende simular durante o horizonte de planeamento definido. A prescrição pode ser constituída por um único ciclo ou por um conjunto de ciclos. Neste ultimo caso, os ciclos podem trocar de FMA tantas vezes quanto o utilizador desejar. As prescrições construídas para aplicar a talhadias são normalmente compostas por vários ciclos, enquanto que as que caracterizam a gestão de povoamentos irregulares se caracterizam normalmente por possuir um único ciclo.



A interface permite ainda ao utilizador controlar o número de ciclos da FMA através da contagem automática do número de anos do horizonte de planeamento coberto pelos ciclos

existentes e através de um código de cores em que o vermelho indica a falta de ciclos para perfazer o numero de anos de simulação pretendido, o verde para indicar que este foi atingido (ou ultrapassado) e ainda o uso da cor amarela na idade de corte que indica que o ultimo ciclo não será cortado durante a simulação.

PRESCRIÇÃO

1_prescription

1

2

Total de Anos: 20

ABRILHAR CORTAR

Padrão de Silvicultura

1_FMAI_Reg_Ec_Ind_20

1

10

X

Padrão de Silvicultura

1_FMAI_Reg_Ec_Ind_20

2

10

X

PRESCRIÇÃO

1_prescription

1

2

3

Total de Anos: 30

Padrão de Silvicultura

1_FMAI_Reg_Ec_Ind_20

1

10

X

Padrão de Silvicultura

1_FMAI_Reg_Ec_Ind_20

2

10

X

Padrão de Silvicultura

1_FMAI_Reg_Ec_Ind_20

1

10

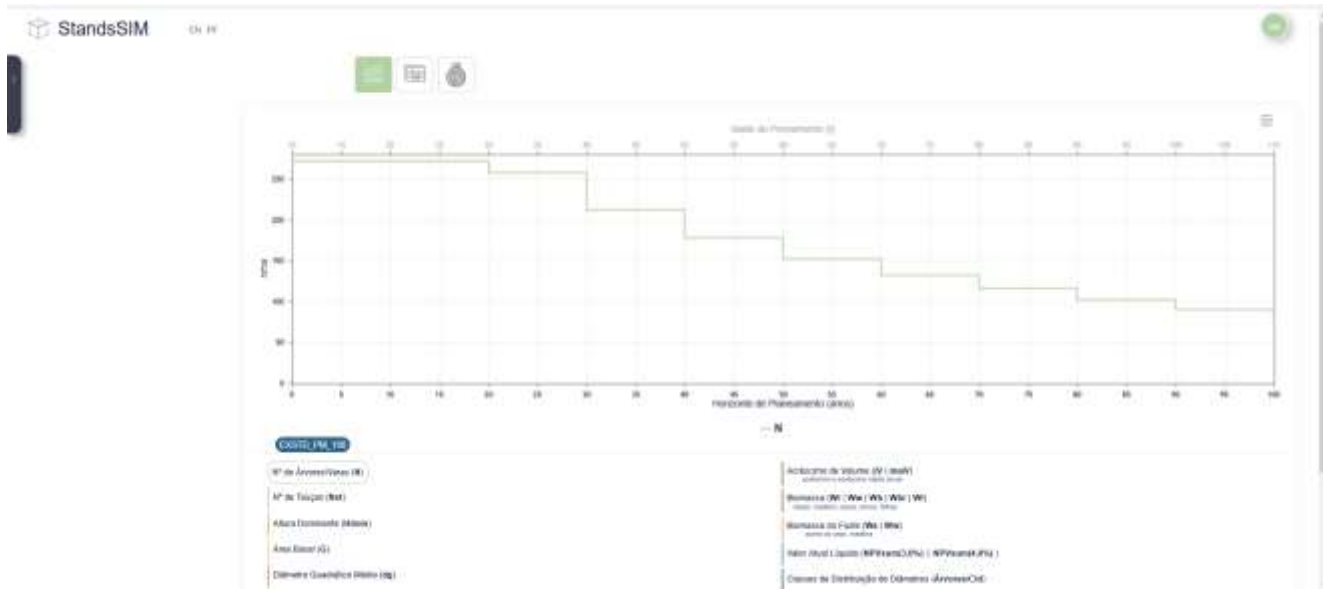
X

Uma vez completada a informação, o utilizador pode submeter os dados e proceder à simulação que uma vez concluída aparece “resumida” na janela preta. O passo seguinte passa por consultar os resultados que se apresenta de forma tabular e gráfica, podendo a tabela de resultados ser exportada em formato .xlsx e os gráficos em formato de imagem.

```
# Submeter para Simulação
# Os dados foram submetidos com Sucesso
# Iniciar Simulação
SIMULAR CANCELAR
```

```
# Submeter para Simulação
# Os dados foram submetidos com Sucesso
# Iniciar Simulação

# Simulação concluída!
# STAND:1_stand
# PRESC:1_prescription
# YEARS:30
# S:10.2
# NPVsum:567.02649574662
# Volume total cortado (m3): 294.04457195842
# Volume anual cortado (m3): 9.8014807319474
# RESULTADOS
```



Uma vez terminada uma simulação o standsSIM.md permite ao utilizador, “voltar atrás” e editar a simulação anterior e comparar os resultados antes e depois da alteração. Estão permitidas um total de 5 alterações que podem ser comparadas graficamente. No fim, o utilizador pode arquivar as simulações que pretender atribuindo-lhe os nomes que lhe parecerem mais lógicos, o que lhe permitirá ter acesso aos dados de entrada e resultados das simulações arquivadas. A lista de simulações arquivadas encontra-se disponível na aba lateral direita.

