



# **Efeito da substituição de espécies florestais no armazenamento de carbono em áreas de montanha da Região Mediterrânea**

**Ana Luiza de Carvalho**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança  
para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental*

Orientado por

**Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca**

**Professor Doutor Tomás d'Aquino Rosa Freitas de Figueiredo**

**Professora Mestre Eliane Silva Ferreira Almeida**

**Bragança**

**2018**



**UNIVERSIDADE  
FUMEC**

DE MINAS GERAIS PARA O MUNDO

## **Efeito da substituição de espécies florestais no armazenamento de carbono em áreas de montanha da Região Mediterrânea**

**Ana Luiza de Carvalho**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental através do acordo de Dupla Diplomação com a Universidade FUMEC.*

Orientado por

**Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca**

**Professor Doutor Tomás d'Aquino Rosa Freitas de Figueiredo**

**Professora Mestre Eliane Silva Ferreira Almeida**

**Bragança**

**2018**

II

À Eva, com muito amor...

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus orientadores Professora Doutora Felícia Fonseca, Professora Mestre Eliane Almeida e Professor Doutor Tomás de Figueiredo, por todo o empenho e ajuda que contribuíram para a concretização deste trabalho.

A todos os professores que tive durante meus estudos no Instituto Politécnico de Bragança (IPB), em especial aos professores Artur Gonçalves, Manuel Feliciano, Amílcar Teixeira, Luís Nunes e Arsénio Araújo, por toda a ajuda fornecida quando necessário.

A todo o setor de relações internacionais do IPB e da FUMEC, pelo apoio e ajuda prestados durante meus estudos em Portugal.

A Deus, que nos momentos mais difíceis sustentou a minha fé e me manteve firme para continuar a minha caminhada.

A minha mãe Eva, pelo apoio incondicional durante toda a minha vida académica e pessoal. O estudo e o conhecimento nos acompanham durante toda a vida, e ela nunca mediu esforços para ajudar, apoiar, acompanhar e incentivar meus estudos.

A minha família e amigos, que ficaram no Brasil torcendo pelo meu sucesso.

A todos os amigos conquistados durante a minha permanência em Portugal, que compartilharam comigo momentos inesquecíveis.

As meninas e aos técnicos do time de vôlei do IPB, pela oportunidade e pela amizade que se formou.

Ao Karol Wróbel, pelo carinho e suporte nos momentos de maior estresse.

A todos, muito Obrigada!

## Resumo

A substituição de espécies florestais pode interferir de forma significativa na quantidade de carbono armazenado nos diversos compartimentos que constituem os ecossistemas terrestres (biomassa, horizontes orgânicos e solo). Com o presente trabalho pretende-se avaliar os efeitos da substituição da vegetação climácica (*Quercus pyrenaica*) da Serra da Nogueira, situada no NE Portugal, pelas espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM) e *Pinus nigra* (PN) no armazenamento total de carbono no sistema. Para o estudo, estabeleceram-se três parcelas de 315 m<sup>2</sup> nos povoamentos de cada uma das espécies consideradas (9 parcelas no total) e realizou-se a medição da altura e diâmetro à altura do peito de todas as árvores, assim como a colheita de amostras de vegetação herbácea e de horizontes orgânicos, em áreas de 0,49 m<sup>2</sup>, em 15 pontos aleatórios por espécie (5 em cada parcela). Nos mesmos pontos realizou-se a colheita de amostras de solo perturbadas e não perturbadas, nas profundidades 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm. Trinta anos após a substituição da vegetação climácica foi possível observar ganhos de carbono na biomassa das espécies florestais e nos horizontes orgânicos, principalmente para a espécie PM, e perdas significativas de carbono no solo. O total de carbono acumulado é significativamente superior em PM (327,1 Mg ha<sup>-1</sup>) comparativamente às espécies PN (244,3 Mg ha<sup>-1</sup>) e QP (271,7 Mg ha<sup>-1</sup>), que apresentam valores estatisticamente idênticos.

Palavras-chave: Biomassa, horizontes orgânicos, horizontes minerais, sistemas florestais, Portugal.

## Abstract

Forest species replacement can influence significantly the amount of carbon stored in the several compartments that compose the terrestrial ecosystems (biomass, forest floor and mineral soil). This study intends to evaluate the influence of the replacement of the *Quercus pyrenaica* species (QP), which represents the native vegetation of Serra da Nogueira, NE Portugal, by the *Pseudotsuga menziesii* (PM) and *Pinus nigra* (PN) forest species. For this purpose, three plots of 300 m<sup>2</sup> were established in each stand (9 plots in total) and the height and diameter at breast height of all trees were measured. Herbaceous and forest floor were collected in areas of 0.49 m<sup>2</sup> in 15 points per species (5 per plot). At the same points, disturbed and undisturbed soil samples were collected at depths 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 and 20-30 cm. Thirty years after the native vegetation replacement, carbon gains are observed in the forest species biomass and in the forest floor, which is more noticeable in PM, and significant losses of carbon in the mineral soil. Total carbon accumulated is significantly higher in PM (327.1 Mg ha<sup>-1</sup>) compared to PN (244.3 Mg ha<sup>-1</sup>) and QP (271.7 Mg ha<sup>-1</sup>), which present statistically identical values.

Keywords: Biomass, forest floor, mineral soil, forest systems, Portugal.

## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GERAL</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1. Efeito Estufa</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2. Gases do Efeito Estufa – GEEs</b> .....	<b>7</b>
<b>3.3. Aquecimento Global</b> .....	<b>8</b>
<b>3.4. O Carbono</b> .....	<b>9</b>
3.4.1. <i>Ciclo do Carbono</i> .....	<b>10</b>
3.4.2. <i>O Carbono na Atmosfera</i> .....	<b>11</b>
3.4.3. <i>O Carbono nas Florestas</i> .....	<b>12</b>
<b>3.5. Aquecimento Global: Consciência e Preocupação Global</b> .....	<b>14</b>
3.5.1. <i>Acordos Internacionais</i> .....	<b>14</b>
3.5.2. <i>Conferências das Partes – COPs</i> .....	<b>15</b>
3.5.3. <i>Mecanismo de Desenvolvimento Limpo</i> .....	<b>16</b>
<b>3.6. Sequestro de Carbono</b> .....	<b>16</b>
3.6.1. <i>Sequestro de Carbono nas Florestas</i> .....	<b>17</b>
3.6.2. <i>Sequestro de Carbono nos Solos</i> .....	<b>18</b>
<b>3.7. Mercado do Carbono</b> .....	<b>19</b>
<b>3.8. Florestamento e Reflorestamento</b> .....	<b>19</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>21</b>
<b>4.1. Localização e caracterização da Área de Estudo</b> .....	<b>21</b>
<b>4.2. Espécies em Estudo</b> .....	<b>22</b>
4.2.1. <i>Quercus pyrenaica</i> .....	<b>22</b>
4.2.2. <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	<b>24</b>
4.2.3. <i>Pinus nigra</i> .....	<b>25</b>
<b>4.3. Avaliação da Massa de Carbono no Sistema</b> .....	<b>26</b>
4.3.1. <i>Seleção das áreas de amostragem</i> .....	<b>27</b>
4.3.2. <i>Recolha de amostras</i> .....	<b>27</b>
4.3.3. <i>Determinação do Carbono nos sistemas</i> .....	<b>28</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>

<b>5.1. Armazenamento de Carbono no Sistema .....</b>	<b>32</b>
5.1.1. <i>Armazenamento de carbono nas espécies florestais.....</i>	32
5.1.2. <i>Armazenamento de carbono na vegetação herbácea.....</i>	34
5.1.3. <i>Armazenamento de carbono nos horizontes orgânicos .....</i>	36
5.1.4. <i>Armazenamento de carbono no solo .....</i>	38
5.1.5. <i>Armazenamento de carbono total no sistema.....</i>	42
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>47</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 – Dinâmica do Efeito Estufa.....	16
Figura 2 – Ciclo Global do Carbono.....	20
Figura 3 – Histórico de realizações das Conferências das Partes (COPs).....	26
Figura 4 – Localização da área de estudo.....	31
Figura 5 – A espécie <i>Quercus pyrenaica</i> Willd.....	34
Figura 6 – A espécie <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	35
Figura 7 – A espécie <i>Pinus nigra</i> .....	36
Figura 8 – Carbono armazenado na biomassa da parte aérea e na biomassa das raízes para as espécies <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM), <i>Pinus nigra</i> (PN) e <i>Quercus pyrenaica</i> (QP).....	43
Figura 9 – Variação da quantidade de carbono armazenada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na biomassa aérea e na biomassa das raízes das espécies <i>Pinus nigra</i> (PN) e <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM) em relação ao solo original ( <i>Quercus pyrenaica</i> , QP).....	44
Figura 10 – Carbono armazenado na biomassa aérea e na biomassa das raízes da vegetação herbácea, no sub-bosque das espécies <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM), <i>Pinus nigra</i> (PN) e <i>Quercus pyrenaica</i> (QP).....	45

Figura 11 – Quantidade de folhada das camadas orgânicas L, F e H para as espécies <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM), <i>Pinus nigra</i> (PN) e <i>Quercus pyrenaica</i> (QP). Valores seguidos de letras diferentes diferem significativamente as espécies.....	46
Figura 12 – Variação da quantidade de carbono armazenada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) nos horizontes orgânicos (L, F e H) das espécies <i>Pinus nigra</i> (PN) e <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM) em relação ao solo original ( <i>Quercus pyrenaica</i> , QP).....	48
Figura 13 – Concentração de carbono no solo para as espécies <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM), <i>Pinus nigra</i> (PN) e <i>Quercus pyrenaica</i> (QP).....	49
Figura 14 – Total de carbono armazenado no solo para as espécies <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM), <i>Pinus nigra</i> (PN) e <i>Quercus pyrenaica</i> (QP).....	51
Figura 15 – Variação do teor de carbono armazenado nos solos das espécies <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM) e <i>Pinus nigra</i> (PN) em relação à espécie <i>Quercus pyrenaica</i> (QP).....	51
Figura 16 – Carbono total armazenado no sistema.....	52

## Índice de Quadros

Quadro 1 – Caracterização dos povoamentos florestais em estudo.....	37
Quadro 2 – Equações para estimativa da biomassa aérea (BA) e das raízes (BR) das espécies <i>Quercus pyrenaica</i> (QP), <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM) e <i>Pinus nigra</i> (PN).....	39
Quadro 3 – Biomassa da parte aérea (BA), das raízes (BR) e total (BT), em Mg ha <sup>-1</sup> , para as espécies <i>Quercus pyrenaica</i> (QP), <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM) e <i>Pinus nigra</i> (PN).....	41
Quadro 4 – Armazenamento de carbono (Mg ha <sup>-1</sup> ) nas camadas orgânicas L, F e H, para as espécies <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM), <i>Pinus nigra</i> (PN) e <i>Quercus pyrenaica</i> (QP).....	47
Quadro 5 – Armazenamento de carbono no solo (Mg ha <sup>-1</sup> ), para as espécies <i>Pseudotsuga menziesii</i> (PM), <i>Pinus nigra</i> (PN) e <i>Quercus pyrenaica</i> (QP).....	49

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento exponencial das atividades antrópicas, principalmente sobre os recursos naturais, fez com que a preocupação acerca do meio ambiente aumentasse, norteadas por ações públicas e privadas, quanto ao uso, manejo e preservação desses recursos (Rocha, 2003). As consequências das atividades antrópicas se refletem em impactos ambientais imediatos e tardios. O impacto tardio mais discutido atualmente é o efeito estufa e consequente aquecimento global (Szakács, 2003).

Apesar do efeito estufa ser considerado um fenômeno natural para a manutenção da temperatura e vida na Terra, seu aumento vem sendo causado pelo acúmulo de gases lançados em excesso na atmosfera (João & João, 2012). Tais gases possuem a capacidade de impedir que o calor presente na atmosfera terrestre seja eliminado. Esses gases receberam o nome de gases de efeito estufa (GEEs).

O planeta Terra é aquecido através da radiação solar. Parte da radiação é absorvida pelos diferentes sistemas presentes no planeta e a restante é refletida para fora da atmosfera terrestre. Uma vez que os GEEs não permitem a eliminação da radiação em excesso, o aprisionamento desse calor faz com que o efeito estufa perca sua característica natural, passando a ser entendido também como um impacto ambiental, uma vez que traz consigo consequências como o aquecimento global (Neto, 2002; João & João, 2012).

Dentre os GEEs, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é o que acarreta mais impactos ambientais, além de contribuir para o aquecimento global, uma vez que suas emissões somam 55% do total de emissões no mundo de GEEs e seu tempo de permanência na atmosfera varia de 50 a 200 anos (Júnior, 2003; João & João, 2012). Tal fato fortalece o conceito de que as emissões atuais geram impactos tardios e de longa duração.

O carbono, presente entre os GEEs na forma de dióxido de carbono, é um elemento fundamental para a vida, sendo disponibilizado para os seres vivos através do processo de fotossíntese. A fotossíntese tem por característica fixar o carbono na estrutura das plantas, na forma de matéria vegetal ou biomassa, já a decomposição biológica tem por característica reverter tal processo, liberando o carbono anteriormente fixado.

Dentre os vários sistemas ambientais que estão presentes no ciclo global do carbono, podemos citar os sistemas florestais como o mais importante reservatório deste ciclo, uma vez que tem capacidade em reter e armazenar carbono nas estruturas das plantas e árvores por um longo período. Tal sistema é considerado um sumidouro de carbono pelo Protocolo de Kyoto, e pode ser utilizado para cumprir metas estabelecidas pelo mesmo e/ou por demais acordos internacionais (Gonçalves, 2012).

Assim como o Protocolo de Kyoto, há acordos internacionais que visam a preservação e conservação do ambiente, buscam reduzir as emissões, adquirir créditos de carbono, incorporar projetos de tecnologia limpa e plantar mais árvores que tenham a capacidade de absorver carbono (Barreto et al., 2009). A conservação e preservação da natureza e de seus recursos naturais, faz com que o carbono permaneça na composição das estruturas da vegetação e no solo, reduzindo a quantidade de carbono livre na atmosfera terrestre, fato que recebe o nome de sequestro de carbono.

O sequestro de carbono consiste na remoção de CO<sub>2</sub> presente na atmosfera. Os oceanos, florestas e solo, através de organismos fotossintetizantes, são capazes de remover grandes quantidades de CO<sub>2</sub> da atmosfera (Barbosa et al., 2013).

Em relação ao setor florestal, é de suma importância que os projetos de florestamento e reflorestamento permitam, além da sua conservação, uma alternativa para a diminuição das concentrações de carbono na atmosfera. A floresta é o maior reservatório de carbono dentre os ecossistemas terrestres, contendo cerca de 80% de todo o carbono armazenado na vegetação terrestre e 40% no solo (Barbosa et al., 2013), sendo possível pois as florestas são capazes de armazenar carbono na vegetação e no solo a longo prazo, fazendo a troca gasosa com a atmosfera através da fotossíntese e da respiração (Renner, 2004).

O maciço montanhoso da Serra da Nogueira, localizado no nordeste de Portugal Continental, abriga a mais extensa mancha florestal de carvalhos do país. A espécie *Quercus pyrenaica* constitui a vegetação nativa do local mas, devido a incêndios e cortes, surgiram áreas desprovidas de carvalhos em alguns locais da Serra. Projetos de reflorestamento estão introduzindo diferentes espécies arbóreas nestas áreas, destacando-se as espécies *Pseudotsuga menziesii* e *Pinus nigra*. Essas duas espécies, usadas para o reflorestamento, possuem como característica comum um rápido crescimento e, embora esta substituição possa ser benéfica do ponto de vista económico, é fundamental compreender os impactos ambientais resultantes dessa

atividade, como por exemplo a alteração na fixação de carbono pelo sistema florestal, que pode contribuir para a mitigação das alterações climáticas.

O conhecimento da capacidade das diferentes espécies em armazenar carbono, deve constituir uma ferramenta de apoio à decisão quando da introdução de novas espécies florestais e pode ainda ser utilizado estrategicamente para atingir metas ambientais (Silver et al., 2000).

O presente trabalho visa analisar a substituição da espécie nativa (*Quercus pyrenaica*) em determinadas áreas da Serra da Nogueira por outras espécies florestais (*Pseudotsuga menziesii* e *Pinus nigra*), no que diz respeito ao armazenamento de carbono nos respetivos sistemas. Tal estudo torna-se importante uma vez que as florestas são, como dito anteriormente, os mais importantes reservatórios de carbono terrestre e, reflorestar fragmentos das mesmas com diferentes espécies arbóreas pode causar desequilíbrios na dinâmica do sequestro de carbono.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Avaliar o impacto da substituição de espécies florestais no armazenamento de carbono na biomassa aérea e subterrânea e nos horizontes orgânicos e minerais do solo.

### **2.2. Objetivos Específicos**

O presente trabalho pretende:

- Selecionar pequenas áreas experimentais na Serra da Nogueira;
- Recolher amostras e quantificar a biomassa e o carbono armazenado;
- Verificar se a substituição das espécies arbóreas em projetos de reflorestamento é benéfica ou não em relação à quantidade de carbono total armazenado no sistema.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para se entender o trabalho proposto, é preciso conhecer em que contexto o mesmo está inserido. Os diferentes impactos e mudanças ambientais globalmente observadas são consequências de atividades antrópicas não controladas, reflexo de um mau uso e gestão das matérias-primas que a natureza oferece.

Os maiores impactos ambientais observados atualmente envolvem o sequestro/armazenamento de carbono. Estudos e pesquisas acerca da dinâmica do carbono refletem a busca por informações sobre a sua origem, efeitos e disposição final, assim como o desenvolvimento de projetos que tenham o objetivo de minimizar e conter os impactos causados pela sua libertação através das atividades antrópicas, e projetos que visem armazená-lo naturalmente.

#### **3.1. Efeito Estufa**

Para se manter uma temperatura na atmosfera da Terra em que as espécies consigam se desenvolver e sobreviver, é necessário que haja o efeito estufa natural (Resende et al., 2001). Apesar de ser usado o termo “estufa”, é válido ressaltar que o planeta não se comporta literalmente como tal. Uma estufa, em seu significado literal, é um local onde o aquecimento acontece por falta de convecção, ou seja, a troca de ar entre o ambiente externo e interno não existe (Renner, 2004).

Uma vez que existe trocas de ar na atmosfera terrestre, o efeito estufa no planeta ocorre a partir da radiação solar que é retida na atmosfera por alguns gases presentes na mesma (Figura 1). Os raios solares emitidos sobre a atmosfera terrestre possuem dois destinos – parte dos raios são absorvidos pelos sistemas presentes no planeta de forma a se manter o calor na atmosfera terrestre e outra parte é refletida de volta para o espaço (Júnior, 2003).

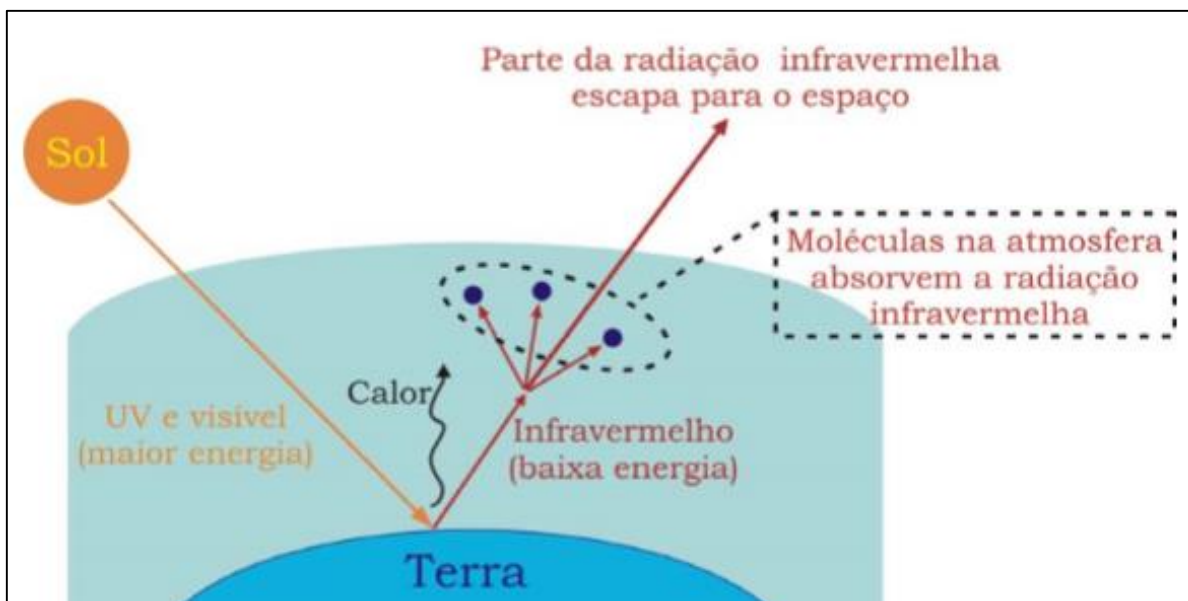


Figura 1 – Dinâmica do Efeito Estufa. Adaptado de Lobato et al. (2009).

Funcionando em equilíbrio, o efeito estufa faz com que a temperatura do planeta se mantenha praticamente constante, de forma a favorecer a vida terrestre. Em desequilíbrio, a fração de radiação solar que deveria ser refletida de volta para o espaço fica retida na atmosfera terrestre, fazendo com que a temperatura do planeta aumente, prejudicando o desenvolvimento e sobrevivência de algumas espécies presentes no planeta. Tal fenômeno pode se tornar catastrófico, uma vez que o desequilíbrio térmico do planeta dá origem ao que popularmente se designa como aquecimento global (Toniolo & Carneiro, 2010).

Como referido anteriormente, apesar do efeito estufa ser um fenômeno natural, as atividades antrópicas vêm aumentando suas dimensões e conseqüentemente agravando seus efeitos sobre o planeta (Resende et al., 2001; Barbosa et al., 2013).

As queimadas florestais e o corte das florestas fazem com que os sistemas florestais entrem em desequilíbrio, ou seja, seu papel em regular, por exemplo, a temperatura, o vento, o regime de chuvas e escoamento da água do local onde a floresta está inserida são alterados, prejudicando não só aquele local, mas também as regiões adjacentes, e assim sucessivamente (Júnior, 2003).

Outra atividade antrópica que muito favorece o aumento do efeito estufa, e vem causando grande discussão na atualidade, é a geração e lançamento de gases poluentes na atmosfera, como resultado do uso e da queima dos combustíveis fósseis (Lobato et al., 2009). Tais gases ficam concentrados principalmente nos locais onde existe uma maior atividade industrial e, a

concentração desses gases forma uma camada que retém o calor no local (Júnior, 2003; Barbosa et al., 2013).

Quando em excesso, essa camada de gases poluentes pode ser vista a olho nu nos grandes centros urbanos e, em mistura com outros gases já existentes na atmosfera terrestre, comporta-se como um mecanismo de isolamento térmico, uma vez que a radiação solar é retida na atmosfera terrestre e não consegue ser refletida de volta para o espaço. Essa radiação retida na atmosfera faz com que a temperatura média da Terra aumente, podendo atingir grandes proporções e dar origem ao que conhecemos, e já citado anteriormente, como aquecimento global.

As consequências da falta de controle e prevenção do efeito estufa é incalculável, uma vez que diferentes ecossistemas são afetados, ocasionando a possível extinção da fauna e flora ali presente (Viola, 2002).

Alguns exemplos das consequências esperadas pelo aumento do efeito estufa é o derretimento das geleiras (que trará consigo consequências no que diz respeito ao aumento dos níveis dos oceanos, rios e lagos, fazendo com que as comunidades litorâneas e ribeirinhas tenham que se deslocar para outros locais, além de alterar o regime de chuvas e temperatura em determinados locais); o aumento da probabilidade de ocorrência de cheias assim como de fenômenos naturais como furacões e tufões; o aumento do processo de desertificação nas regiões tropicais e subtropicais; epidemias de insetos e pragas nocivos à saúde humana, animal e vegetal; desequilíbrio agrícola; alteração das correntes marítimas, entre outras (Júnior, 2003; Martins et al., 2003; Lobato et al., 2009; Paz, 2009).

### **3.2. Gases do Efeito Estufa – GEEs**

A atmosfera terrestre é constituída por uma variedade de gases, sendo que os principais são o Nitrogênio e o Oxigênio, também conhecidos por  $N_2$  e  $O_2$  respectivamente, compondo cerca de 99% da atmosfera (Renner, 2004).

Outros gases também encontrados na atmosfera terrestre são os gases de efeito estufa, sendo os principais: dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), ozônio ( $O_3$ ) e o vapor de água ( $H_2O$ ). Tais gases recebem esse nome porque são capazes de absorver a radiação emitida pela superfície terrestre (radiação que voltaria para o espaço) e posteriormente emitir

tal radiação absorvida de volta para a superfície, fazendo com que o calor fique retido na atmosfera e a temperatura aumente (Toniolo & Carneiro, 2010).

Os clorofluorcarbonetos (CFCs) também são considerados gases de efeito estufa porém, sua problemática está além disso pois, os CFCs também são considerados os responsáveis pela destruição da camada de ozônio (Rocha, 2003).

A camada de ozônio presente na estratosfera tem por finalidade filtrar os raios solares ultravioletas que incidem sobre a Terra, uma vez destruída essa camada, a incidência desses raios será maior, ocasionando prejuízos nos sistemas ecossistêmicos assim como danos à saúde pública, como o aumento de casos de câncer de pele.

É válido ressaltar que a maior parte dos GEEs têm origem a partir de processos naturais, como consequência, por exemplo, da atividade vulcânica, decomposição da matéria orgânica e incêndios naturais. Porém, os GEEs que tem origem nas ações antrópicas, com um destaque para as emissões de CO<sub>2</sub> que, de acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2001) aumentaram significativamente após a revolução industrial, a partir da combustão de combustíveis fósseis e do aumento de indústrias cimenteiras, vem mostrando uma influente alteração em suas concentrações, fazendo com que os ciclos biogeoquímicos sejam alterados (Rocha et al., 2005).

### **3.3. Aquecimento Global**

O aquecimento do planeta através da energia fornecida pelo sol é um fenômeno natural e imprescindível para a manutenção da vida na Terra. A maior fonte de aquecimento da superfície terrestre é a energia solar, na forma de radiação. Em climatologia, o aquecimento global é considerado um desequilíbrio da radiação (Toniolo & Carneiro, 2010).

O planeta possui um equilíbrio radiante em relação à energia que recebe do sol. As emissões de GEEs a partir de atividades antrópicas e o aumento do aquecimento global dão origem a um desequilíbrio radiante, que por sua vez configura um grande problema ambiental enfrentado pela humanidade nos dias atuais, uma vez que o acúmulo de calor na forma de radiação cresce progressivamente.

Segundo o IPCC (2001), a temperatura média do planeta vem aumentando e, apesar de tal aumento parecer pequeno, essa diferença é capaz de causar uma modificação no clima de uma

região de forma a prejudicar a biodiversidade, regime de chuvas e secas, microclima local, entre outros.

Dentre os GEEs, o que mais contribui para o aquecimento global é o dióxido de carbono e, se sua concentração não for controlada, o aumento do nível das águas do mar e a alteração na variação dos eventos hidrológicos serão alguns exemplos das consequências do aumento da temperatura da Terra, colocando em risco a vida no planeta (Renner, 2004).

Atividades antrópicas, realizadas principalmente após a Revolução Industrial, conduziram a um aumento no uso de combustíveis fósseis principalmente na área industrial e de transporte, além de alavancar o desmatamento para obtenção de matérias primas como a madeira. Tais atividades fizeram com que a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido fossem as mais elevadas, contribuindo para o aumento e desequilíbrio do aquecimento global. “Suas emissões representam aproximadamente 55% do total das emissões mundiais de gases do efeito estufa. O tempo de permanência na atmosfera é de 50 a 200 anos” (Júnior, 2003).

De acordo com os modelos climáticos propostos pelo IPCC (2001), existe uma projeção de que a temperatura global da superfície aumentará em mais de 5°C entre os anos de 1990 e 2100 e, esse aumento será consequência das atuais e futuras emissões de GEEs. É válido ressaltar que, mesmo que os GEEs diminuam e se estabilizem, as atuais emissões têm efeitos a longo prazo, resultando em impactos climáticos durante séculos (Júnior, 2003), com isso, o aquecimento do planeta, sendo uma consequência tardia e prolongada, continuará a aumentar por muito tempo.

### **3.4. O Carbono**

O carbono é onipresente na natureza e seus compostos constituem a matéria viva, sendo este composto, portanto, de suma importância e fundamental para respiração, fotossíntese e regulação do clima (Barreto et al., 2009; Barbosa et al., 2013).

De acordo com Dieckow et al. (2004), encontramos o carbono em quatro grandes reservatórios: na hidrosfera, na geosfera, na atmosfera e na biosfera. A hidrosfera é o maior reservatório com o carbono na forma de carbonatos, seguida pela geosfera com o carbono distribuído no solo na forma orgânica e inorgânica e na litosfera na forma de rochas carbonatadas, carvão e petróleo. A atmosfera e a biosfera são os menores reservatórios. Na atmosfera, o carbono é encontrado

nas formas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e outros compostos, já na biosfera o mesmo se encontra nas estruturas orgânicas das plantas, animais e microorganismos.

### 3.4.1. Ciclo do Carbono

Na década de 70, a evidência do constante aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera em consequência de intensas atividades antrópicas, despertou o interesse acerca do ciclo do carbono (Neto, 2002). Semelhante a qualquer ciclo biogeoquímico, o ciclo do carbono possui reservatórios, fluxos e processos, onde fatores externos influenciam os processos, geram fluxos entre os reservatórios, e consequentemente fazem o ciclo funcionar (Dieckow et al., 2004). Por outras palavras, o ciclo do carbono é formado por vários processos que têm como objetivo retirar o carbono de um determinado reservatório, incorporá-lo em compostos e reações de outros reservatórios e, após algum tempo, incorporá-lo novamente em seu reservatório de origem (Pacheco & Helene, 1990).

O ciclo global do carbono envolve vários compostos, sendo o hidrocarboneto, o metano, o dióxido e o monóxido de carbono considerados os principais, porém, a maior parte do carbono no planeta se encontra armazenado em camadas geológicas e sedimentos do oceano, estando na forma de carbonatos, carvão e petróleo (Pacheco & Helene, 1990).

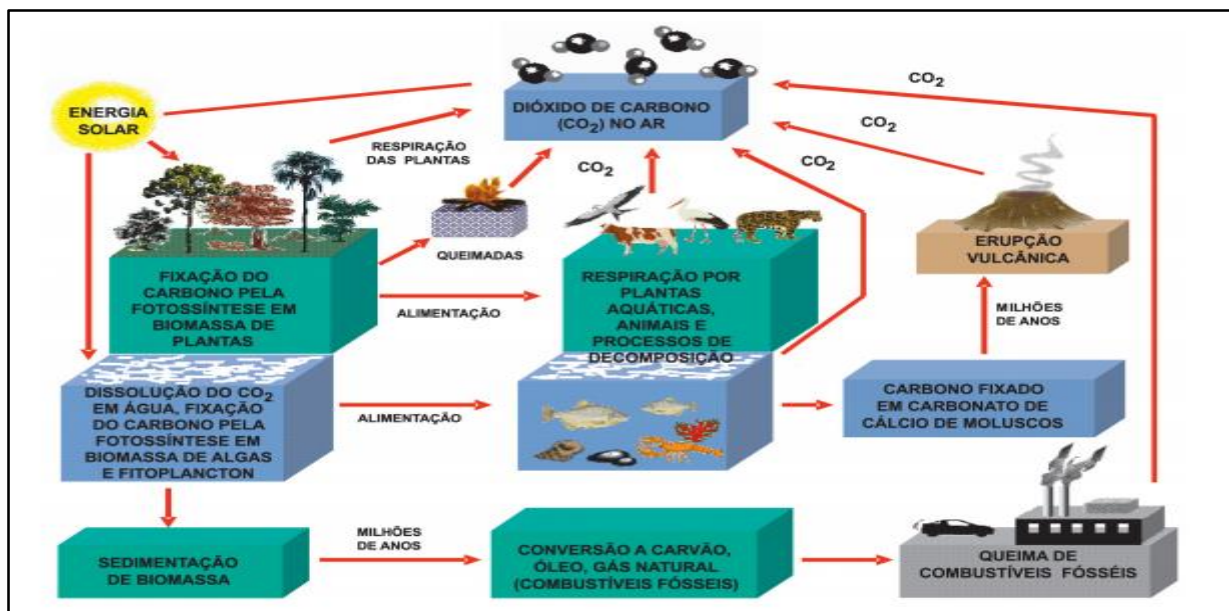


Figura 2 – Ciclo Global do Carbono. Adaptado de Martins et al. (2003).

Podemos observar na Figura 2 a existência de diversos reservatórios que contribuem para a emissão de carbono para a atmosfera, sendo a fotossíntese o único meio de absorção, e

aproveitamento na formação de biomassa, identificando-se assim as principais causas da acumulação de carbono na atmosfera (Júnior, 2003). De acordo com Renner (2004), o ciclo global do carbono possui vários ciclos simples; os que envolvem plantas vivas e oceanos tem a capacidade de mudar a concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico em questão de semanas e/ou meses, já os que envolvem rochas precisam de milhões de anos.

#### ***3.4.2. O Carbono na Atmosfera***

A atmosfera é uma camada de ar que envolve o planeta Terra, sendo constituída por vários gases, protegendo a superfície terrestre e mantendo-a em condições ideais para a vida (Martins et al., 2003).

A partir da Revolução Industrial, a queima de combustíveis fósseis cresceu exponencialmente para usos principalmente no setor industrial e de transporte, acompanhado pelo grande crescimento populacional mundial e do setor agropecuário, tendo como consequências imediatas e tardias, por exemplo, as queimadas e o desmatamento das florestas, aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, efeito estufa e aquecimento global.

Um átomo de carbono não muda de característica de acordo com sua fonte, com isso, pode ser retirado da atmosfera e incorporado num sistema em qualquer lugar (Fearnside, 2001). O ciclo do carbono ajuda a incorporar na biomassa e em compostos inorgânicos grande quantidade de carbono, permanecendo apenas 25 % de toda a quantidade no ar atmosférico (Júnior, 2003).

A forma mais abundante de carbono na atmosfera é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e a sua concentração tem vindo a aumentar devido às atividades antrópicas. O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera contribui para o aumento da retenção de calor e da temperatura do planeta (Renner, 2004).

Sem as atividades antrópicas que aceleram e aumentam o CO<sub>2</sub> na atmosfera, as concentrações do mesmo estariam em equilíbrio a partir dos processos de fotossíntese e de respiração. Ambos os processos se complementam e, se ocorresse apenas fotossíntese, o CO<sub>2</sub> na atmosfera seria tão baixo que a temperatura do planeta iria cair por escassez deste gás, o processo de respiração completa esse sistema, libertando CO<sub>2</sub> (Renner, 2004).

Ações que visam a conservação dos ecossistemas terrestres (vegetação e solos), como a preservação de matas e florestas nativas, reflorestamento, adoção de sistemas agroflorestais,

recuperação de áreas degradadas, uso de energias e combustíveis renováveis, entre outras medidas de conservação e proteção do meio ambiente, contribuem de forma significativa para a redução do CO<sub>2</sub> atmosférico.

### ***3.4.3. O Carbono nas Florestas***

Como já mencionado anteriormente, o carbono é um dos principais elementos que contribui para o efeito estufa e consequente aquecimento global. A conservação das florestas reduz a quantidade de carbono livre na atmosfera e aumenta o sequestro de carbono nos ecossistemas terrestres (Júnior, 2003).

A capacidade das florestas em trocar carbono com a atmosfera através da fotossíntese e da respiração e, armazenar carbono em diversos compartimentos (vegetação, resíduos orgânicos, solo) a longo prazo, faz com que as mesmas se destaquem na atual problemática do ciclo global do carbono (Renner, 2004; Sil, 2014). A importância da sua capacidade na retenção e armazenamento de carbono é tal que, no Protocolo de Kyoto as florestas são consideradas sumidouros de carbono, além da possibilidade de serem contabilizadas no cumprimento das metas estabelecidas pelo referido Protocolo (Gonçalves, 2012).

O crescimento das florestas, a partir dos processos de fotossíntese e respiração, precisa principalmente de CO<sub>2</sub>, disponível em 0,03% do volume da atmosfera ou 0,05% da massa da atmosfera (Renner, 2004).

#### **3.4.3.1. A Biomassa e o Carbono**

Com a capacidade de absorver boa parte do carbono presente na atmosfera, e principalmente aquele proveniente de atividades antropogênicas, as plantas podem transformar substâncias inorgânicas, presentes no ciclo do carbono por exemplo, em biomassa, de forma direta (Pacheco & Helene, 1990).

O carbono da vegetação tem origem a partir da absorção e fixação do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera na biomassa e, parte dessa biomassa, posteriormente, se transforma em matéria orgânica que é depositada sobre e abaixo do solo (Costa, 2015). A avaliação do teor de carbono nos diferentes compartimentos da vegetação se faz a partir da quantificação da biomassa vegetal em cada componente, sendo esta avaliação importante para estudos quanto ao balanço energético e ao ciclo do carbono na atmosfera (Júnior, 2003).

De acordo com Gonçalves (2012), as florestas possuem grande importância quanto à sua função de assimilar carbono e armazená-lo na sua biomassa através do processo de fotossíntese.

É válido ressaltar que todo o carbono armazenado na biomassa pelo processo da fotossíntese pode retornar à atmosfera através, por exemplo, de mudanças do uso da terra, práticas de gestão e conservação do solo e, desmatamento e queimadas de florestas. As emissões de GEEs em consequência do desmatamento são proporcionais à biomassa florestal eliminada (Fearnside, 2001).

### **3.4.3.2. O Solo e o Carbono**

O solo é um recurso não renovável à escala humana e a sua conservação é de suma importância devido ao seu potencial de sustentação da vegetação, suporte da biodiversidade terrestre, além de ser considerado um reservatório de carbono. Dentre os serviços ecossistêmicos, o armazenamento de carbono no solo tem elevada importância, devido ao seu efeito nos processos atmosféricos associados às alterações climáticas (Sil et al., 2016).

O armazenamento de carbono no solo, assim como as taxas de aumento do carbono orgânico no mesmo, estão diretamente relacionados com as condições encontradas no local, como por exemplo o clima, temperatura e humidade, relevo, drenagem, manejo, uso e práticas culturais, textura e profundidade do solo. Nos ecossistemas terrestres das zonas temperadas, como é o caso de Portugal, a primeira fonte de variação temporal do potencial de armazenamento de carbono tem origem na variação das propriedades do próprio solo (Fonseca & Figueiredo, 2010).

O solo é um componente de destaque no ciclo global do carbono, uma vez que o CO<sub>2</sub> retirado da atmosfera pelo processo de fotossíntese, é incorporado posteriormente no solo através da acumulação e decomposição de restos vegetais e, que estão na origem do armazenamento de carbono orgânico no solo. É válido ressaltar que tal armazenamento depende da quantidade e qualidade da folhada produzida e da taxa de decomposição da mesma, fatores que são influenciados pela temperatura, humidade, composição da biomassa e atividade biológica do solo (Gonçalves et al., 2013; Fonseca & Figueiredo, 2018).

### **3.5. Aquecimento Global: Consciência e Preocupação Global**

O aquecimento global tem sido uma das temáticas mais discutidas atualmente e, questões relacionadas com as mudanças climáticas têm ganhado importância a cada novo estudo e formulações de perspectivas sobre suas consequências no futuro próximo do planeta.

Como uma resposta às atividades antrópicas intensificadas ao longo dos anos, as alterações climáticas, além dos efeitos na temperatura média global, trás também mudanças significativas no regime das chuvas, padrões de ventos e circulação das correntes marítimas por exemplo, resultando em eventos extremos, intensos e/ou frequentes como cheias, secas, tempestades e perda da biodiversidade e dos ecossistemas em diferentes locais do planeta. De acordo com Renner (2004), existe ainda a possibilidade do aumento de doenças relacionadas com o calor e as transmitidas por mosquitos, e ainda a migração de populações, em função das alterações climáticas.

#### ***3.5.1. Acordos Internacionais***

Após a Segunda Guerra Mundial, os danos resultantes das intensas e incontroladas atividades humanas deram início a uma grande discussão por cientistas e organizações não governamentais (ONGs), acerca dos efeitos prejudiciais dessas atividades.

Com o início da conscientização acerca dos problemas ambientais resultantes de atividades antrópicas intensas, tornou-se imprescindível o encontro das principais e mais influentes potencias mundiais afim de se colocar em pauta discussões referentes ao desenvolvimento sustentável e consequente preservação da natureza e seus recursos.

Em 1972, na Suécia, a Conferência de Estocolmo reuniu representantes de cerca de 133 países e inúmeras instituições ambientais, governamentais e não governamentais, afim de se discutir polêmicas questões acerca do meio ambiente. O resultado de tal conferência culminou no entendimento, por parte de todos os presentes, de que as gerações futuras têm o direito de viver num ambiente digno e não degradado (Pena, 2017).

Já em 1992, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, representantes de mais de 170 países e milhares de organizações reuniram-se na Eco-92 (ou Rio-92) para discutirem problemas ambientais existentes naquela época e suas futuras consequências (Francisco, 2017; Pena, 2017). Como resultado, importantes acordos ambientais foram assinados – como por exemplo a Conservação

da Biodiversidade, Conservação do Clima e Agenda 21. Também foi assinado a Convenção Quatro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) que aborda problemas relacionados com o efeito estufa e define que novas conferências serão realizadas anualmente para se avaliar e discutir os resultados advindos dos acordos assinados (Rocha, 2003; Renner, 2004).

### ***3.5.2. Conferências das Partes – COPs***

Após a assinatura da UNFCCC pelos países, onde ficou definido que deveriam ser realizadas anualmente novas conferências (Figura 3), tendo sido dado o nome de Conferência das Partes (COPs) a estes encontros, onde as partes são os países, a COP é um órgão supremo da UNFCCC e as definições finais de cada encontro devem ser aceites por unanimidade por todas as partes, tornando tais definições soberanas e devendo ser aceites pelo países signatários (Rocha, 2003; Renner, 2004). É responsabilidade da COP tomar as medidas necessárias e promover a implementação da Convenção e das medidas aceites de forma eficaz.

A primeira COP foi realizada na cidade de Berlim, Alemanha no ano de 1995, uma vez que a Convenção do Clima só entrou em vigor em 1994, seguida pela COP-2 em Genebra, Suíça em 1995. Na COP-3, realizada em Kyoto no Japão, um importante protocolo foi aceite pelas partes, e recebeu o nome da cidade onde foi adotado, Protocolo de Kyoto.

O Protocolo de Kyoto apresenta a aceitação de países desenvolvidos em reduzir ou limitar as emissões de gases que contribuem para o aumento do aquecimento global, entre 2008 e 2012 (Resende et al., 2001). Tais emissões se referem ao GEEs de origem antrópica e, essa redução deverá ser no mínimo de 5% em relação às emissões anteriores a 1990, porém o Protocolo não estabelece nenhuma penalidade para as partes que não cumprirem tal redução. Contudo, o mesmo apresenta medidas flexíveis que poderão ajudar na redução das emissões dos GEEs, uma dessas medidas é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

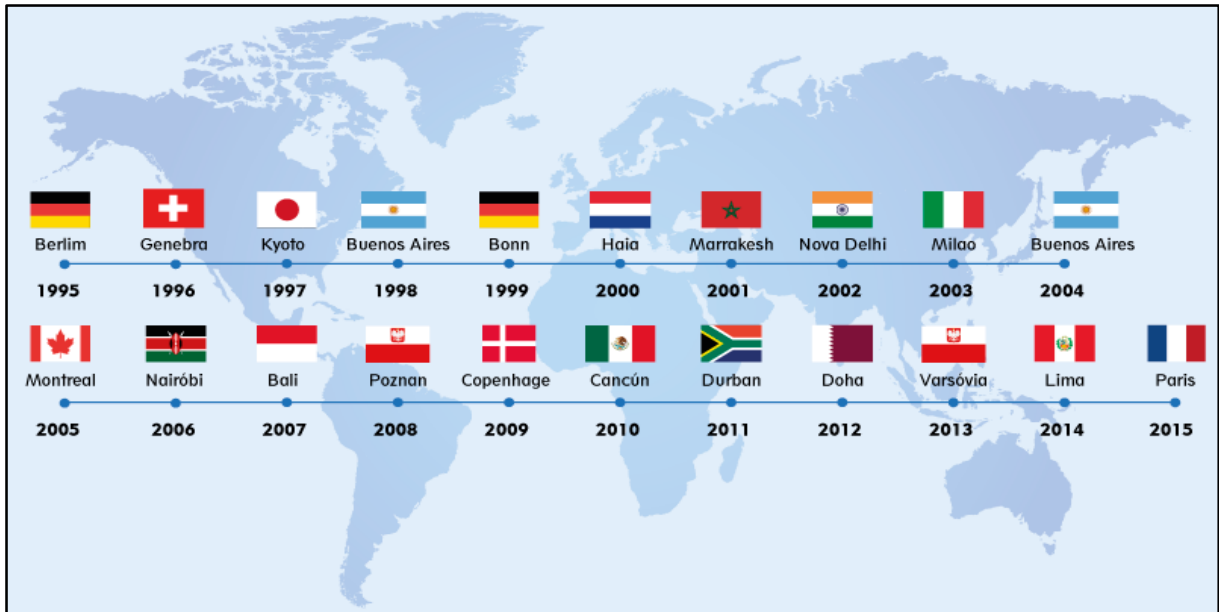


Figura 3 – Histórico de realização das Conferências das Partes (COPs). Adaptado de MMA, (2017).

### 3.5.3. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

Considerado um “mecanismo de flexibilidade” dentro do Protocolo de Kyoto, o MDL, assim como os outros mecanismos flexíveis, ajuda os países desenvolvidos a cumprirem as metas de redução de GEEs mas, é o único que inclui países em desenvolvimento, sendo o principal meio para a participação dos mesmos no referido Protocolo.

O MDL tem como objetivo certificar projetos implementados nos setores energéticos, de transporte e florestal, que visem sequestrar o carbono da atmosfera e reduzir as emissões de GEEs e, conceder o Certificado de Emissões Reduzida (CERs). Esses projetos seriam realizados em países em desenvolvimento e os certificados seriam vendidos a países desenvolvidos, para que os mesmos possam cumprir as metas de redução das emissões.

Além de poder emitir os CERs, os países em desenvolvimento podem ainda receber ajuda financeira e tecnológica para a realização de atividades sustentáveis e de redução das emissões globais (Júnior, 2003).

### 3.6. Sequestro de Carbono

A intensificação das atividades industriais e o aumento das emissões de GEEs constituem uma preocupação mundial, principalmente no que diz respeito às consequências que essas emissões vêm causando no meio ambiente.

A formação e o aumento do teor de dióxido de carbono na atmosfera constituem uma das principais preocupações atuais dos cientistas, uma vez que aquele gás é o principal poluente responsável pelo aumento do efeito estufa e consequente aquecimento global (Rocha et al., 2005; Dieckow et al., 2004). Além de ter origem em atividades antrópicas, o dióxido de carbono também resulta de fenômenos naturais, como o vulcanismo e a sismologia. A Conferência de Kyoto, realizada em 1997, introduziu o conceito de sequestro de carbono, com o objetivo de conter e reverter a acumulação deste poluente na atmosfera, além de diminuir o efeito estufa (Júnior, 2003; Renner, 2004). Apesar de muitos autores também usarem o termo fixação de carbono, ambos caracterizam um mesmo fenômeno: absorção de dióxido de carbono por um determinado meio (Toniolo & Carneiro, 2010).

O sequestro de carbono é um fenômeno predominantemente natural, sendo o principal processo que contraria o efeito estufa, uma vez que estabelece o equilíbrio dinâmico entre as emissões de dióxido de carbono e a sua retenção na biomassa (Júnior, 2003; Sil, 2014).

Nos ecossistemas terrestres, o sequestro de carbono engloba tanto o armazenamento de carbono da atmosfera quanto a prevenção de emissão de gases dos ecossistemas. A vegetação e o solo têm capacidade de armazenar carbono e, a longo prazo, o total de carbono armazenado num sistema reflete o balanço entre a absorção pelas plantas, a fixação no solo e as perdas por respiração e pela decomposição da matéria orgânica (Resende et al., 2001).

### ***3.6.1. Sequestro de Carbono nas Florestas***

Como referido anteriormente, o conceito de sequestro de carbono surgiu a partir da COP-3, em Kyoto no Japão, após a aprovação dos mecanismos de flexibilidade para a redução de GEEs. A partir de tais mecanismos, o sequestro de carbono nas florestas foi incorporado como uma modalidade dentro do MDL.

O MDL no setor florestal pode ser beneficiado por projetos de florestamento e reflorestamento, onde o carbono será removido da atmosfera através do crescimento das árvores, e a floresta plantada atuará como um sumidouro de carbono (Júnior, 2003).

Consideradas como sinónimo de boa qualidade do ar, as florestas têm um importante papel na dinâmica do planeta Terra, uma vez que são capazes de regular as precipitações, proteger o solo, contribuir para o armazenamento de carbono e libertar oxigénio (Toniolo & Carneiro,

2010). Podendo armazenar por um longo tempo o carbono, as florestas são grandes reservatórios deste elemento, apresentando 80% de todo o carbono armazenado na vegetação terrestre e 40% no solo (Renner, 2004; Barbosa et al., 2013), é válido ressaltar que o carbono só é retirado da atmosfera quando as árvores e florestas se encontram em crescimento, fato que é importante e atrativo para projetos que visem a recuperação de ecossistemas naturais em áreas degradadas, através da regeneração e reflorestamento, que aumentam consideravelmente a biomassa e, conseqüentemente, o armazenamento de carbono (Barbosa et al., 2013).

### ***3.6.2. Sequestro de Carbono nos Solos***

É possível dizer que a produtividade das plantas, a degradação do solo e o sequestro de carbono estão ligados entre si, uma vez que a alteração da qualidade do solo tem como consequência a redução do teor de carbono orgânico no mesmo e o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Barbosa et al., 2013).

O solo é o maior reservatório de carbono terrestre (Petrokofsky et al., 2012), podendo armazenar maior quantidade de carbono em relação à vegetação, além de ser um reservatório mais estável (Sil, 2014; Vagen & Winowiecki, 2013).

O armazenamento de carbono no solo tem grande importância nos serviços ecossistêmicos, podendo apresentar efeitos nos processos atmosféricos associados às alterações climáticas (Sil et al., 2016), além de gerar benefícios a solos degradados e à produção de biomassa, e melhorar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

A decomposição da folhada na superfície dos solos, os exsudatos e a morte de raízes, influenciam a quantidade de carbono presente nos solos florestais (Fearside, 2010), podendo estes ainda reter quantidades suplementares de carbono se enriquecidos com fertilizantes quando da instalação de novas plantações (Renner, 2004). De acordo com Petrokofsky et al. (2012) e Sil (2014), o armazenamento de carbono no solo se faz a partir do balanço entre as entradas (materiais provenientes da matéria orgânica) e saídas (decomposição e mineralização da matéria orgânica) deste compartimento, e este balanço sofre influências a partir do manejo e uso do solo, clima local, relevo e drenagem.

Atividades e práticas de gestão do solo adequadas são importantes na melhoria do sequestro de carbono na biomassa e no próprio solo, tendo também um impacto positivo nos aspectos ambientais e agrícolas, assim como na biodiversidade dos ecossistemas (Barbosa et al., 2013).

### **3.7. Mercado do Carbono**

A partir do Protocolo de Kyoto e do MDL observa-se que grandes empresas comprometidas em reduzir as emissões sem diminuir a produção, procuram investir em projetos ambientais realizados em outros países, para obterem, com isso, os denominados Certificados de Redução de Emissões – CREs (Júnior, 2003; Renner, 2004).

Os países desenvolvidos que não conseguem reduzir as taxas de emissões de GEEs podem comprar a empresas e/ou países em desenvolvimentos os CREs. A comercialização desses Certificados abriu as portas para um novo mercado denominado “mercado do carbono” (Júnior, 2003; Rocha, 2003; Renner, 2004; Sil, 2014).

O mercado do carbono funciona a partir da compra e venda de créditos de carbono. Criar um mercado onde as emissões são negociadas é igual a criar qualquer outro mercado de *commodities*, iniciando seu desenvolvimento com a definição, pelo governo, da quantidade de emissões que poderão ser negociadas (Rocha, 2003; Renner, 2004; Barreto et al., 2009). Com isso, os créditos de carbono passam a ser *commodities*, negociadas e vendidas em mercados nacionais e internacionais através da Bolsa de Valores e de Mercadorias (Barbosa et al., 2013).

O mercado do carbono não possui legislação doméstica ou internacional que torne legítimo os direitos ligados às permissões ou créditos com origem em projetos, em execução, de sequestro de carbono ou redução de emissões (Rocha, 2003).

### **3.8. Florestamento e Reflorestamento**

A preocupação sobre o uso, manejo e preservação das florestas e seus recursos aumentou quando a matéria-prima proveniente da mesma perdeu sua qualidade e ficou escassa para o uso da população.

Atividades agropecuárias geram grande destruição e degradação das florestas, assim como a procura de madeira como mercadoria, e as necessidades de lenha e outros recursos florestais que asseguram a sobrevivência das populações locais (Renner, 2004). Além disso, o

crescimento económico e industrial também gera grande degradação, uma vez que os mesmos são movidos pelo uso de matérias-primas provenientes de recursos naturais vulneráveis e limitantes.

Um modelo económico e industrial adaptado à sustentabilidade e preservação do meio ambiente é de suma importância, uma vez que a vida, sem o uso da natureza e seus recursos, é impossível. Transformar matéria-prima em produtos é um processo inevitável e necessário à vida (Neto, 2002).

As florestas contribuem para a redução do efeito estufa, isso se deve ao facto de que o crescimento florestal tem o potencial de absorver e armazenar carbono por um longo período, até mesmo após as árvores atingirem sua idade adulta. Esse processo é feito de forma natural através da fotossíntese e consequente produção de biomassa (Sil, 2014). Quando as árvores das florestas são cortadas, tem-se como resultado a emissão de carbono para a atmosfera mas, quando novas árvores são plantadas, o crescimento das mesmas absorve o carbono, removendo-o de forma natural da atmosfera.

No setor florestal podem ser realizados projetos de florestamento e reflorestamento, contribuindo para a remoção de carbono presente na atmosfera através do crescimento das árvores e, assim, a floresta plantada constitui um sumidouro de carbono, a partir do sequestro deste componente (Júnior, 2003).

Tais projetos de florestamento e reflorestamento só foram considerados como um MDL a partir da COP-9, realizada em Milão, Itália e, processos simplificados que facilitem a implementação desses projetos em pequena escala, no âmbito do MDL, só foram aceites na COP-10 (Paz, 2009).

A recuperação, florestamento e reflorestamento, proteção e gestão sustentável de áreas degradadas em consequência das atividades antrópicas, podem conduzir a uma redução da concentração de poluentes na atmosfera terrestre, e ajudar de forma efetiva no combate contra o aquecimento global (Rocha, 2003; Júnior, 2003; Renner, 2004; Paz, 2009; Doubrawa, 2013).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Localização e caracterização da Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na Serra da Nogueira, em locais onde estão presentes a espécie arbórea *Quercus pyrenaica*, que constitui a vegetação climácica da Serra e as espécies introduzidas em operações de reflorestamento, *Pseudotsuga menziesii* e *Pinus nigra*.

A Serra da Nogueira está inserida na região mediterrânea, e a área selecionada para a realização do presente estudo (Figura 4) localiza-se a 41°45' N e 6°52' W, numa faixa de altitude que varia entre os 1000 e 1100 metros, com temperatura média anual de 12°C e precipitação média anual de 1100 mm (INMG, 1991). Os solos estão integrados na unidade Leptosolos dístricos órticos derivados de xisto (Agroconsultores & Coba, 1991). A vegetação climácica é constituída por *Quercus pyrenaica* (QP), que ocupa cerca de 6000 ha e constitui a maior área contínua de QP em Portugal. Ao longo das últimas décadas, parte da área de QP foi substituída por outras espécies florestais, nomeadamente *Pseudotsuga menziesii* (PM) e *Pinus nigra* (PN), processo onde os incêndios tiveram um papel relevante.

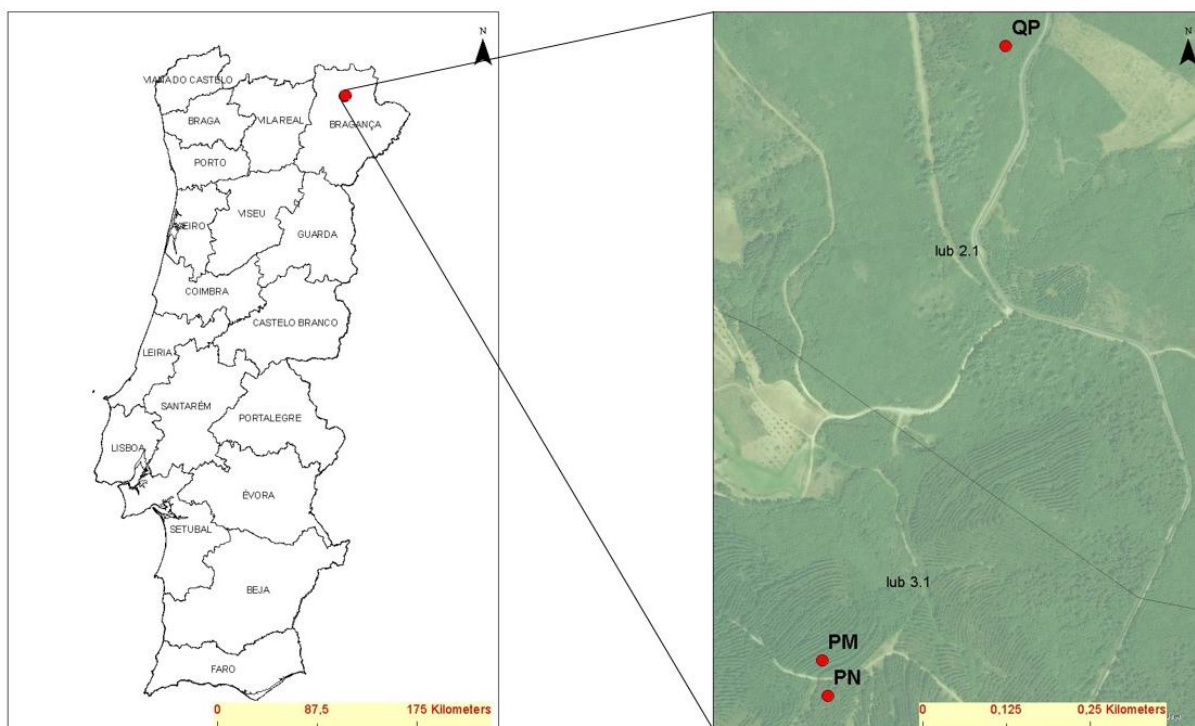


Figura 4 – Localização da área de estudo.

A Serra da Nogueira, localizada no nordeste de Portugal Continental, é formada por um maciço montanhoso que abrange os conselhos de Bragança, Macedo de Cavaleiros e Vinhais, todos pertencentes ao distrito de Bragança (Vale, 2008; Silva, 2014; Vilela, 2017).

Com orientação N-S, a Serra da Nogueira ergue-se a sudoeste da cidade de Bragança, e apresenta uma extensão de aproximadamente 13 km. A sul da Serra da Nogueira localiza-se a Serra de Bornes, a norte a Serra de Montesinho, e a nordeste a Serra de Sanábria. A poente, podemos observar os contornos da Serra da Corôa e do Cerro e Penhas Juntas (Vale, 2008; Silva, 2014).

A formação geológica é constituída essencialmente por xistos argilosos e cloríticos, talcos ou pedra molar, e afloramentos de ferro. Nas suas encostas estão presentes as nascentes de águas frescas e cristalinas dos Rios Azibo e Fervença, e das Ribeiras de Vilares e Carvalhais (Vale, 2008; Silva, 2014).

Em relação à fauna, a Serra da Nogueira é considerada um museu vivo de espécies animais, uma vez que as condições oferecidas pela mesma são naturais e muito bem preservadas, tornando-a um local de proteção e preservação de espécies que poderiam estar extintas (Vale, 2008).

A flora presente na serra é muito abundante, mas a espécie que mais se destaca e enriquece o local é o carvalho negral (*Quercus pyrenaica*), por caracterizar a mais extensa mancha florestal de carvalhos em Portugal (Vale, 2008).

## **4.2. Espécies em Estudo**

Como referido anteriormente, o presente trabalho irá focar seus estudos e análises em três espécies florestais, sendo elas o *Quercus pyrenaica*, a *Pseudotsuga menziesii* e o *Pinus nigra*.

### **4.2.1. *Quercus pyrenaica***

Carvalho-Negral é um dos nomes comuns dado à espécie *Quercus pyrenaica* (Figura 5). Tem como característica a facilidade de se adaptar a locais frios e altos, o que faz com que esta espécie se encontre distribuída pelo sudoeste da Europa, passando pelo ocidente da França até chegar a Portugal, na região de Trás-os-Montes e Beira Alta (Carvalho, 2000; JBUTAD, 2017a).

Aparece em locais onde o clima varia entre o mediterrâneo e o continental. Tolerando períodos de seca, precisando apenas de 600 mm de precipitação anual, porém precisa de uma elevada humidade atmosférica. Está adaptada a solos de textura arenosa, com preferência por solos siliciosos puros ou com argila, secos ou húmidos, originados de xistos ou granitos. Por ser calcífuga, não se adapta a solos ricos em carbonatos. Pode atingir uma altura de 20-25 m, mas apresenta um porte tortuoso. As raízes são fortes e pivotantes, conferindo à espécie elevada resistência ao vento (JBUTAD, 2017a).

Nas regiões do interior de Portugal, metade Este do país, existe uma melhor adaptação ecológica da espécie, onde a mesma ganha grande expressão e compõe as mais extensas e belas paisagens de carvalhais (Carvalho et al., 2005). A maior e mais importante mancha de carvalhal de *Quercus pyrenaica* encontrada em Portugal, com cerca de 6000 ha, forma uma continuidade que se estende desde o Parque Natural de Montesinho até à Serra da Nogueira (ICNF, 2017), atingindo maior representação na Serra da Nogueira.

É uma espécie que apresenta importantes funções quanto a conservação do solo, da água, da biodiversidade, do clima e da paisagem natural, além de melhorar a economia local e regional a partir da matéria prima lenhosa e não lenhosa recolhida pela população (Magnoni, 2017). De acordo com Vilela (2017), é uma espécie que gera maior preocupação na preservação de alguns núcleos de significativa dimensão existentes, como o da Serra da Nogueira, que a preocupação de promover de forma artificial a sua expansão em larga escala.



Figura 5 – A espécie *Quercus pyrenaica*, na Serra da Nogueira.

#### **4.2.2. *Pseudotsuga menziesii***

Nativa do ocidente da América do Norte, a espécie *Pseudotsuga menziesii* (Figura 6) é uma conífera de crescimento rápido e considerada de grande porte por ter a capacidade, quando adulta, de atingir 100 m de altura na região de origem e 50 m de altura na Europa (SERRALVES, 2017; Planfor, 2017; JBUTAD, 2017b).

É uma árvore que exige solos ricos e profundos, com a matéria orgânica originada da madeira bem decomposta, e sem exageros quanto a humidade e compactação, uma vez que o sistema radicular necessita de ser bem arejado. Tem necessidade de um clima húmido, pelo que, climas oceânicos com seca estival no máximo 2-3 meses e precipitações mínimas de 300 mm no período vegetativo e 800 mm anuais, são características adequadas ao seu desenvolvimento (JBUTAD, 2017b).

Necessita de plena luz para se desenvolver de forma adequada, e o seu rápido crescimento faz com que seja uma espécie apropriada no reflorestamento de áreas de climas húmidos. Comparada com outras coníferas europeias, esta espécie possui um grande rendimento em madeira dura, resistente e fácil de trabalhar (SERRALVES, 2017).

É uma espécie que suporta muito bem o frio de inverno e a neve, mas é sensível às geadas e, os tenros rebentos de primavera e o delgado ritidoma das ramificações e guias no verão, podem danificar-se com facilidade pelo granizo (JBUTAD, 2017b).

A espécie foi introduzida em 1840 em Portugal, no Parque da Pena em Sintra, pelo Rei D. Fernando II, sendo atualmente bastante difundida, no centro e norte do país, por se adaptar com facilidade às condições ecológicas do nível montanhoso e sub-montanhoso (SERRALVES, 2017).



Figura 6 – A espécie *Pseudotsuga menziesii*, na Serra da Nogueira.

#### **4.2.3. *Pinus nigra***

Nativa das zonas costeiras do centro e do sul da Europa, a espécie *Pinus nigra* (Figura 7) é uma conífera de crescimento rápido que pode viver por longos anos. Resiste ao calor, seca, vento, salinidade, neve e gelo. É amplamente cultivada para fins ornamentais (Enescu et al., 2016). Foi introduzida em Portugal, e hoje se encontra em expansão.

É uma espécie presente em altitudes que variam de 250 a 2000 metros, precipitações de 500 a 1700 mm e temperaturas de -30°C a 38°C. Gosta de luminosidade e de solos soltos, profundos, frescos e com cobertura orgânica. Tem crescimento mais lento nos primeiros anos, mas crescimento rápido após alcançar o porte arbóreo. Possui tronco reto, elevado e limpo, com casca escamosa (JBUTAD, 2017c; Earle, 2017).



Figura 7 – A espécie *Pinus nigra*, na Serra da Nogueira.

#### **4.3. Avaliação da Massa de Carbono no Sistema**

Para a avaliação da massa de carbono no sistema, foi realizada a seleção de uma área de amostragem em cada espécie, e recolha dentro dessa área de amostras representativas da vegetação herbácea, horizontes orgânicos e solo, assim como medição (altura e diâmetro) das árvores presentes. A quantidade de carbono armazenado por um sistema florestal sofre influências quanto a idade das árvores, período sazonal, tipologia da espécie arbórea e gestão florestal realizada (Sil, 2014).

#### 4.3.1. Seleção das áreas de amostragem

Para avaliar o efeito da modificação do coberto vegetal no sistema florestal da Serra da Nogueira quanto ao armazenamento de carbono na biomassa das espécies florestais, na biomassa da vegetação herbácea, nos horizontes orgânicos e no solo, foram selecionadas três áreas de amostragem, em povoamentos de *Quercus pyrenaica* (QP), que representa a situação de referência e outras duas em povoamentos das espécies introduzidas *Pseudotsuga menziesii* (PM) e *Pinus nigra* (PN), localizados em zonas adjacentes sobre litologia de xisto e com características edafo-climáticas similares. As espécies PM e PN foram introduzidas há 30 anos e mostram diferenças na densidade, altura e diâmetro, aspetos que se traduzem numa maior produtividade para a espécie PM (volume e área basal). As árvores de QP resultaram de regeneração natural, são relativamente delgadas e baixas e apresentam elevada densidade por hectare (Quadro 1).

Quadro 1 – Caracterização dos povoamentos florestais em estudo.

	QP	PM	PN
Densidade (Nº Árvores ha <sup>-1</sup> )	2433	1189	967
Idade (anos)	-	30	30
Altura dominante (m)	10,4	23,3	16,1
Altura média (m)	8,7	-	15,4
Diâmetro médio quadrático	12,3	25,7	23,8
Diâmetro dominante (cm)	18,6	35,4	30,1
Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	28,7	62,1	43,4
Volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	156,9	532,5	278,5

Em cada área de amostragem, foram definidas aleatoriamente três parcelas de 315 m<sup>2</sup> cada (parcelas circulares com 10 m de raio). Em cada parcela procedeu-se à medição da altura e do diâmetro à altura do peito de todas as árvores, com vista à caracterização dos povoamentos e estimativa da quantidade de biomassa aérea e radicular das árvores.

#### 4.3.2. Recolha de amostras

Como referido, o armazenamento de carbono foi avaliado em quatro compartimentos de cada sistema em estudo: espécie florestal, vegetação herbácea, horizontes orgânicos e solo mineral. As amostras da vegetação herbácea, dos horizontes orgânicos e do solo foram colhidas nas três parcelas de cada área de amostragem das três espécies em estudo.

#### **4.3.2.1. Amostras da Vegetação Herbácea e dos Horizontes Orgânicos**

Em cada parcela foram selecionados de forma aleatória cinco pontos com vista à recolha dos horizontes orgânicos, vegetação herbácea e solo, totalizando 15 pontos de recolha de material por área de amostragem para cada espécie.

A recolha do material orgânico realizou-se numa área de 0,49 m<sup>2</sup> por ponto e, as amostras foram subdivididas, segundo os critérios morfológicos, nas camadas L, F e H. A camada L é constituída por resíduos orgânicos intactos caídos recentemente e perfeitamente identificáveis quanto à origem, a camada F integra material orgânico parcialmente decomposto, mas ainda reconhecível quanto à origem e a camada H composta por material orgânico bem decomposto, onde as estruturas das plantas geralmente não são reconhecíveis, engloba uma quantidade considerável de matéria mineral (Wesemael 1993; van Delft et al. 2006).

A vegetação herbácea, composta essencialmente por gramíneas, encontrou-se apenas nas áreas de amostragem das espécies QP e PN. Efetuou-se a colheita da parte aérea nos mesmos pontos onde se procedeu à recolha do material orgânico. É valido ressaltar que não houve recolha de vegetação herbácea na espécie PM, pois a deficiência de luminosidade não permitiu o crescimento da mesma.

#### **4.3.2.2. Amostras de Solo**

As amostras de solo também foram colhidas nos mesmos pontos anteriormente referidos. Como as concentrações de carbono variam ao longo do perfil do solo, isto é com a profundidade, sendo essas variações mais acentuadas nas camadas superficiais, as amostras de solo foram colhidas nas profundidades 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm. Assim, para cada espécie, obteve-se 75 amostras de solo, perfazendo um total de 225 amostras de solo analisadas.

As amostras de solo não perturbadas, para determinação da densidade aparente, foram colhidas nas mesmas profundidades, utilizando-se para o efeito um cilindro de 100 cm<sup>3</sup> de volume.

#### ***4.3.3. Determinação do Carbono nos sistemas***

Para a determinação do carbono armazenado nos diferentes compartimentos dos três sistemas florestais (PM, PN e QP), foi estimada a biomassa das espécies florestais e analisadas em laboratório as amostras de vegetação herbácea, horizontes orgânicos e solo.

#### 4.3.3.1. Carbono nas Espécies Florestais

A determinação do carbono armazenado nas espécies florestais, implicou a estimativa da biomassa de cada espécie. O cálculo da biomassa total de cada espécie realizou-se a partir da divisão da mesma em duas componentes, biomassa aérea (BA) e biomassa das raízes (BR). Ambas foram estimadas através de uma equação (Quadro 2, ver Equação 2) definida por Montero et al. (2005). Para a obtenção dos valores da biomassa (kg de matéria seca) aplicou-se um coeficiente de correção (Quadro 2, ver Equação 1). Os valores da biomassa, assim obtidos, foram convertidos em carbono, assumindo que 50% da biomassa é carbono, o que é comumente aceite (Laclau, 2003; Gonçalves et al., 2013; Petrokofsky et al., 2012; Sil, 2014).

Quadro 2 – Equações para estimativa da biomassa aérea (BA) e das raízes (BR), em kg de matéria seca, das espécies *Quercus pyrenaica* (QP), *Pseudotsuga menziesii* (PM) e *Pinus nigra* (PN).

Espécie	Componente	Parâmetros		SEE	Equação 1	Equação 2
		a	b			
QP	BA	-2,59695	2,53453	0,247318	$CF = e^{\frac{SEE^2}{2}}$	$B = CF \cdot A \cdot d^b$
	BR	-2,4543	2,13346	0,242145		
PM	BA	-2,21637	2,35162	0,073801		
	BR	-2,46359	2,13727	0,229940		
PN	BA	-2,7773	2,51564	0,134416		
	BR	-3,76193	2,38784	0,179241		

CF – fator de correção | SEE – erro padrão da estimativa | B – biomassa | A =  $e^a$  | d – diâmetro médio quadrático

#### 4.3.3.2. Carbono na Vegetação Herbácea e nos Horizontes Orgânicos

As amostras da vegetação herbácea e dos horizontes orgânicos foram colocadas em tabuleiros e levadas à estufa a 65°C, onde permaneceram até atingirem peso constante, com vista à determinação da quantidade de matéria seca dos horizontes orgânicos e da biomassa aérea da vegetação herbácea. Após a secagem, os fragmentos de rocha existentes entre os resíduos orgânicos foram retirados, e as amostras pesadas novamente. Seguiu-se a moagem e análise das amostras em laboratório.

A concentração de carbono nos horizontes orgânicos e na biomassa aérea da vegetação herbácea, foi obtida pelo método de combustão por via seca (ISO, 1995), que consistiu no processo de incineração de 1g de amostra, a 450°C, durante um período de 6 horas, com duas repetições.

Tal como nas espécies florestais, a vegetação herbácea, também foi dividida em biomassa aérea (BA) e biomassa das raízes (BR). A biomassa aérea foi determinada a partir das amostras

colhidas no campo e a concentração de carbono foi determinada em laboratório, como referido acima. A biomassa das raízes foi quantificada com base na relação BR / BA de 0,23 obtida por Gonçalves et al. (2013) num povoamento misto de *Pseudotsuga menziesii* e *Castanea sativa* localizado a aproximadamente 20 km do local onde ocorreu o atual estudo.

Os valores de biomassa aérea e das raízes da vegetação herbácea foram convertidos em carbono assumindo da mesma forma, que para as espécies florestais, que 50% da biomassa é carbono. A quantidade de carbono armazenado nos horizontes orgânicos foi determinada multiplicando os valores de matéria seca pela concentração de carbono na mesma.

#### **4.3.3.3. Carbono no solo**

As amostras de solo, devidamente identificadas, foram depositadas em tabuleiros e levadas à estufa a 45°C, por um período de 48 horas. Depois de secas, as amostras foram crivadas, com crivo de malha de 2 mm, permitindo obter a percentagem de elementos grosseiros (partículas com dimensões superiores a 2 mm) e analisadas em laboratório, pelo método de combustão por via seca (ISO, 1995), para a determinação da concentração de carbono. Procedeu-se à incineração de 2,5 g de cada amostra, a 450°C por um período de 6 horas, com duas repetições.

A densidade aparente do solo foi determinada em amostras não perturbadas colhidas em cilindros de 100 cm<sup>3</sup> de volume e secas em estufa a 105°C, até peso constante.

O carbono armazenado no solo (CS, kg m<sup>-2</sup>) foi calculado multiplicando a concentração de carbono (Cc, g kg<sup>-1</sup>) pela densidade aparente (DA, g cm<sup>-3</sup>) e espessura (z, cm) de cada camada de solo, com correcção para o teor de elementos grosseiros (EG, v v<sup>-1</sup>), utilizando a seguinte equação (Percival et al., 2000):

$$CS = z Cc (DA - 2,65 EG / 100)$$

#### **4.3.3.4. Total de Carbono no Sistema**

O total de carbono armazenado no sistema (TC) por unidade de área (Mg ha<sup>-1</sup>) foi obtido a partir da adição da quantidade média de carbono em cada um dos compartimentos considerados:

$$TC = C_{BA} + C_{BV} + C_{HO} + C_S$$

Onde  $C_{BA}$  é a quantidade de carbono na biomassa das árvores,  $C_{BV}$  é a quantidade de carbono na biomassa da vegetação herbácea,  $C_{HO}$  é a quantidade de carbono nos horizontes orgânicos e  $C_S$  é a quantidade de carbono no solo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Armazenamento de Carbono no Sistema

A avaliação do sequestro e armazenamento de carbono como serviços ecossistêmicos foi difundida a partir de relatórios do Millennium Ecosystem Assessment nos anos de 2003 e 2005 (Sil, 2014). A capacidade de um sistema florestal armazenar carbono está relacionada com a quantidade de carbono fixada na vegetação e nos horizontes do solo (orgânicos e minerais), sendo acumulado ao longo dos anos no ecossistema.

A partir da importância que a floresta e respetivas práticas de gestão representam atualmente, principalmente no contexto que engloba o aquecimento global, o efeito estufa, os GEEs e o sequestro de carbono, foi realizado um estudo sobre os efeitos da substituição de espécies florestais no armazenamento de carbono em áreas de montanha da região mediterrânea, NE Portugal.

A avaliação do carbono armazenado nos povoamentos florestais das espécies *Quercus pyrenaica*, *Pseudotsuga menziesii* e *Pinus nigra* foi realizada considerando os compartimentos: biomassa das espécies florestais, biomassa da vegetação herbácea, horizontes orgânicos e minerais do solo.

#### 5.1.1. Armazenamento de carbono nas espécies florestais

Frequentemente assume-se que 50% da biomassa das árvores é constituída por carbono (Laclau, 2003; Nunes e Lopes, 2009), pelo que o armazenamento de carbono é proporcional aos incrementos de biomassa. No Quadro 3 apresentam-se os valores estimados da biomassa aérea (BA), da biomassa das raízes (BR) e da biomassa total (BT) para as três espécies florestais em estudo (PM, PN e QP). Verifica-se que a quantidade de biomassa da parte aérea (BA) e das raízes (BR) obtida para a espécie PM é significativamente superior à quantidade encontrada para as outras duas espécies (PN e QP). As espécies de crescimento rápido, como é o caso da espécie PM, são mais eficientes na acumulação de carbono na biomassa (Vallet et al., 2009; Gonçalves, 2012). É válido ressaltar que a espécie PN também possui características de crescimento rápido, contudo, as características deste povoamento diferem em relação às do povoamento da espécie PM, apresentando este último maior número de árvores por hectare (rever Quadro 1), interferindo assim com a quantidade de biomassa disponível e

consequentemente com a quantidade de carbono armazenada (Figura 8). Deste modo, a selecção das espécies florestais a instalar assume importância relevante nas estratégias do armazenamento de carbono (Silver et al., 2000).

Quadro 3 – Biomassa da parte aérea (BA), das raízes (BR) e total (BT), em Mg ha<sup>-1</sup>, para as espécies *Quercus pyrenaica* (QP), *Pseudotsuga menziesii* (PM) e *Pinus nigra* (PN). Na mesma coluna, valores seguidos de letras diferentes diferem significativamente.

Espécie	Compartmento		
	BA	BR	BT
PM	281,4 <sup>b</sup>	109,5 <sup>b</sup>	390,9 <sup>b</sup>
PN	182,9 <sup>a</sup>	45,5 <sup>a</sup>	228,4 <sup>a</sup>
QP	113,1 <sup>a</sup>	45,7 <sup>a</sup>	158,8 <sup>a</sup>

O estudo e conhecimento do comportamento das espécies florestais é muito importante, principalmente quando as mesmas são introduzidas em ambientes diferentes dos da sua origem. Por comparação com a situação de referência, povoamento de QP, os resultados de carbono armazenado na espécie PN, são considerados estatisticamente idênticos. Já para a espécie PM, observa-se um grande incremento de carbono, sendo significativamente superior às espécies PN e QP (Figura 8). Mais de 70% do carbono encontra-se armazenado na biomassa da parte aérea, 71, 72 e 80% para as espécies QP, PM e PN, respetivamente. Valores similares foram obtidos por Gonçalves et al. (2013) num povoamento misto de *Pseudotsuga menziesii* e *Castanea sativa* localizado no Norte de Portugal.

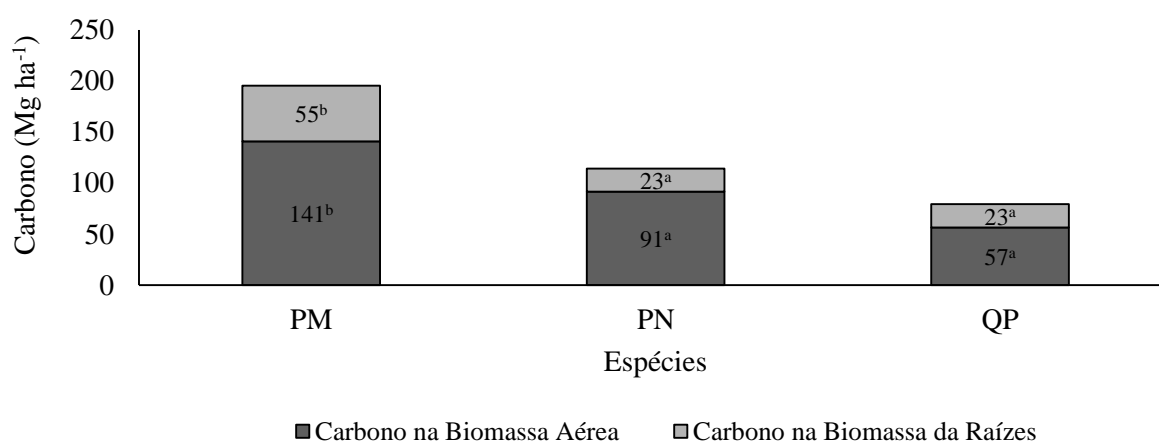


Figura 8 – Carbono armazenado na biomassa da parte aérea e na biomassa das raízes para as espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM), *Pinus nigra* (PN) e *Quercus pyrenaica* (QP). Valores seguidos de letras diferentes diferem significativamente as espécies.

A Figura 9 traduz a variação do carbono armazenado na biomassa das espécies PM e PN comparativamente à espécie QP (situação original). Consta-se que o carbono armazenado na biomassa aérea aumentou para ambas as espécies introduzidas (PM e PN), atingindo valores de carbono que superam os registados para QP em 35 Mg ha<sup>-1</sup> na espécie PN e 84 Mg ha<sup>-1</sup> na espécie PM. No que respeita ao carbono armazenado na biomassa das raízes, o comportamento é diferente, a espécie PN apresenta valores similares e a espécie PM excede em 32 Mg ha<sup>-1</sup>, quando comparadas com a espécie QP.

Garcia et al. (2010) quantificou a biomassa total e o armazenamento de carbono em espécies florestais mediterrânicas presentes no Parque Natural do Alto Tajo, Espanha, e verificaram que a quantidade de carbono presente na biomassa teve uma variação de 7,7 a 97,8 Mg ha<sup>-1</sup>.

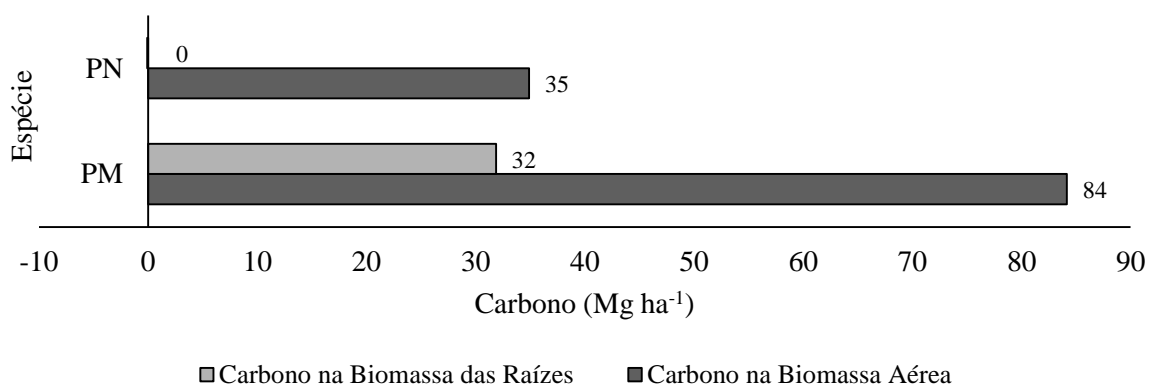


Figura 9 – Variação da quantidade de carbono armazenada (Mg ha<sup>-1</sup>) na biomassa aérea e na biomassa das raízes das espécies *Pinus nigra* (PN) e *Pseudotsuga menziesii* (PM) em relação ao solo original (*Quercus pyrenaica*, QP).

Em estudo realizado na Serra da Nogueira por Fonseca et al. (2004), foram analisadas as espécies PM com diferentes idades, 40 e 15 anos e a espécie nativa QP e, a partir dos dados apresentados na caracterização do povoamento e aplicando a metodologia usada neste trabalho para a quantificação da biomassa e posterior conversão em carbono, observa-se que a espécie PM apresenta valores significativamente maiores que a espécie QP quanto ao total de carbono armazenado na biomassa.

### 5.1.2. Armazenamento de carbono na vegetação herbácea

O armazenamento de carbono na biomassa aérea e das raízes da vegetação herbácea é muito pouco expressivo (Figura 10). Nas espécies PN e QP a vegetação herbácea aparece no sub-

bosque de forma muito dispersa em consequência da presença da folhada dos horizontes orgânicos, que dificultou o crescimento da mesma. Observações idênticas são referidas por Gonçalves et al. (2013). Na espécie PM, não se observou a presença de vegetação herbácea, uma vez que esta espécie possui elevada densidade do copado, impedindo a entrada de luminosidade no seu interior.

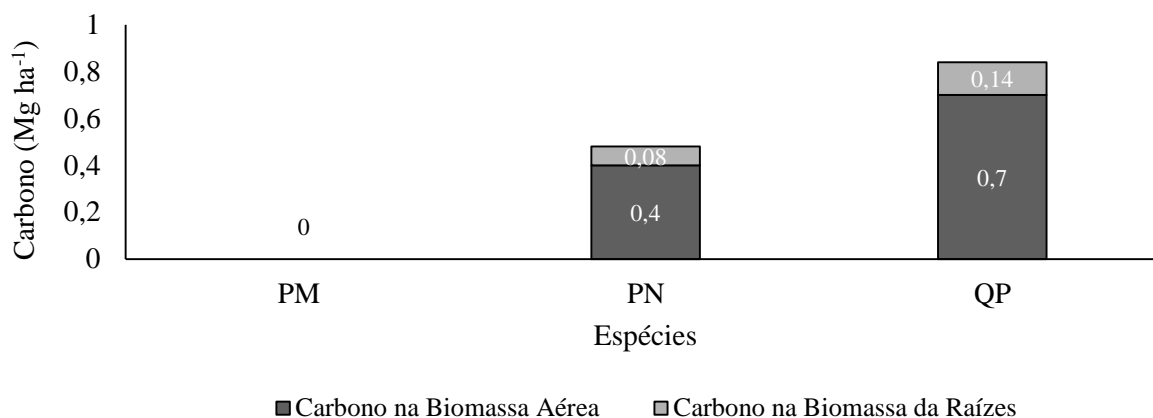


Figura 10 – Carbono armazenado na biomassa aérea e na biomassa das raízes da vegetação herbácea, no sub-bosque das espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM), *Pinus nigra* (PN) e *Quercus pyrenaica* (QP).

Como referido, o armazenamento de carbono na biomassa da vegetação herbácea contribui muito pouco para o total de carbono armazenado no sistema (0, 0,2 e 0,3% para as espécies PM, PN e QP, respetivamente), acrescentando 0,48 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono em PN e 0,84 Mg ha<sup>-1</sup> em QP. O crescimento da vegetação herbácea, de fato, pode ser condicionado pelas espécies arbóreas que, com o passar do tempo, dão origem a um horizonte orgânico formado por folhada e outras partes vegetais das árvores, dificultando o crescimento da vegetação em sub-bosque (Gonçalves, 2012).

Apesar do reduzido contributo da vegetação herbácea para o armazenamento global de carbono, o desenvolvimento de comunidades de plantas herbáceas anuais e perenes tem um papel importante na produtividade do sistema e, o seu rápido crescimento e morte providencia uma importante fonte de carbono orgânico e nutrientes no solo (Mun & Whitford, 1998; Nicolini & Topp, 2005).

### 5.1.3. Armazenamento de carbono nos horizontes orgânicos

Nos ecossistemas florestais, a presença de horizontes orgânicos tem grande importância na dinâmica do armazenamento de carbono, funcionando também como fonte de matéria orgânica e/ou como reservatório de nutrientes (Cruzado et al., 2007; Gonçalves, 2012). A quantidade e qualidade da folhada produzida, pelas diversas espécies florestais, influencia a taxa de decomposição e a libertação de nutrientes e carbono para o solo (Martins et al., 2009; Blum, 2014; Vilela, 2017), sendo que a temperatura média anual e o défice de água limitam a quantidade de resíduos orgânicos produzidos (Cruzado et al., 2007; Gonçalves, 2012).

Comparando a quantidade de resíduos orgânicos depositados na superfície do solo sob as espécies PM, PN e QP, observa-se uma acumulação significativamente superior para as espécies PM (31,8 Mg ha<sup>-1</sup>) e PN (27,1 Mg ha<sup>-1</sup>) comparativamente à espécie QP (18,0 Mg ha<sup>-1</sup>) (Figura 11). Tal facto pode estar relacionado com a taxa de decomposição, uma vez que é possível observar grandes quantidades de restos orgânicos ainda pouco decompostos sob as espécies PM e PN (espécies resinosas). Sob QP (espécie folhosa) os resíduos apresentam um estado de decomposição muito mais avançado. Resultados idênticos foram obtidos por Vilela (2017) e Fonseca & Figueiredo (2018).

É válido ressaltar que, apesar do povoamento da espécie PN apresentar menor número de árvores por hectare que o povoamento da espécie PM (rever Quadro 1), a elevada produção de pinhas, pela primeira espécie, pode explicar a inexistência de diferenças estatisticamente significativas, na produção de folhada, entre as duas espécies (Fonseca, 1997; Vilela, 2017).

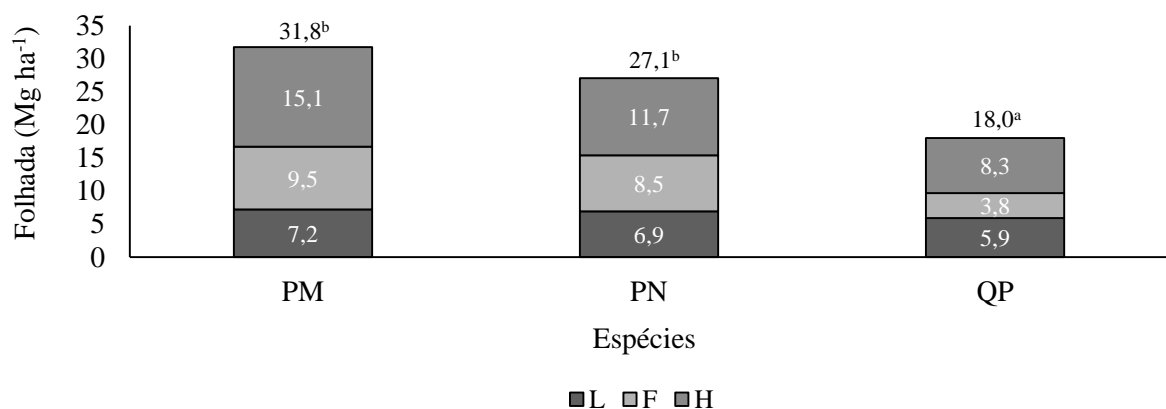


Figura 11 – Quantidade de folhada das camadas orgânicas L, F e H para as espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM), *Pinus nigra* (PN) e *Quercus pyrenaica* (QP). Valores seguidos de letras diferentes diferem significativamente as espécies.

Quadro 4 – Armazenamento de carbono ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) nas camadas orgânicas L, F e H, para as espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM), *Pinus nigra* (PN) e *Quercus pyrenaica* (QP). Média e desvio padrão. Na mesma linha, valores seguidos de letras diferentes diferem significativamente.

Camada	Espécies		
	PM	PN	QP
L	3,7 (1,5) <sup>a</sup>	3,8 (2,0) <sup>a</sup>	3,2 (0,6) <sup>a</sup>
F	4,0 (1,1) <sup>b</sup>	4,6 (3,4) <sup>b</sup>	1,9 (0,8) <sup>a</sup>
H	3,4 (1,0) <sup>a</sup>	4,7 (2,6) <sup>a</sup>	3,1 (1,3) <sup>a</sup>

O armazenamento de carbono nas camadas orgânicas L, F e H para as espécies PM e PN é maior em relação à espécie de referência QP (Quadro 4). Constata-se ainda que a espécie PM apresenta menor valor em relação à espécie PN em todas as camadas, pois a folhada daquela espécie é mais rica em cálcio e magnésio o que favorece a taxa de decomposição da folhada (Fonseca, 1997). Resultados idênticos foram observados por Martins et al. (2009) e Vilela (2017).

Comparando as camadas orgânicas das espécies PM e PN com as da espécie QP, observa-se que na camada L ocorre um ligeiro acréscimo estatisticamente não significativo no armazenamento de carbono, 3,7, 3,8 e 3,2  $\text{Mg ha}^{-1}$  para as espécies PM, PN e QP, respetivamente (Quadro 4). A camada F é a que apresenta maior quantidade de carbono armazenado, com valores idênticos entre as espécies PM (4,0  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) e PN (4,6  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) e, significativamente superiores aos encontrados para a espécie de referência (QP; 1,9  $\text{Mg ha}^{-1}$ ). Finalmente, a camada H apresenta algumas variações entre as três espécies mas sem diferenças significativas. A variação da quantidade de carbono entre camadas pode ser associada ao grau de humificação e ao teor de matéria mineral que se encontra misturado, com estas camadas, devido principalmente à atividade biológica do solo (Fonseca, 1997; Martins et al., 2009; Vilela, 2017; Fonseca & Figueiredo, 2018).

A Figura 12 mostra o acréscimo de carbono armazenado nas camadas orgânicas (L, F e H), nas espécies PN e PM comparativamente à espécie QP (solo original). Este acréscimo, no conjunto das três camadas orgânicas, traduz-se em 2,9  $\text{Mg ha}^{-1}$  e 4,9  $\text{Mg ha}^{-1}$  para as espécies PM e PN, respetivamente. A camada F é a que apresenta maior variação em ambas as espécies. As variações nas camadas L e H são menos expressivas, principalmente na espécie PM. Observa-se ainda que a espécie PM mostra menor armazenamento quando comparada com a espécie PN, facto que pode ser justificado com base na composição química da folhada, que por sua vez

afeta a taxa de decomposição (Fonseca, 1997; Martins et al., 2009; Vilela, 2017; Fonseca & Figueiredo, 2018).

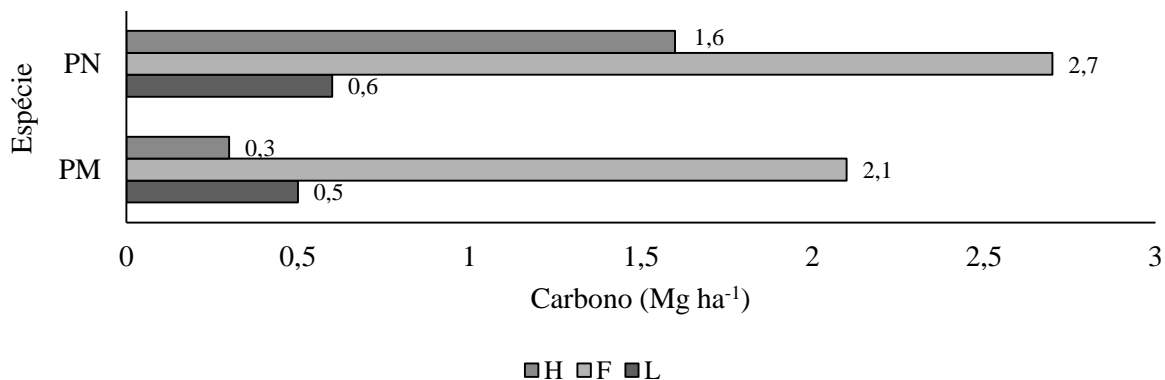


Figura 12 – Variação da quantidade de carbono armazenada (Mg ha<sup>-1</sup>) nos horizontes orgânicos (L, F e H) das espécies *Pinus nigra* (PN) e *Pseudotsuga menziesii* (PM) em relação ao solo original (*Quercus pyrenaica*, QP).

#### 5.1.4. Armazenamento de carbono no solo

A introdução das espécies PM e PN em substituição da espécie QP (vegetação climácica) reduziu significativamente a concentração de carbono em todas as camadas do solo (Figura 13), facto que também contribuiu para a redução do armazenamento de carbono no mesmo. Em estudo semelhante realizado por Fonseca et al. (2004) na Serra da Nogueira, onde é apresentado a concentração de carbono em profundidades do solo idênticas às do presente estudo, para a espécie PM com idades de 15 e 40 anos e para a espécie climácica QP, observa-se também uma redução na concentração de carbono. Pode-se ainda verificar, que ao longo do perfil do solo as concentrações de carbono são sempre significativamente superiores para a espécie QP, em todas as camadas.

Apesar da espécie PM apresentar maior concentração de carbono em comparação com a espécie PN, ambas não diferem significativamente e, as diferenças significativas em relação a QP, devem-se essencialmente às perturbações causadas pela preparação do terreno quando da instalação dos povoamentos de PM e PN, as quais favorecem a mineralização da matéria orgânica do solo (Schulp et al., 2008; Gonçalves et al., 2013).

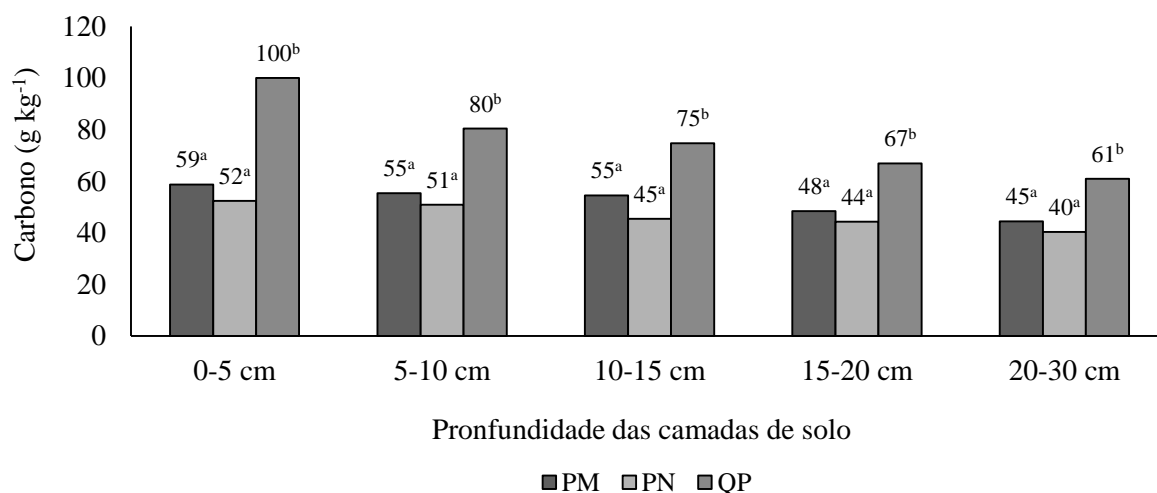


Figura 13 – Concentração de carbono no solo para as espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM), *Pinus nigra* (PN) e *Quercus pyrenaica* (QP). Para a mesma profundidade, valores seguidos de letras diferentes diferem significativamente.

No Quadro 5 apresentam-se os valores referentes à quantidade de carbono armazenada nas diferentes camadas de solo analisadas. Em todas as profundidades observa-se uma redução significativa da acumulação de carbono no solo sob as espécies PM e PN em relação à espécie QP, facto que pode ser justificado pela preparação do terreno para instalação das espécies PM e PN e pela natureza da folhada produzida por cada espécie (quantidade e qualidade), fatores que afetam a atividade biológica do solo e consequentemente a taxa de mineralização da folhada que constitui os horizontes orgânicos e da matéria orgânica do solo (Fonseca et al., 2004; Martins et al. 2009; Gonçalves et al. 2013; Fonseca & Figueiredo, 2018). De um modo geral, o armazenamento de carbono regista um gradiente vertical de variação, tendendo a diminuir com a profundidade, ressaltando-se que, na última camada (20-30 cm), o valor é aparentemente maior por se tratar de uma camada com o dobro da espessura das demais.

Quadro 5 – Armazenamento de carbono no solo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), para as espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM), *Pinus nigra* (PN) e *Quercus pyrenaica* (QP). Média e desvio padrão. Na mesma linha, valores seguidos de letras diferentes diferem significativamente.

Profundidade (cm)	Espécies		
	PM	PN	QP
0-5	23,1 (4,5) <sup>a</sup>	19,2 (3,8) <sup>a</sup>	34,5 (7,1) <sup>b</sup>
5-10	21,9 (3,1) <sup>a</sup>	21,9 (4,5) <sup>a</sup>	30,7 (3,6) <sup>b</sup>
10-15	20,8 (5,1) <sup>a</sup>	20,1 (2,9) <sup>a</sup>	31,2 (5,4) <sup>b</sup>
15-20	18,6 (4,2) <sup>a</sup>	20,0 (3,3) <sup>a</sup>	29,7 (5,4) <sup>b</sup>
20-30	36,2 (11,9) <sup>a</sup>	35,3 (8,2) <sup>a</sup>	57,2 (7,3) <sup>b</sup>

O armazenamento de carbono no solo é influenciado por diversos fatores, o clima do local, e práticas de gestão e tipo de solo, são alguns exemplos que alteram essa capacidade (Gonçalves, 2012).

O total de carbono armazenado no compartimento solo (conjunto das camadas de 0-30cm) é significativamente superior para a espécie QP (183,3 Mg ha<sup>-1</sup>) em relação às espécies PM (120,6 Mg ha<sup>-1</sup>) e PN (116,5 Mg ha<sup>-1</sup>) (Figura 14). A perda de carbono neste compartimento corresponde a 34% em PM e 36% em PN, comparativamente à situação de referência (QP). Resultados semelhantes são apresentados por Gonçalves et al. (2013) e Vilela (2017). As perturbações que podem ocorrer no solo como a alteração do coberto vegetal, queimadas e práticas de gestão, influenciam, a longo prazo, a sustentabilidade dos ecossistemas e a sua capacidade de fornecer serviços do ecossistema, como é por exemplo, o armazenamento de carbono (Sil et al., 2016; Vilela, 2017; Fonseca et al., 2017). Tais perturbações que influenciam o teor de carbono no solo são também verificadas por outros autores, quando comparam os efeitos da intensidade de mobilização do solo no armazenamento daquele elemento (Fonseca, 2005; Gonçalves, 2012; Gonçalves et al., 2013).

Em um estudo realizado por Fonseca et al. (2008), onde foi analisado o impacto da mobilização do solo para instalação de espécies florestais, verificou-se que ocorreu variação na massa de carbono em consequência de tal mobilização. De acordo com estes mesmos autores, a mobilização do solo pode aumentar a erodibilidade do solo e a taxa de decomposição da matéria orgânica, prejudicando a recuperação do solo e do carbono no solo após a mobilização.

Em um outro estudo realizado por Vagen & Winowiecki (2013), onde foi estimado o stock de carbono do solo na profundidade 0-30 cm em quatro ecossistemas da África Oriental, registaram-se variações de 20 a 80 Mg ha<sup>-1</sup>, entre os ecossistemas. Os autores relacionaram essas variações com a erodibilidade do solo, fator que influencia a disponibilidade de carbono neste compartimento e, concluíram que as práticas que contribuem para o aumento da erodibilidade do solo devem ser evitadas, uma vez que o carbono armazenado no mesmo tem grande contribuição nos processos de mitigação das alterações climáticas.

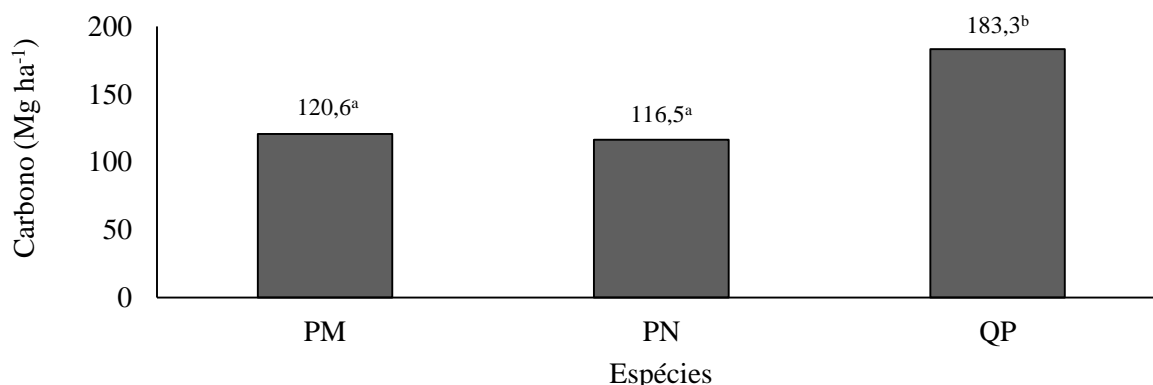


Figura 14 – Total de carbono armazenado no solo para as espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM), *Pinus nigra* (PN) e *Quercus pyrenaica* (QP). Valores seguidos de letras diferentes diferem significativamente as espécies.

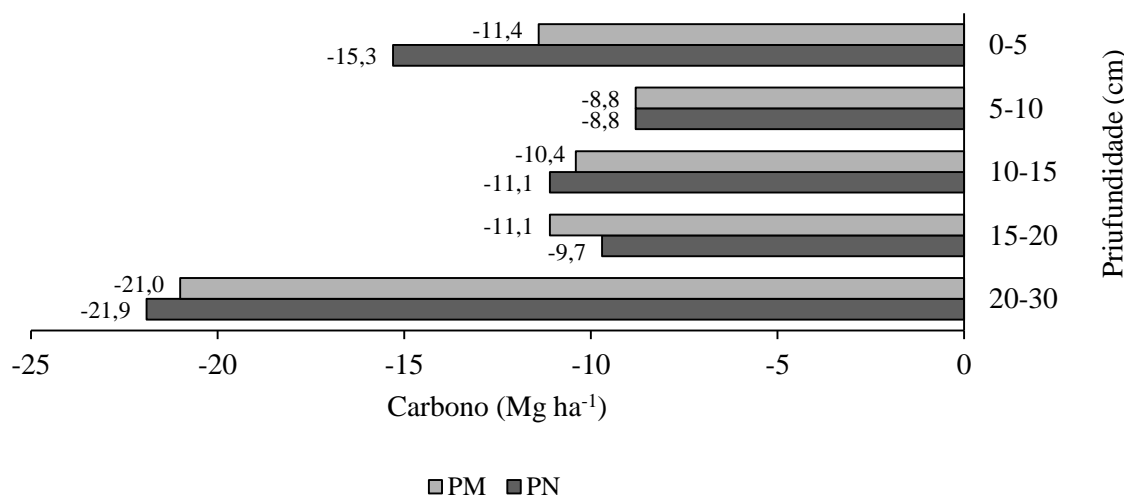


Figura 15 – Variação do teor de carbono armazenado nos solos das espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM) e *Pinus nigra* (PN) em relação à espécie *Quercus pyrenaica* (QP).

A Figura 15 mostra a perda de carbono que ocorreu nas camadas do solo nas espécies PN e PM comparativamente à espécie QP (solo original). Nota-se que a maior perda foi registada na camada superficial (0-5 cm), facto que pode ser justificado pelo rápido processo de mineralização da matéria orgânica e pelas trocas gasosas com a atmosfera a partir desta camada (Fonseca, 2005; Gonçalves et al., 2013). Ressalta-se que, para a camada mais profunda (20-30 cm), tem-se aparentemente um maior valor de perda, mas isso deve-se à maior espessura da camada. As perdas observadas em cada camada nas espécies PM e PN são idênticas, apresentando diferenças que variam de 0 Mg ha<sup>-1</sup> (5-10 cm) a 3,9 Mg ha<sup>-1</sup> (0-5 cm).

Comparando os resultados totais obtidos, observa-se uma perda de carbono igual a 62,7 Mg ha<sup>-1</sup> para PM e 66,8 Mg ha<sup>-1</sup> para PN em relação ao solo original (QP), sendo apenas 6% a diferença entre ambos resultados comparados entre si. Resultados semelhantes são apresentados por Fonseca et al. (2014).

#### 5.1.5. Armazenamento de carbono total no sistema

O total de carbono armazenado no sistema por unidade de área (Mg ha<sup>-1</sup>) foi obtido a partir da soma das quantidades médias de carbono armazenado em cada um dos compartimentos estudados: vegetação herbácea (VH), horizontes orgânicos (HO), solo e espécies florestais (EF). A Figura 16 mostra o total de carbono armazenado nas espécies PM, PN e QP, assim como a percentagem dos principais compartimentos em relação a esse total.

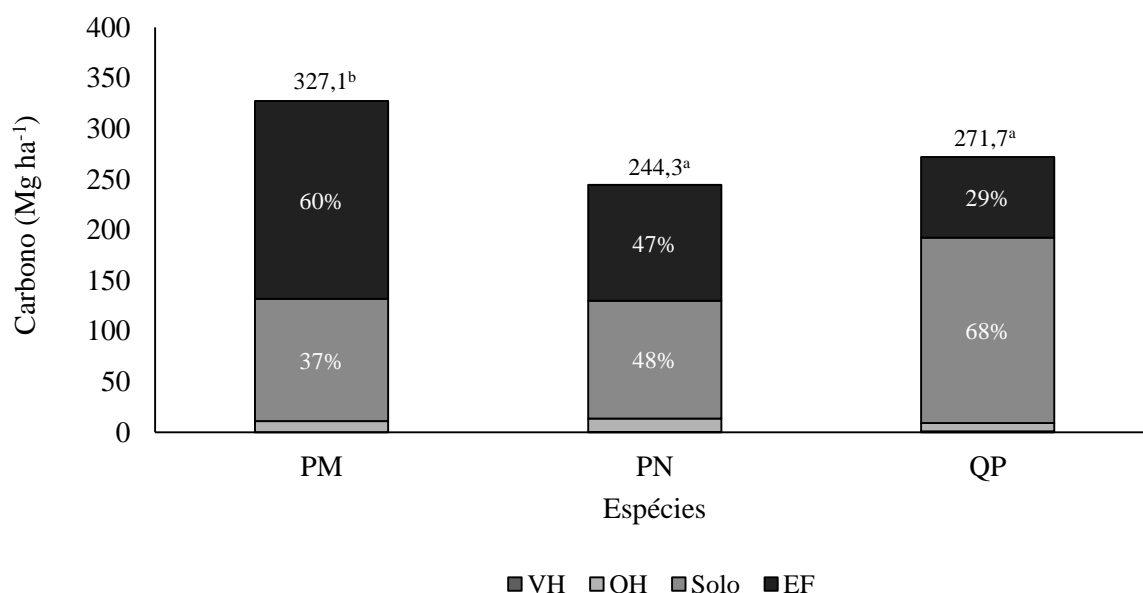


Figura 16 – Carbono total armazenado no sistema. Valores seguidos de letras diferentes diferem significativamente as espécies.

O contributo do carbono armazenado na vegetação herbácea (VH) é muito baixo, inferior a 1 Mg ha<sup>-1</sup>, não sendo visível no gráfico (devido à escala utilizada), mas representa 0, 0,18 e 0,28% do total de carbono armazenado para as espécies PM, PN e QP, respetivamente. Nota-se que, mesmo sendo pouco expressivo, houve perdas na contribuição da vegetação herbácea no armazenamento total de carbono quando a espécie QP foi substituída pelas espécies PM e PN.

Para os horizontes orgânicos (HO), apesar de ser difícil a leitura gráfica, houve um aumento de carbono armazenado neste compartimento para as espécies PM (2,9 Mg ha<sup>-1</sup>) e PN (4,9 Mg ha<sup>-1</sup>) em relação à espécie QP. A contribuição dos mesmos para o total de carbono armazenado no sistema correspondeu a 3, 4,8 e 2,7% para as espécies PM, PN e QP, respetivamente.

O solo constitui um dos principais compartimentos do armazenamento de carbono nos sistemas florestais. Comparando as percentagens obtidas neste compartimento em cada uma das espécies em relação ao total, observa-se consideráveis perdas, uma vez que as percentagens de contribuição caíram de 68% em QP, para 37% em PM e 48% em PN. As alterações de uso e ocupação do solo afetam diretamente a troca de gases entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera (Sil, 2014). Mudanças no uso do solo estão muitas vezes associadas a mudanças na sua ocupação e, conseqüentemente, a mudanças no armazenamento de carbono (Watson et al., 2000; Sil, 2014).

O armazenamento de carbono na biomassa das espécies florestais (EF) apresentou um grande aumento, pois em QP representa 29% do total, passando para valores de 60% em PM e 47% em PN. Num Inventário Ecológico e Florestal realizado em Espanha relata-se que, a quantidade de carbono presente na biomassa, é em média de 50,5 g de carbono por cada 100 g de madeira (massa seca) de coníferas e 47,9 g de carbono por cada 100 g de madeira (massa seca) de folhosas (Silveira et al., 2008; Sil, 2014). Assim como o solo, a biomassa das espécies florestais, constitui uma importante variável ambiental usada na medição direta do armazenamento ou liberação de carbono entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera (FAO, 2009). A redução na procura de lenha como combustível e melhores métodos de combate a incêndios, propiciam o incremento da biomassa florestal, potencializando a fixação de carbono (Sil, 2014).

A quantidade total de carbono acumulado no sistema varia de 327,1 Mg ha<sup>-1</sup> (PM) a 244,3 Mg ha<sup>-1</sup> (PN) (Figura 16). É na biomassa das espécies florestais e nos solos onde se acumula a maior quantidade de carbono no sistema, podendo estes compartimentos armazenar carbono a longo prazo (Sil, 2014). Nestas espécies e, principalmente em PM, os acréscimos de carbono proporcionados pela biomassa das espécies florestais e pelos horizontes orgânicos foram suficientes para compensar as reduções verificadas no solo até 30 cm de profundidade, atingindo valores semelhantes (PN) e significativamente superiores (PM) aos registados na situação original (QP).

O diferentes compartimentos que constituem um ecossistema terrestre podem se comportar como sumidouros ou fontes de carbono. Ações antrópicas podem afetar essa dinâmica fonte/sumidouro, aumentando a fixação de carbono através da plantação de árvores ou liberando carbono para a atmosfera através do desmatamento, por exemplo (Hassan et al., 2005; Sil, 2014).

## 6. CONCLUSÕES

Os estudos e análises realizados neste trabalho pretenderam avaliar os efeitos da mudança do coberto vegetal em áreas de montanha da região mediterrânea, NE Portugal, em relação ao armazenamento de carbono, onde a vegetação climácica, composta pela espécie *Quercus pyrenaica* (QP) foi substituída pelas espécies *Pseudotsuga menziesii* (PM) e *Pinus nigra* (PN).

Após 30 anos, os resultados mostram que os compartimentos solo e biomassa das espécies florestais são os grandes sumidouros de carbono e que os horizontes orgânicos e a vegetação herbácea são pouco expressivos no total de carbono armazenado, com valores inferiores a 5% e 1%, respetivamente.

Comparando as espécies PM e PN com a espécie QP (situação original), observa-se que os horizontes orgânicos (2,9 Mg ha<sup>-1</sup> para PM e 4,9 Mg ha<sup>-1</sup> para PN) e a biomassa das espécies florestais (116 Mg ha<sup>-1</sup> para PM e 35 Mg ha<sup>-1</sup> para PN) comportaram-se como um reservatório de carbono, enquanto os horizontes minerais do solo comportaram-se como uma fonte de carbono (62,7 Mg ha<sup>-1</sup> para PM e 66,7 Mg ha<sup>-1</sup> para PN).

Globalmente verificou-se um acréscimo na quantidade total de carbono armazenada em PM (acréscimo de 55,4 Mg ha<sup>-1</sup>) e uma perda em PN (perda de 27,4 Mg ha<sup>-1</sup>) relativamente à situação original (QP). A espécie PN, mesmo apresentando globalmente um total inferior à espécie QP, os valores não diferem significativamente.

As conclusões deste trabalho colocam em evidência que a modificação do coberto vegetal, em relação ao total de carbono armazenado no sistema, foi benéfico quanto à introdução da espécie PM, apresentando um ganho de 16,9% de carbono armazenado se comparado com a espécie nativa QP, enquanto a introdução da espécie PN apresentou uma perda de 10,1%, apesar de ambas (QP e PN) apresentarem resultados estatisticamente idênticos. A significativa perda de carbono armazenado no compartimento solo, foi reequilibrada através do ganho de carbono na biomassa das espécies florestais e nos horizontes orgânicos. Num cenário actual, onde a discussão acerca do efeito estufa, das alterações climáticas e do aquecimento global vem se destacando, a substituição da vegetação nativa ganha um papel relevante quanto à dinâmica do carbono na atmosfera e ao armazenamento nos ecossistemas terrestres.

Seria de todo o interesse prolongar este estudo no tempo, uma vez que as espécies PM e PN ainda estão em fase crescimento, com o objetivo de verificar a consistência dos valores obtidos e quantificar ao longo dos anos a evolução do sistema quanto ao total de carbono armazenado.

## BIBLIOGRAFIA

- Barbosa, R. N., Silva, A., Neves, M., Galvão, A. d., & Neto, C. (2013). **Produção e Sequestro de Carbono na Atmosfera**. *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico*, 9, 1783-1798.
- Barreto, L., Freitas, A. S., & Paiva, L. (2009). **Sequestro de Carbono**.
- Blum, H. (2014). **Caracterização bioquímica da serapilheira e de substâncias húmicas do solo sob plantios com espécies florestais nativas e exóticas no sul do Brasil**. Curitiba, Paraná, Brasil.
- Carvalho, J. P. (2000). **Crescimento, Produção e Ecologia de Povoamentos de Quercus pyrenaica Willd. Em Portugal Continental**. Vila Real, Portugal.
- Carvalho, J., Santos, J., & Reimão, D. (2005). **O Carvalho-Negral em Portugal e Transformação Tecnológica da Madeira**. *5º Congresso Florestal Nacional*.
- Costa, K. M. (2015). **O estoque de carbono na vegetação e no solo em fragmentos florestais de paisagens tropicais**. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Cruzado, C., Salineiro, P., & Soalleiro, R. (2007). **Captura de C em terrenos agrícolas reforestados con Pinus radiata en el norte de España**. *La captura de carbono en ecosistemas terrestres Iberoamericanos. RED POBAICA.*, pp. 195-212.
- Dieckow, J., Bayer, C., Martin-Neto, L., & Mielniczuk, J. (2004). **Sistemas conservacionistas de preparo do solo e implicações no ciclo do carbono**. *Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos, n.12*.
- Doubrawa, B. (2013). **Dinâmica da Cobertura Florestal e dos Estoques de Carbono na Bacia Hidrográfica do Rio: 2000 a 2010**. Curitiba, Paraná, Brasil.
- Earle, C. (2017). **Pinus nigra**. Fonte: Conifers.org: [http://www.conifers.org/pi/Pinus\\_nigra.php](http://www.conifers.org/pi/Pinus_nigra.php)
- Enescu, C., de Rigo, D., Caudullo, G., Mauri, A., & Houston Durrant, T. (2016). **Pinus nigra in Europe: distribution, habitat, usage and threats**. Em J. San-Miguel-Ayanz, D. de Rigo, G. Caudullo, T. Houston Durrant, & A. Mauri, *European Atlas of Forest Tree Species* (pp. 126-127). Luxembourg.
- FAO. (2009). **ECV 12 - Biomass: assessment report on available methodological standards and guides**. Rome: Global Terrestrial Observing System.
- Fearnside, P. (2001). **Efeitos de uso de terra e manejo florestal no ciclo de carbono na Amazônia brasileira**. V. Fleischesser (ed.) *Causas e Dinâmica do Desmatamento na Amazônia, Ministério do Meio Ambiente*, pp. 173-196.
- Fearnside, P. M. (2010). **Estoque e Estabilidade do Carbono nos Solos da Amazônia Brasileira**.
- Fonseca, F. (1997). **Implicações do tipo de coberto florestal nos horizontes orgânicos e minerais do solo. Apricação a quatro povoamentos na Serra da Padrela, N. de Portugal**. Vila Real.
- Fonseca, F. M. (2005). **Técnicas de Preparação do Terreno em Sistemas Florestais: Implicações no Solo e no Comportamento das Plantas**. Vila Real, Portugal.
- Fonseca, F., & Figueiredo, T. (2010). **Carbono nos solos do Parque Natural de Montesinho, NE Portugal: Armazenamento e estabilidade estimados com base cartográfica**. *IV Congresso Ibérico de la Ciencia del Suelo*, pp. 951-959.
- Fonseca, F., & Figueiredo, T. (2018). **Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under four forest species in the Mediterranean region**. *Spanish Journal of Soil Science* 8 (1), 42-56.

- Fonseca, F., de Figueiredo, T., & Vilela, A. (2014). **Impacto da substituição de espécies florestais no armazenamento de carbono nos horizontes orgânicos e minerais do solo.** *Retos Y Oportunidades en la Ciencia del Suelo*, 619-622.
- Fonseca, F., Figueiredo, T., & Martins, A. (2014). **Carbon storage as affected by different site preparation techniques two years after mixed forest stand installation.** *Forest Systems* 23 (1), 84-92.
- Fonseca, F., Figueiredo, T., Nogueira, C., & Queirós, A. (2017). **Effect of prescribed fire on soil properties and soil erosion in a Mediterranean mountain area.** *Geoderma*, 172-180.
- Fonseca, F., Guerra, A., & Nogueira, C. (2004). **Efeito da Substituição de Espécies Florestais nos Horizontes Orgânicos e Características Químicas do Solo.** *Silva Lusitana*, 183-190.
- Fonseca, F., Martins, A., Figueiredo, T., Nogueira, C., Guerra, A., & Gallardo, J. (2008). **Varição da massa de carbono nos solos florestais por efeito da preparação do terreno.** *V Congresso de Física y Química Ambiental. Mar de Plata.*
- Francisco, W. (2017). **Eco-92.** Fonte: Mundo Educação: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/eco92.htm>
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., & Danson, F. (2010). **Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data.** *Remote Sensing of Environment* 114 (4), 816-830.
- Gonçalves, I., Fonseca, F., & de Figueiredo, T. (2013). **Evolução Temporal do Carbono Armazenado em Povoamentos Florestais Jovens: Efeito da Intensidade de Preparação do Terreno.** *Silva Lusitana XXI (Nº Especial)*, 111-125.
- Gonçalves, M. I. (2012). **Avaliação do armazenamento de carbono em jovens povoamentos florestais: efeito da técnica de preparação do terreno.** Bragança, Portugal.
- Hassan, R., Scholes, R., & Ash, N. (2005). **Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends.** Washington, DC.
- ICNF. (2017). **Parque Natural de Montesinho.** Fonte: Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas: <http://www.icnf.pt/portal/ap/p-nat/pnm>
- INMG. (1991). **Normas Climatológicas da Região de "Trás-os-Montes e Alto Douro" e "Beira Interior" Correspondentes a 1951-1980.** Lisboa: Fascículo XLIX, Volume 3, 3ª Região.
- IPCC. (2001). **Synthesis report. Watson, R.T. and the core writing (Eds).** Geneva, Switzerland.
- ISO. (1995). **Soil quality - determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis).** Geneva (Switzerland): International Standard ISO 10694.
- JBUTAD. (2017a). **Quercus pyrenaica Willd.** Fonte: UTAD Jardim Botânico: [https://jb.utad.pt/especie/Quercus\\_pyrenaica](https://jb.utad.pt/especie/Quercus_pyrenaica)
- JBUTAD. (2017b). **Pseudotsuga menziesii.** Fonte: UTAD Jardim Botânico: [https://jb.utad.pt/especie/Pseudotsuga\\_menziesii\\_var\\_menziesii](https://jb.utad.pt/especie/Pseudotsuga_menziesii_var_menziesii)
- JBUTAD. (2017c). **Pinus nigra.** Fonte: UTAD Jardim Botânico: [https://jb.utad.pt/especie/Pinus\\_nigra](https://jb.utad.pt/especie/Pinus_nigra)
- João, M. d., & João, D. d. (2012). **Transportes e emissões de CO2: uma abordagem baseada na metodologia do IPCC.** *INGEPRO*, 109-118.

- Júnior, H. A. (2003). **O Sequestro de Carbono para o Combate ao Efeito Estufa**. Uberaba, Minas Gerais, Brasil.
- Laclau, P. (2003). **Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia**. *For Ecol Manage.* 180, 317-333.
- Lobato, A., Silva, C., Lago, R., Cardeal, Z., & Quadros, A. (2009). **Dirigindo o olhar para o efeito estufa nos livros didáticos de ensino médio: é simples entender esse fenômeno?** *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*.
- Magnoni, P. H. (2017). **Cartografia da paisagem natural do Parque Natural de Montesinho por Sensoriamento Remoto**. Bragança, Portugal.
- Martins, A., Azevedo, S., Raimundo, F., Carvalho, L., & Maderia, M. (2009). **Decomposição de folhada de quatro espécies florestais no Norte de Portugal: Taxa de decomposição e evolução da composição estrutural e do teor em nutrientes**. *Revista de Ciências Agrárias* 32 (1), 223-237.
- Martins, C. R., Pereira, P. d., Lopes, W. A., & Andrade, J. (2003). **Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a Importância na Química da Atmosfera**. *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*, 28-41.
- MMA. (2017). **Conferência das Partes**. Fonte: Ministério do Meio Ambiente: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/conferencia-das-partes>
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., & Muñoz, M. (2005). **Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles**. Madrid, España.
- Mun, H., & Whitford, W. (1998). **Changes in mass and chemistry of plant roots during long-term decomposition on a Chihuahuan Desert watershed**. *Biol Fertil Soils* 26, 16-22.
- Neto, C. C. (2002). **Modelo de Compensação de CO<sub>2</sub> para Empresas Poluidoras do Ar: Um Estudo de Caso no Vale do Itapocu, Região Norte de Santa Catarina**. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Nicolini, F., & Topp, W. (2005). **Soil properties in plantations of sessile oak (*Quercus petraea*) and red oak (*Quercus rubra*) in reclaimed lignite open-cast mines of the Rhineland**. *Geoderma* 129, 65-72.
- Nunes, L., & Lopes, D. (2009). **Quantificação do carbono fixado em povoamentos mistos no Norte de Portugal**. *Repositório Científico do Instituto Politécnico de Viseu. Revista Millenium Número 37*.
- Pacheco, M. P., & Helene, M. M. (1990). **Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO<sub>2</sub>**. *Estudos Avançados*, pp. 204-220.
- Paz, P. C. (2009). **Análise de Áreas Protegidas e o Mercado de Carbono**. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Pena, R. A. (2017). **Conferências sobre o meio ambiente**. Fonte: Mundo Educação: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/conferencias-sobre-meio-ambiente.htm>
- Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S., Joosten, H., Holmgren, P., . . . Wattenbach, M. (2012). **Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol**. *Environmental Evidence* 1 (6), 21.

- Planfor. (2017). **Abeto de Douglas / Pseudotsuga menziesii**. Fonte: Planfor: <https://www.planfor.pt/comprar,abeto-de-douglas,32,PO>
- Renner, R. M. (2004). **Sequestro de Carbono e a Viabilização de Novos Reflorestamentos no Brasil**. Curitiba, Paraná, Brasil.
- Resende, A., Santos, A., Godim, A., Xavier, R., Coelho, C., Oliveira, O., . . . Urquiaga, S. (2001). **Efeito Estufa e o Sequestro de Carbono em Sistemas de Cultivo com Espécies Florestais e na Cultura de Cana-de-Açúcar**. *Embrapa. Documentos*, n.133.
- Rocha, H., Freitas, H., Rosolem, R., Tannus, R., Negrón-Juárez, R., Ligo, M., . . . Bitencourt, M. (2005). **14. Ciclo do Carbono**. Em *As Relações Entre a Vegetação e o Meio Físico no Cerrado Pé-de-Gigante* (pp. 190-196).
- Rocha, M. T. (2003). **Aquecimento Global e o Mercado de Carbono: Uma Aplicação do Modelo CERT**. Piracicaba, São Paulo, Brasil.
- Schulp, C., Nabuurs, G., Verburg, P., & de Waal, R. (2008). **Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories**. *For Ecol Manage*. 256, 482-490.
- SERRALVES. (2017). **Pseudotsuga menziesii (Mlr.) Franco**. Fonte: SERRALVES: <http://serralves.ubiprism.pt/species/show/1295>
- Sil, Â. R. (2014). **Alterações da paisagem e serviços de ecossistema: Quantificação e valorização do sequestro de carbono na bacia superior do Rio Sabor**. Bragança.
- Sil, Â., Gonçalves, J., Honrado, J., Azevedo, J., Ramos, A., & Fonseca, F. (2016). **Mapeamento do carbono orgânico do solo numa bacia hidrográfica de montanha**. *Livro de Actas do VII Congresso Ibérico das Ciências do Solo (CICS 2016) / VI Congresso Nacional de Rega e Drenagem*, pp. 265-268.
- Silva, A. (2014). **Serra da Nogueira**. Fonte: Farol da Nossa Terra: <http://www.faroldanossaterra.net/2014/06/16/serra-da-nogueira/>
- Silveira, P., Koehler, H., Sanquetta, C., & Arce, J. (2008). **O estado da arte na estimativa da biomassa e carbono em formações florestais**. *Revista Floresta* 32 (1).
- Silver, W., Ostertag, R., & Lugo, A. (2000). **The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands**. *Restoration Ecology*, 8 (4), pp. 394-407.
- Szakács, G. J. (2003). **Sequestro de carbono nos solos - Avaliação das potencialidades dos solos arenosos sob pastagens, Anhembi - Piracicaba/SP**. Piracicaba, São Paulo, Brasil.
- Toniolo, J., & Carneiro, C. (2010). **Processos geológicos de fixação de carbono na Terra e aquecimento global**. *Terrae Didactica*, 31-56.
- Vagen, T., & Winowiecki, L. (2013). **Mapping of soil organic carbon stocks for spatially explicit assessments of climate change mitigation potencial**. *Environmental Research Letters* 8 (1), 1-9.
- Vale, M. (Outubro de 2008). **A Serra da Nogueira**. Fonte: Serra da Nogueira: <http://serradanogueira.blogspot.pt/2008/10/serra-da-nogueira.html>
- Vallet, P., Meredieu, C., Seynave, I., Bélouard, T., & Dhôte, J. (2009). **Species substitution for carbon storage: Sessile oak versus Corsican pine in France as a case study**. *For Ecol Manage*, pp. 1314-1323.

- van Delft, B., de Waal, R., Kemmers, R., Mekkink, P., & Sevink, J. (2006). **Field guide Humus Forms: Description and classification of humus forms for ecological applications.** Wageningen: Alterra.
- Vilela, Â. M. (2017). **Influência do tpo de coberto vegetal nas propriedades físicas e químicas dos horizontes orgânicos e minerais do solo.** Bragança, Portugal.
- Viola, E. (2002). **O Regime Internacional de Mudanças Climáticas e o Brasil.** *Revista Brasileira de Ciências Sociais*, 25-46.
- Wesemael, B. (1993). **Litter decomposition and nutrient distribution in humus profiles in some Mediterranean forests in southern Tuscany.** *For Ecol Manage.* 57, 99-114.