

Capítulo 5

Importância dos agroecossistemas no contexto das mudanças climáticas

*Carlos Alberto Martinez y Huaman*¹

*Matheus Enrique Bianconi*²

*Lucas M. Curtarelli*³

*Maria Teresa Oliverio Lemos*⁴

*Andressa Uehara Approbato*⁵

*Láís Batista Carmo Silva*⁶

5.1 Introdução

As mudanças climáticas globais e o aquecimento de nosso planeta são agora fatos indiscutíveis. As evidências científicas da ocorrência destes fenômenos e as próprias alterações climáticas e

¹Engenheiro-Agrônomo, Doutor, Professor do Departamento de Biologia, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo (USP), Av. Bandeirantes 3900, Ribeirão Preto, SP, CEP 14040-901, carlosamh@ffclrp.usp.br

²Biólogo, Mestre, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, USP.

³Biólogo, Mestrando, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, USP.

⁴Bióloga, Mestre, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, USP.

⁵Bióloga, Mestre, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, USP.,

⁶Bióloga, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, USP.

eventos extremos causados pelo incremento de gases de efeito estufa aparecem cada vez com mais frequência. O Quinto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), publicado em 2013 (CUBASCH et al., 2013), por exemplo, documenta aumentos da temperatura do ar e do oceano, derretimento generalizado da neve e do gelo e elevação do nível do mar, associado ao incremento de gases de efeito estufa como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), entre outros. Estas mudanças em larga escala têm enormes implicações para os ecossistemas agrícolas, florestais e de pastagens de nosso planeta, dado que, por seu papel na biosfera, estes agroecossistemas têm extrema relevância ambiental e socioeconômica no contexto das mudanças climáticas. As florestas, em especial as tropicais, armazenam aproximadamente 25% de todo o carbono do planeta e, por isso, poderiam acelerar as mudanças climáticas se esse carbono fosse perdido, ou poderiam contribuir para mitigar o problema se as florestas conseguissem sequestrar o carbono do CO₂ por meio da fotossíntese das plantas. Por outro lado, as pastagens, através de seu papel no ciclo do carbono, armazenam até 20% do carbono total do solo do planeta; no entanto, algumas plantas forrageiras poderiam constituir-se em invasoras, podendo representar séria ameaça à biodiversidade.

No Brasil, as pastagens ocupam aproximadamente 20% do território nacional e sustentam o maior rebanho de gado de corte do mundo, sendo que até 90% dos nutrientes requeridos pelos ruminantes são obtidos através do pastoreio. Deste modo, é evidente a necessidade de entender a dinâmica desses agroecossistemas no contexto das mudanças climáticas, tanto em relação aos impactos destas sobre o crescimento, produtividade e qualidade nutricional das plantas (**adaptação**), como ao potencial das florestas e pastagens para atuar como sumidouros de carbono (**mitigação**). Neste capítulo, serão discutidos em princípio, o significado e as evidências das mudanças climáticas; logo, será

mostrado como as plantas respondem às mudanças climáticas, em particular aos efeitos da elevada concentração de CO₂ e da elevada temperatura e, finalmente, serão analisados os efeitos das mudanças climáticas em florestas e pastagens.

5.2 As mudanças climáticas: evidências e importância na biosfera

O clima da Terra mudou com grande frequência ao longo de sua história. Só nos últimos 650.000 anos, houve sete ciclos de avanço e recuo glacial, com fim abrupto da última era do gelo há cerca de 7.000 anos, marcando o início da era climática moderna. Análises da composição atmosférica em épocas passadas indicam que a concentração atmosférica de CO₂ [CO₂] flutuou entre 190 e 300 μmol mol⁻¹ ao longo dos últimos 160 mil anos (Figura 1).

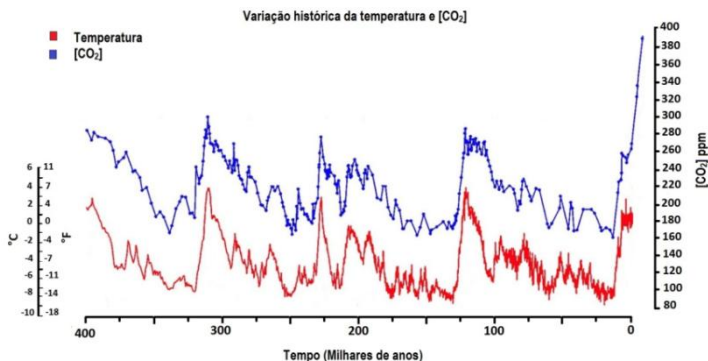


Figura 1. Variação da temperatura e concentração atmosférica do CO₂ ao longo dos últimos 400.000 anos, baseado nos registros “Vostok ice core”. Observa-se um aumento dramático da concentração atmosférica de CO₂ nos últimos 100 anos (Modificado de PETIT et al., 1999).

Após o último período glacial, ao final do Pleistoceno, a $[\text{CO}_2]$ estabilizou-se por volta de $280 \mu\text{mol mol}^{-1}$ até o século XIX, quando começou a aumentar de maneira logarítmica em função do incremento no uso de combustíveis fósseis e mudança do uso da terra. Nos últimos 50 anos, a concentração de CO_2 passou de $320 \mu\text{mol mol}^{-1}$ para aproximadamente $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ atualmente baseado nos registros do Observatório localizado em Mauna Loa, Havaí, EUA, sob a responsabilidade da *National Oceanic-Atmospheric Administration, NOAA, Earth System Research Laboratory* (Figura 2). As projeções futuras indicam que a $[\text{CO}_2]$ será aumentada em 50% até 2050, podendo atingir valores entre 800 e $1.000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ao final deste século (Figura 3). Como consequência do aumento da $[\text{CO}_2]$ e de outros gases estufa, é esperado até 2100, no cenário mais otimista do IPCC (cenário B1), um aumento na temperatura média do planeta acima de 2°C . No entanto, no cenário mais pessimista (cenário A2), é esperado um aumento da temperatura acima de 4°C (Figura 4). Também são esperadas mudanças nos padrões de precipitação em várias regiões do mundo e aumento da frequência de episódios extremos, tais como secas prolongadas e ondas de calor. Pela segunda metade do século XXI, assistiremos ao aumento das precipitações em altas e médias latitudes, enquanto Austrália, América Central, América do Sul e África Austral sofrerão reduções em seus índices pluviométricos. Tais mudanças gerariam impactos diretos sobre a distribuição geográfica das espécies vegetais, tipos de vegetação e padrões de cultivo agrícolas (YADAV et al., 2011), demonstrando o forte controle que o clima exerce sobre o crescimento das plantas e, conseqüentemente, sobre toda a biosfera.

As variações nos padrões climáticos ao redor do mundo ganham notável relevância quando consideramos o curto período de tempo em que se dão. De fato, quando discutimos a problemática ambiental no contexto das mudanças climáticas, é

comum adotarmos o discurso de que tais mudanças estão reservadas somente ao futuro, seja ele próximo ou distante.

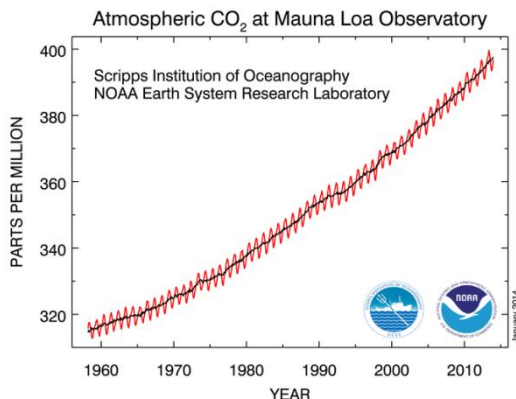


Figura 2. Variação da concentração atmosférica do CO₂ ao longo dos últimos 50 anos em Mauna Loa, Havaí, EUA. Fonte: NOAA: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

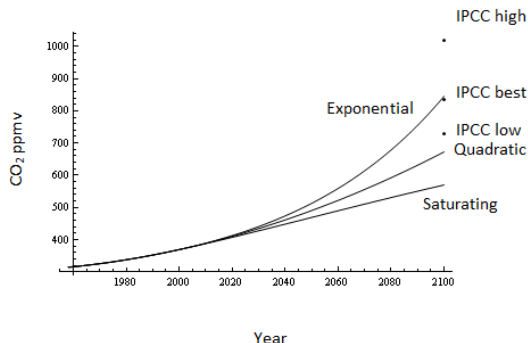


Figura 3. Ajuste de curvas das projeções futuras da concentração de CO₂ nos diversos cenários proposto pela IPCC (2007) para os próximos 100 anos. O melhor ajuste (*IPCC, best*) projeta concentração de CO₂ > de 800 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ para o final do século XXI.

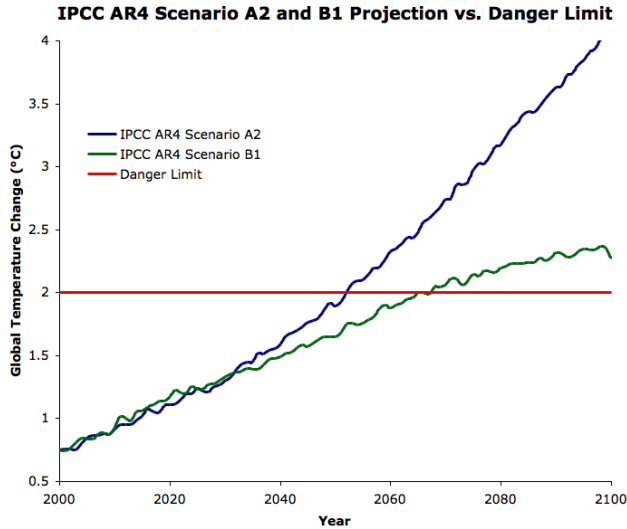


Figura 4. Projeções do incremento médio da temperatura global do planeta nos cenários A2 (mais pessimista) e B1 (mais otimista) do IPCC (2007). O incremento acima de 2°C é considerado o limite de perigo, acima do qual os danos ocasionados pelo incremento da temperatura superarão os benefícios.

No entanto, é crescente a frequência de relatos sobre processos de alteração climática e ecológica já em andamento, principalmente em regiões de clima extremo. No Ártico, já pode ser observada considerável alteração na distribuição de espécies vegetais, com constante expansão de populações de espécies arbustivas em regiões historicamente ocupadas por vegetação de tundra (Figura 5).

Ainda em altas latitudes, como no Canadá, por exemplo, há evidências claras do efeito das mudanças climáticas recentes no crescimento das plantas e no potencial de desempenho de cultivos. Ao longo do século passado, a região com potencial para o cultivo

de milho, claramente associada aos limites de temperatura, sofreu expansão de aproximadamente 300 km em direção ao norte.

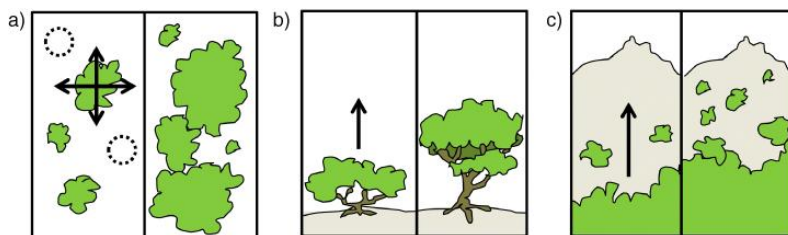


Figura 5. Invasão de arbustos no Ártico. Em apenas 20 anos, as populações de arbustos se expandiram notavelmente, preenchendo espaços (a), incrementando seu tamanho (b) ou colonizando novas áreas de temperaturas mais amenas (c) (Adaptado de MYERS-SMITH et al., 2011).

Ao mesmo tempo, populações adaptadas ao frio extremo perdem terreno na medida em que aumenta a competição com plantas adaptadas a climas mais amenos. Em algumas zonas áridas de baixa latitude, já foram registrados aumentos dos períodos de chuvas, conduzindo a aumentos significativos na densidade da cobertura vegetal, com subsequente alteração em suas dinâmicas ecológicas (BROWN et al., 1997).

Por outro lado, existem dados recentes (MATTHEWS et al., 2014) que mostram que os principais responsáveis para o incremento médio da superfície do planeta são os gases de efeito estufa. Observa-se que o dióxido de carbono, produto da queima de resíduos fósseis e da mudança de uso da terra, contribuiu com 75% no incremento da temperatura verificado nos últimos 200 anos (Tabela 1). Também se observa que o metano contribuiu com 25%, enquanto o óxido nitroso foi responsável por 9% do aquecimento. Dado seu efeito de resfriamento, os aerossóis contribuíram para atenuar o problema com 4%, valor pouco significativo quando

comparado com o efeito global de todos os gases de efeito estufa (MATTHEWS et al., 2014).

Tabela 1. Contribuição de cada tipo de emissão de gases de efeito estufa para o incremento da temperatura média global, no período de 1800 a 2005 (Adaptado de MATTHEWS et al., 2014).

Categoria de emissão	Contribuição proporcional ao Aquecimento
CO ₂ de combustível fóssil	0,50
CO ₂ de mudança de uso da terra	0,25
Metano	0,25
Óxido nitroso	0,09
Aerossóis	-0,4
Aquecimento Total	0,7 (°C)

5.3 Respostas das plantas às mudanças climáticas, com ênfase nas respostas ao elevado CO₂ e elevada temperatura

Em vista do panorama climático apresentado para as próximas décadas, o qual parece ser inevitável, mesmo se as emissões antrópicas de CO₂ estabilizarem-se nos níveis atuais (SOLOMON et al., 2009), surgem preocupações em diversos setores da sociedade sobre o que pode ser feito para amenizar essas mudanças e para a adaptação à essa nova condição ambiental. Nesse contexto, os organismos fotossintéticos têm relevância especial, uma vez que atuam como grandes sumidouros do carbono presente na atmosfera. Através disso, fornecem a energia necessária - na forma de carboidratos - para suportar quase todas as formas de vida do planeta, ao mesmo tempo em que aliviam (mitigam), de certa forma, o efeito estufa ocasionado pelo CO₂.

Ao dimensionar a importância das plantas no contexto das mudanças climáticas, é trazido à tona o papel estratégico da

pesquisa sobre o desempenho desses organismos quando submetidos às condições ambientais previstas para as próximas décadas. Isto porque, além de permitir a elaboração de modelos mais precisos a respeito da produtividade primária de ecossistemas, fenologia e migração de espécies e outros aspectos ecológicos, torna-se possível criar estratégias para garantir a segurança alimentar humana no futuro (adaptação) e a conservação de áreas que atuam como sumidouros de CO₂ ou prestam serviços ambientais relevantes nesse novo contexto (mitigação).

5.3.1 O CO₂ e o funcionamento das plantas

A concentração atmosférica de CO₂ tem influência direta sobre a dinâmica dos ecossistemas terrestres, principalmente através de seu efeito sobre a fisiologia das plantas. Além de ser o substrato primário para a fotossíntese, portanto, fator limitante para a produção de açúcares pela planta e, conseqüentemente, biomassa, o CO₂ tem relação com o nível de abertura dos estômatos. Concentrações atmosféricas progressivamente maiores promovem redução da abertura estomática e, conseqüentemente, redução da taxa transpiratória, que influencia o balanço hídrico dos ecossistemas. Em virtude da relevância ecológica e econômica destes processos, as respostas vegetais aos níveis elevados de CO₂ atmosférico previstos para as próximas décadas têm sido amplamente estudadas nos últimos 25 anos.

O estímulo da fotossíntese é uma das respostas ao elevado CO₂ mais bem estabelecidas e tem sido amplamente reportado (AINSWORTH; LONG, 2005; LONG et al., 2004; DRAKE et al., 1997). Este estímulo, em curto prazo, não necessita de quantidade adicional de luz, água ou nutrientes, dado que a fotossíntese, em plantas com metabolismo fotossintético C₃, é limitada pela [CO₂] atual (aproximadamente 400 μmol mol⁻¹). Por outro lado, plantas com metabolismo fotossintético C₄, como milho, cana-de-açúcar e

sorgo, possuem duas enzimas carboxilativas: a Fosfoenol Piruvato Carboxilase e a Rubisco, que atuam nas células mesofílicas e nas células da bainha do feixe vascular, respectivamente. Nessas plantas considera-se, a princípio, que a $[CO_2]$ atual não limita a fotossíntese, uma vez que possuem um mecanismo fisiológico que enriquece de CO_2 o sítio onde ocorre a fixação do carbono via Rubisco. Tal mecanismo antecipa, de alguma maneira, os efeitos esperados em nível bioquímico de uma atmosfera mais rica em CO_2 sobre as plantas.

Para um entendimento mecanístico sobre o efeito de níveis elevados de CO_2 atmosférico sobre o crescimento e o desenvolvimento das plantas, é preciso antes uma breve explanação sobre o processo fotossintético. A fixação do CO_2 através do ciclo de redução fotossintética do carbono (ciclo de Calvin-Benson) é realizada pela enzima ribulose 1,5-bisfosfatocarboxilase/oxigenase (Rubisco). Esta enzima catalisa, por meio do mesmo sítio ativo - e aqui está uma característica fundamental neste contexto - a adição de CO_2 (carboxilação) ou O_2 (oxigenação) à molécula de ribulose 1,5-bisfosfato (RuBP), o que torna CO_2 e O_2 inibidores competitivos desta reação. Quando o CO_2 é fixado, dando início ao ciclo de Calvin-Benson, produzem-se duas trioses (3-fosfoglicerato) que são progressivamente reduzidas com o uso da energia proveniente da luz solar - estocada na forma química de ATP e NADPH -, permitindo a produção líquida de precursores da sacarose e do amido, bem como a regeneração do aceptor de CO_2 (RuBP).

Por outro lado, ao fixar O_2 , a Rubisco produz um metabólito que alimenta uma via bioquímica alternativa à produção de açúcares, conhecida como fotorrespiração. Este processo resulta, em última instância, na liberação de uma molécula de CO_2 para permitir a regeneração da RuBP. Desta maneira, além de não fixar o CO_2 , a atividade oxigenativa da Rubisco implica perda líquida de carbono. No entanto, é importante ressaltar que embora seja

considerada como uma característica negativa para a planta, tem sido demonstrado que a atividade fotorrespiratória está acoplada ao metabolismo de N na planta, além de servir como um mecanismo natural que permite aliviar o estresse oxidativo em condições adversas, como o excesso de radiação ou falta de água (VOSS et al., 2013).

Embora a concentração atmosférica de O_2 seja 500 vezes superior à de CO_2 , a Rubisco apresenta uma afinidade muito maior pelo CO_2 em relação ao O_2 , de modo que a taxa de carboxilação da RuBP pode ser 90 vezes maior que a taxa de oxigenação (VON CAEMMERER, 2000). Todavia, em condições de campo, a atividade fotorrespiratória, decorrente da fixação do O_2 , pode resultar em perdas de até 25% do C assimilado pela fotossíntese, especialmente em condições estressantes (LAMBERS et al., 2008).

Constatado esse panorama, no qual o CO_2 é um recurso relativamente raro quando comparado ao O_2 , podemos concluir que qualquer incremento na concentração atmosférica de CO_2 pode implicar um aumento da atividade fotossintética. Isso ocorre, de fato, e através de duas maneiras, concomitantemente: aumentando-se a taxa de carboxilação, já que a Rubisco não é saturada pelo CO_2 nos níveis atmosféricos atuais (pelo menos nas plantas C_3), e reduzindo-se a atividade fotorrespiratória, dado que o CO_2 tem vantagem sobre o O_2 na competição pelo sítio ativo da Rubisco, conseqüentemente diminuindo a perda líquida de carbono.

Para o futuro, portanto, em que é projetado um aumento da $[CO_2]$ média do planeta dos atuais $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ até $1.000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ por volta do ano 2100 (IPCC, 2007), espera-se que haja um efeito fertilizante desse CO_2 adicional (Figura 6).

Os experimentos conduzidos em condições de campo, no entanto, advertem que a magnitude, duração e as implicações fisiológicas dessas respostas variam de acordo com o tipo de metabolismo fotossintético, grupo funcional e com os fatores

abióticos atuantes no crescimento da planta (KÖRNER, 2006; OLIVEIRA et al., 2012; SOUZA et al., 2008; WANG et al., 2012).

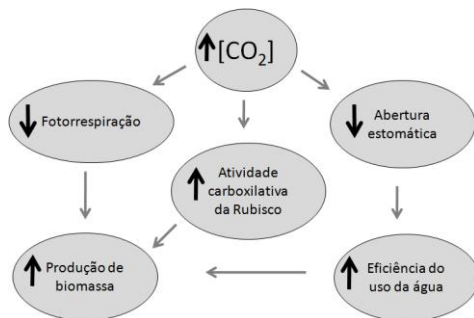


Figura 6. Esquema dos efeitos principais diretos do aumento da $[CO_2]$ atmosférica sobre os processos fisiológicos em nível foliar.

Em estudo de meta-análise, Ainsworth e Long (2004) mostraram que espécies arbóreas respondem mais intensamente ao aumento dos níveis atmosféricos de CO_2 em relação a legumes, gramíneas C_3 e plantas C_4 em geral. Da mesma maneira, demonstraram que, em experimentos de campo, onde foi usada a tecnologia FACE (*Free Air CO_2 Enrichment*), o efeito fertilizante do CO_2 elevado é muito menor do que aquele previsto pelos modelos mecânicos da fotossíntese ou observado nos primeiros experimentos conduzidos em câmaras de crescimento (LONG et al., 2006). Deste modo, fica claro também que avanços no entendimento deste tema dependem consideravelmente de avanços tecnológicos, uma vez que é um grande desafio simular fielmente condições climáticas futuras alterando minimamente as condições ambientais naturais.

O aumento do CO_2 tem efeito direto sobre a atividade fotossintética, suprimindo a oxigenação da RuBP e a consequente atividade fotorrespiratória, bem como aumentando a taxa de

carboxilação da Rubisco. Ao mesmo tempo, ele promove o fechamento estomático e a economia hídrica. Ambos os efeitos tendem a favorecer a produção de biomassa nas plantas, numa condição ideal. Modificado de Long et al. (2004).

Embora a fotossíntese ganhe destaque aqui, o que é natural, haja vista a relevância desse processo no contexto fisiológico geral da planta, é fundamental chamar a atenção para outros processos afetados direta ou indiretamente pelo aumento da concentração atmosférica de CO₂. A partir do momento em que se sabe que mais carbono entra na planta quando ela é exposta ao elevado CO₂, é importante salientar que a produção de biomassa que pode ser colhida é apenas um dos possíveis destinos desse carbono. Nesse sentido, o armazenamento, a utilização em processos metabólicos (pelas mitocôndrias, principalmente) e a exportação para o solo são vias igualmente importantes para o escoamento desse carbono excedente (KÖRNER, 2006).

A respiração mitocondrial, processo bioquímico diretamente relacionado ao crescimento e assimilação de nitrogênio pela planta, é um processo-chave no entendimento das respostas ao elevado CO₂. Alguns trabalhos indicam que a taxa respiratória seria diminuída sob elevado CO₂, uma vez que o CO₂ causa a inibição direta da atividade de enzimas respiratórias, tais como a Citocromo Oxidase e a Succinato De-hidrogenase (DRAKE et al., 1999). No entanto, González-Meler et al. (2004) sugerem que ainda não há evidências de significativa mudança na taxa respiratória global da planta e que os efeitos diretos do CO₂ nas enzimas respiratórias não influenciam nas taxas de respiração específica dos tecidos. Experimentos realizados com soja, por sua vez, indicam que a respiração é fortemente estimulada sob elevado CO₂ (LEAKEY et al., 2009).

A assimilação e a eficiência do uso de nutrientes também são modificadas em plantas cultivadas sob elevado CO₂. Estudos reportaram uma redução na concentração de nitrogênio nas folhas

(LEAKEY et al., 2009; LONG et al., 2004), têm como causa principal a diminuição dos níveis de Rubisco no tecido, dado que esta enzima pode corresponder a 50% do nitrogênio foliar total.

Como mencionado anteriormente, outro processo altamente responsivo à concentração atmosférica de CO₂ é a abertura estomática. Uma redução significativa da condutância estomática foi observada em grande parte dos estudos de exposição de plantas a elevadas concentrações de CO₂ (AINSWORTH; ROGERS, 2007). Tendo em vista que os estômatos controlam o fluxo de gases e vapor d'água nas folhas, espera-se que uma série de funções fisiológicas sejam afetadas por esta resposta, especialmente aquelas ligadas às relações hídricas da planta, dada a consequente redução da taxa transpiratória da folha.

Embora promova economia hídrica e possa aumentar o conteúdo de água do solo, a redução na taxa transpiratória também tem implicações térmicas, uma vez que pode elevar a temperatura foliar em níveis ainda maiores que aqueles promovidos pelo aquecimento decorrente do aumento na concentração de gases estufa. A reduzida perda de calor latente pelas plantas também poderá impactar num clima futuro, incrementando o aquecimento. No entanto, os feedbacks climáticos e fisiológicos como consequência dessas respostas ainda são desconhecidos.

5.3.2 O CO₂, a temperatura global e as plantas

O aumento na concentração atmosférica de CO₂, junto com outros gases de efeito estufa, tem sido colocado como o ponto de partida para as diversas mudanças globais previstas para as próximas décadas, tendo em vista seu potencial de modificar a temperatura global através de sua capacidade para absorver radiação calorífica (infravermelha). Como o sistema climático do planeta é bastante sensível a qualquer alteração em um dos seus componentes, são esperadas mudanças importantes na temperatura

média global do planeta, nos padrões de precipitação e na frequência de eventos extremos, como ondas de calor e secas prolongadas por causa do incremento de gases de efeito estufa. A partir desse panorama, torna-se uma tarefa ainda mais complexa a previsão das respostas primárias diretas das plantas ao elevado CO₂ numa situação climática futura.

A temperatura é um dos principais determinantes da distribuição geográfica das espécies no planeta e da produtividade primária líquida dos ecossistemas. É amplamente conhecida, por exemplo, a gradiente existente entre os ambientes de alta latitude (e altitude) e os de baixa latitude, no que diz respeito ao aumento da biomassa e biodiversidade animal, vegetal e microbiana, e da produtividade primária líquida, na medida em que se aproxima das regiões equatoriais.

Os cenários climáticos mais otimistas apresentados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) indicam aumentos de 1,1 a 2,9°C na temperatura média global até 2100, mas que podem chegar a até 5,8°C, dependendo do cenário de incremento na concentração atmosférica de CO₂. Dada a complexidade do sistema climático, o aquecimento promovido pelo efeito estufa pode ser expresso de diferentes maneiras, seja como um aumento na temperatura média ou episódios de onda de calor, além de poder ter diferentes magnitudes de acordo com a região.

A grande maioria dos estudos sobre os efeitos do aquecimento sobre o crescimento das plantas foi realizada utilizando câmaras de crescimento, com temperatura elevada constante durante determinado período de tempo. A questão da duração do experimento aqui merece atenção especial, uma vez que é conhecido que as plantas respondem ao aumento da temperatura diferentemente em exposições de curto, médio e longo prazos.

Os processos metabólicos de todos os seres vivos estão intrinsecamente ligados à temperatura, sendo bem conhecida a termo dependência das reações enzimáticas. Sabe-se, portanto, que as enzimas tendem a aumentar sua atividade catalítica em resposta ao aumento da temperatura, cada qual numa razão específica, até que se atinja a temperatura ótima para a reação, ponto a partir do qual começa a haver um declínio com o progressivo aumento da temperatura, até a completa inativação da enzima.

A exposição de médio e longo prazos (de um a vários dias até vários meses) a uma nova condição térmica leva a um ajuste do metabolismo, denominado aclimatação. Na respiração vegetal, por exemplo, tem sido sugerido que ocorre uma redução da sensibilidade à temperatura com a aclimatação ao novo ambiente térmico (ATKIN; TJOELKER, 2003). Isto reforça a ideia de que, para se compreender os efeitos do aquecimento sobre o crescimento das plantas, é preciso conduzir experimentos de longo prazo, pois as curvas de resposta momentânea à temperatura de processos como a fotossíntese e a respiração podem não ser uma boa fonte de dados para maiores extrapolações.

Körner (2006) salienta que a temperatura tem papel mais importante sobre os processos ligados diretamente ao crescimento, como a taxa de expansão e a divisão celular, em comparação com processos como a fotossíntese, de modo que efeitos do crescimento em uma nova temperatura só poderiam ser observados em experimentos de média ou longa duração, e que a taxa fotossintética não seria uma boa medida diagnóstica, por si só, para determinar o desempenho da planta neste novo ambiente.

Experimentos que avaliem o efeito interativo do elevado CO₂ com o aquecimento são ainda mais escassos, apesar do surgimento recente de tecnologias mais adequadas para o estudo em campo dos efeitos do aquecimento, como, por exemplo, os sistemas T-FACE (*Temperature-Free Air Enhancement*) (KIMBALL et al., 2008). Em estudo recente de meta-análise, foi

encontrado que a elevada concentração de CO₂ aumenta a fotossíntese de plantas C₃ em condições de temperatura ambiente e temperatura elevada, bem como sob estresse térmico. Em plantas C₄, porém, o elevado CO₂ aumenta a fotossíntese apenas em temperatura elevada, tendo efeito negativo sob estresse térmico (WANG et al., 2012). No entanto, o estudo conclui que os efeitos da interação entre CO₂ e aquecimento sobre o crescimento não foram, em geral, explicados pelos efeitos sobre a taxa fotossintética líquida, o que está em concordância com o que foi explicado anteriormente.

Em recente trabalho (MARTINEZ et al., 2014), utilizando um sistema de tratamento térmico T-FACE, a nossa equipe determinou que plantas de *Stylosanthes capitata*, uma leguminosa forrageira, respondem positivamente ao aquecimento em 2°C. Esse leve incremento da temperatura estimulou a fotoquímica da fotossíntese, provocou um aumento do índice de área foliar e estimulou a produção de biomassa das plantas. Em trabalho realizado com plantas de laranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) da variedade Valencia, foi determinado que o leve aquecimento estimulou a fotossíntese e o crescimento vegetativo das plantas (RIBEIRO et al., 2012). Em ambos os trabalhos citados acima, as plantas foram submetidas ao aquecimento em condições não estressantes, dado que o leve incremento da temperatura (em torno de 2°C acima do tratamento-controle) não provocou estresse térmico, sugerindo que as plantas desenvolveram uma termo tolerância adquirida. Por outro lado, incrementos de temperatura acima de 2°C podem provocar estresse térmico que pode resultar em efeitos deletérios nos processos fisiológicos, bioquímicos e de crescimento, afetando o rendimento das plantas (MITTLER et al., 2012).

5.4 Adaptação e mitigação das espécies florestais no contexto das mudanças climáticas

As florestas tropicais cobrem 7% da superfície terrestre, mas armazenam 25% do pool total do carbono global e contribuem com um terço da produtividade primária líquida do planeta. Dado que as florestas são ricas em carbono, a perda líquida ou a absorção do carbono pelas florestas tropicais tem grandes implicações nos níveis de gases de efeito estufa como o CO₂. Assim, as florestas tropicais podem aumentar a velocidade das mudanças climáticas pela emissão de CO₂, ou podem contribuir com sua diminuição por meio do sequestro do carbono do CO₂ atmosférico.

Os recentes estudos indicam que, nas últimas décadas, as florestas têm atuado como sumidouros de carbono. No entanto, não está claro se esse incremento de biomassa ocorreu paralelo às mudanças climáticas e ao incremento de CO₂ observado nas últimas décadas. Também não se sabe se as mudanças climáticas e o aumento de CO₂, bem como alteração da dinâmica das florestas, têm sido os fatores responsáveis para o aumento observado da biomassa.

Em paralelo ao incremento populacional, houve uma destruição de florestas naturais no planeta, em parte para incrementar a terra arável, ou para utilização dos recursos florestais, principalmente a madeira para fins de construção ou como fonte de energia de biomassa. A essa mudança de uso da terra, podem ser somados os desastres naturais, como os incêndios que contribuem para a mudança de área de florestas para outras finalidades (Figura 7). Uma das formas de recuperação dessas áreas degradadas é através do reflorestamento ou por meio da regeneração natural.



Figura 7. Dinâmica de mudanças em florestas.

A partir de dados da FAO (2006), estima-se que, nas duas últimas décadas, os estoques de carbono na África e na América do Sul sofreram reduções significativas em decorrência do desmatamento, enquanto na Europa ocorreu um leve aumento em função da aplicação de medidas ambientalistas para a proteção das florestas (Figura 8). No entanto, na América do Sul, ocorreu um maior aumento da área de florestas destinadas para proteção e conservação da biodiversidade, principalmente na última década (Figura 9). Por outro lado, na área de florestas plantadas, houve um aumento em todos os continentes, especialmente na Ásia e na América Central e América do Norte (Figura 10).

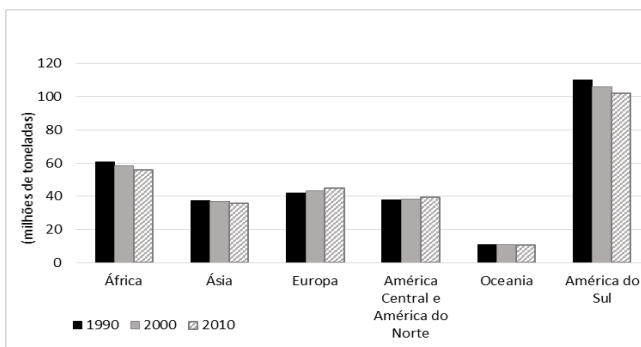


Figura 8. Estoques de carbono em biomassa florestal em 1990-2010. Fonte: *Global Forest Resources Assessment 2010* <http://www.fao.org/forestry/fra/62219/en/>

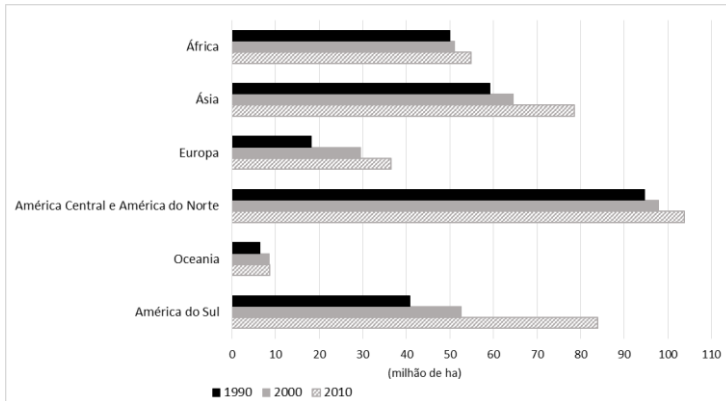


Figura 9. Área de florestas destinadas para conservação da biodiversidade em 1990-2010. Fonte: *Global Forest Resources Assessment 2010* <http://www.fao.org/forestry/fra/62219/en/>

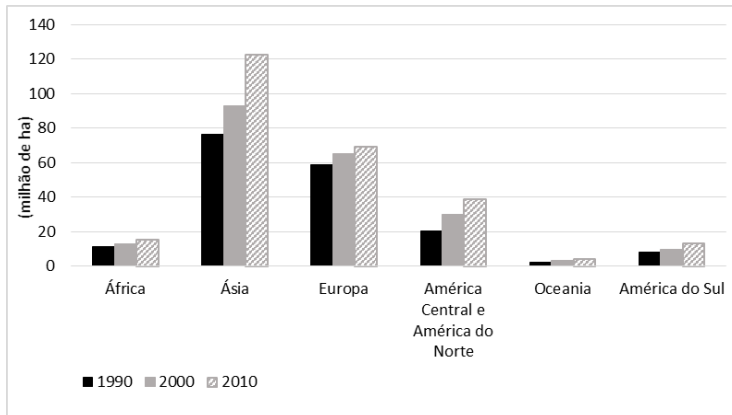


Figura 10. Área de florestas plantadas em 1990-2010. Fonte: *Global Forest Resources Assessment 2010* <http://www.fao.org/forestry/fra/62219/en/>

Estima-se que, em geral, as florestas tropicais são capazes de absorver e armazenar carbono a uma maior taxa do que as florestas boreais. No entanto, nem todas as florestas são bons sumidouros de carbono. Florestas muito antigas podem ser emissoras de carbono quando uma grande proporção de árvores mais velhas começa a decompor-se. No entanto, as atividades humanas através do desmatamento e da degradação florestal são as principais causas das emissões de carbono das florestas.

O manejo florestal sustentável contribui significativamente para a mitigação dos efeitos nocivos de gases de efeito estufa. Em geral, o termo mitigação refere-se a todas as atividades destinadas a reduzir as emissões de gases estufa e/ou remoção de CO₂ da atmosfera com o objetivo de estabilizar as concentrações de CO₂. As ações que podem ser tomadas no setor florestal para promover a mitigação incluem: (i) A gestão das florestas com alto potencial de absorção de carbono; (ii) A expansão dessas florestas através do reflorestamento e do aforestamento; (iii) A redução do desmatamento e a inversão da perda de cobertura florestal; (iv) A disponibilidade de um ambiente propício para investimentos e acesso ao mercado de produtos de base florestal sustentável, e (v) O aumento da utilização de produtos de base florestal, como bioenergia e produtos de madeira durável, e a substituição de materiais pouco ecoeficientes por produtos mais duráveis.

Essas atividades de mitigação relacionadas com as florestas têm uma grande vantagem de custo quando relacionadas a outras estratégias de mitigação das mudanças climáticas globais. O IPCC (2007) estima que em torno de 65% do potencial total de mitigação do setor florestal está localizado nos trópicos e cerca de 50% desse total pode ser alcançado por meio da redução do desmatamento. Em outras palavras, em função de grande potencial das florestas tropicais para absorver e sequestrar carbono, o mais rentável seria manter essas florestas, reduzindo o desmatamento e aumentando a expansão da cobertura vegetal.

Uma importante iniciativa para frear a degradação ambiental, considerada na agenda de negociação internacional, é a REDD (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação florestal) (UN-REDD, 2014). A REDD é cada vez mais vista como uma forma significativa, barata e rápida para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Projetos de REDD são baseados no fornecimento de incentivos financeiros para preservar florestas e, assim, manter os estoques de carbono em ecossistemas florestais. Uma nova abordagem denominada REDD+ foi proposta recentemente para financiar não só a conservação, mas também o incremento dos estoques de carbono florestal e o manejo florestal sustentável. Por outro lado, o REDD++ significa a inclusão das práticas de agricultura em prol do não desmatamento no conceito de REDD+. Os Países latino-americanos estão bem representados no debate sobre REDD+ e muitos projetos-piloto já são implementados na região.

No entanto, é claro que as mudanças climáticas têm efeitos prejudiciais sobre as próprias florestas. Nas florestas do Hemisfério Norte, por exemplo, a elevação da temperatura levou ao incremento significativo dos incêndios florestais e a uma proliferação maior de pragas e doenças. Isso tem implicações de aumento de custos na atividade florestal, dado que exigirão mudanças nos sistemas de produção madeireira e proteção. O IPCC (2007) estima que, em função do aumento do fogo e da seca, a produção madeireira deverá diminuir significativamente por volta de 2030, em grande parte da América do Norte, Europa Central e Oriental, bem como no sul e leste da Austrália, e em partes do leste da Nova Zelândia. Na América do Sul prevê-se que associados ao aumento da temperatura e à diminuição das chuvas poderia haver uma substituição gradual da floresta tropical por savanas no leste da Amazônia (NOBRE et al., 1991; TORRES; MARENCO, 2013) e a substituição da vegetação do semiárido por vegetação do árido, no nordeste (SOUZA; OYAMA, 2011).

Por outro lado, é evidente a falta de pesquisas que permitam determinar o potencial de crescimento e sequestro de carbono das espécies florestais, sejam nativas, sejam exóticas. Em recente trabalho (OLIVEIRA et al., 2012), nossa equipe determinou que espécies pioneiras apresentam melhor resposta a elevados teores de CO₂ que espécies não pioneiras e que o acúmulo de biomassa no sistema radicular é uma estratégia de crescimento das espécies arbóreas em condições de elevado CO₂. Além disso, foi determinado que as espécies pioneiras apresentam resposta positiva a incrementos de CO₂ até concentrações que chegam a 740 μmol mol⁻¹; no entanto, as espécies não pioneiras saturam-se com teores de CO₂ próximos a 500 μmol mol⁻¹, o que poderia provocar, no futuro das mudanças climáticas, predomínio das pioneiras em detrimento das não pioneiras (MARTINEZ et al., 2008).

5.5 Adaptação e mitigação das pastagens no contexto das mudanças climáticas: pastagens são fontes ou sumidouros de CO₂?

As pastagens tropicais têm sido consideradas como causadoras de fortes impactos nos processos terrestres, como ciclagem de carbono e funcionamento de comunidades microbiológicas no solo (LIENHARD et al., 2013). A produção animal extensiva é fonte de renda e de alimento para, aproximadamente, um bilhão de pessoas no mundo, o que representa um terço da população rural de baixa renda. Por outro lado, a atividade pecuária, em geral, tem sido considerada como importante responsável pela emissão de gases de efeito estufa (18%), em função da mudança de uso da terra (substituição de florestas por pastagens), pela degradação de pastagens, pela emissão de metano e de óxido nitroso pela fermentação entérica do gado e decomposição de dejetos, respectivamente, e pela emissão

de gases de efeito estufa em toda a cadeia de produção de carne e leite (FAO, 2006; HERRERO et al., 2013). No entanto, esse assunto é muito controverso, dado que, para os produtores, essa porcentagem estimada de emissão é muito alta e, para os ambientalistas, essa quantia está subestimada. Tal informação é fundamental para as tomadas de decisão acerca do assunto, especialmente tendo em vista o estado atual de degradação das pastagens por todo o planeta, estimada entre 20 e 35%, o que, além de reduzir a rentabilidade desta atividade, aumenta as emissões de gases estufa nestas áreas e exerce uma das mais sérias ameaças à biodiversidade, principalmente no Brasil, dada a crescente pressão de expansão sobre áreas de vegetação nativa, em especial no Cerrado e na Amazônia, que é decorrente, dentre outros fatores, de práticas inadequadas de manejo.

Como consenso, as pastagens desempenham um importante papel no contexto das mudanças climáticas, pois, dependendo do uso e manejo do solo, este pode atuar como uma fonte de CO₂ para a atmosfera, ou como sumidouro, pelo acúmulo de carbono como matéria orgânica do solo (IPCC, 2007). No caso específico das pastagens, alguns estudos recentes indicam que as pastagens tropicais têm o potencial de atuar como sumidouros de CO₂, aumentando os estoques de carbono orgânico no solo e reduzindo a quantidade de CO₂ atmosférico, especialmente em áreas degradadas, quando se implantam pastagens melhoradas e quando estas são adequadamente manejadas (MOSQUERA et al., 2012). As pastagens oferecem uma forma rápida para armazenar carbono devido a que a maioria de espécies é perene e, portanto, crescem continuamente e não sazonalmente como muitas culturas. Adicionalmente, as pastagens sofrem mínimas perturbações quando comparadas com as culturas, e quando bem manejadas não sofrem erosão. Por outro lado, a fixação do carbono do CO₂ pelo solo envolve duas transformações distintas: a formação de carbono orgânico do solo e a formação de carbono inorgânico do solo.

5.5.1 Efeitos das mudanças climáticas em pastagens (adaptação)

As respostas das pastagens às mudanças climáticas globais podem ser progressivas por numerosas razões. Alterações na temperatura e nos padrões de precipitação podem provocar mudanças na estrutura da comunidade e na composição de espécies, levando a um aumento na abundância de espécies normalmente não responsivas com possíveis mecanismos de *feedback* na quantidade e na qualidade da matéria orgânica do solo, o que por sua vez pode afetar diretamente a disponibilidade de recursos no solo, como o nitrato (HOEPPNER; DUKES, 2012; SANAULLAH et al., 2014).

Em espécies de pastagens, assim como em espécies florestais, o elevado CO₂ atmosférico causa o incremento na fotossíntese, a redução da condutância estomática e a redução da demanda de nitrogênio pelas plantas devido à maior eficiência no uso do nitrogênio e da água (LEAKEY et al., 2009). No entanto, a partir de uma previsão mais cientificamente embasada quanto às adaptações de pastagens, os modelos de simulação mais recentemente utilizados têm considerado outros fatores relevantes, como o teor de legumes presentes em pastagens e sua taxa de fixação simbiótica de nitrogênio em resposta ao CO₂. Esses aspectos apontam uma variação temporal na resposta ao CO₂ dirigida pela dinâmica do nitrogênio no ecossistema e também são pontos críticos para o entendimento das análises de impacto e adaptação das mudanças climáticas (SOUSSANA et al., 2007; PINTO et al., 2011; LI et al., 2014).

Mas, além do tipo de vegetação e seu manejo adequado, a dinâmica do ciclo do carbono no solo é também dependente da comunidade microbiológica atuante no solo e de outras atividades antropogênicas, como a produção de energia (DUVAL et al., 2013). Assim, sistemas de produção animal, como as pastagens, convivem, permanentemente, com o ônus dos impactos gerados

pela atividade e sua relação com o aumento na emissão de gases de efeito estufa (GEE). As mudanças no uso da terra, geradas pela expansão da pecuária e implantação de novas pastagens, a produção de metano, de origem metabólica animal, e a emissão de óxido nitroso, pelo uso de fertilizantes nitrogenados, são consideradas as principais fontes de origem das emissões (SOUSSANA et al., 2007).

5.5.2 Práticas de manejo de interesse especial no contexto das mudanças climáticas (mitigação)

As mudanças climáticas e a problemática social, econômica e ambiental envolvidas neste contexto demandam mudança de atitude em relação às formas de uso do solo. Neste sentido, as pastagens merecem atenção especial, dada a extensão ocupada por esse agroecossistema, seu papel fundamental na segurança alimentar e seu potencial como sumidouro de carbono. Atualmente, as mudanças no uso e manutenção da água e do solo, associadas às emergentes indústrias de bioenergia, estão em foco, pois têm impacto significativo nas emissões globais de gases de efeito estufa. O exemplo conhecido é a substituição de combustíveis fósseis por uma energia mais econômica derivada de bio-combustíveis, a qual aumenta a eficiência energética, adquirindo o potencial de reduzir as emissões de GEE (DUVAL et al., 2013).

Outras estratégias amplamente divulgadas e utilizadas na manutenção e otimização das pastagens, as quais garantem alta produtividade e o aumento da capacidade de estocagem do carbono no solo, incluem práticas como o pastejo rotacionado, o maior tempo de repouso para desenvolvimento de um sistema radicular robusto que sustente sucessivas rebrotas, e o consorciamento de forrageiras C₄, de rápido crescimento e alta produção de matéria seca, com a utilização de leguminosas fixadoras de nitrogênio (Figura 11).

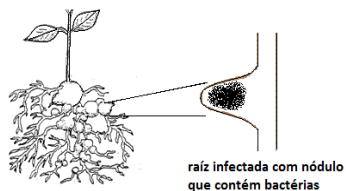


Figura 11. Nódulos simbióticos fixadores de nitrogênio atmosférico nas raízes de leguminosas.

Apesar de isoladamente tidas como plantas próprias para a composição de pastagens, as gramíneas são comumente consorciadas com leguminosas, em vista do aumento da eficiência de uso da terra, incluindo maior variedade entre as produções e o uso mais eficiente de recursos naturais, como solo, água, temperatura e radiação (EMBRAPA, 2007). Cultivos em consórcio têm potencial de substituir os atuais ecossistemas, representados em grande parte pelas monoculturas. O sucesso de sistemas consorciados, já obtidos em pastagens, deve-se à escolha correta das espécies componentes do sistema (ANDRADE et al., 2003).

Assim, a introdução de plantas leguminosas em pastagem de gramíneas é uma das principais ferramentas para prevenir a degradação das pastagens (LI et al., 2014). Diretamente, as leguminosas melhoram a qualidade da dieta animal, o que se verifica com leguminosas de alta palatabilidade, e, indiretamente, a contribuição se dá por transferência de nitrogênio para a gramínea associada, refletindo em melhoria de atributos forrageiros, como teor de proteína e maior capacidade produtiva, o que se traduz por maior capacidade de suporte (Figura 12) (DUKES et al., 2005).

Mais recentemente, técnicas de pesquisa tecnológicas e ferramentas de manutenção inovadoras mais avançadas que podem acelerar a adaptação de sistemas de cultivo, incluem modelos de simulação e sensoriamento remoto.

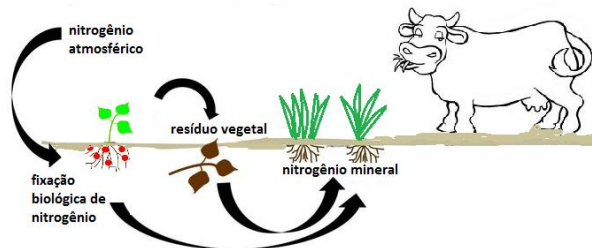


Figura 12. Utilização de leguminosas (C3) e gramíneas (C4) como consórcio em pastagens, provendo o enriquecimento de nitrogênio do solo e melhor palatabilidade da forragem para o animal.

Além disso, o melhoramento genético de cultivares já existente e o desenvolvimento de novas variedades de cultivo, têm-se mostrado ferramentas valiosas no estudo da adaptação e mitigação das mudanças climáticas na agricultura. Com invernos mais quentes, ondas de calor, secas prolongadas e diminuição da frequência de chuvas, genótipos de plantas utilizadas em pastagens necessitam ser modificados para enfrentar essas alterações climáticas provocadas pelos gases de efeito estufa (HUMPHREYS et al., 2006; BIJL; FISHER, 2011).

5.6 Considerações Finais

As mudanças climáticas já estão ocorrendo e são cada vez mais evidentes. Em resposta às mudanças climáticas, as espécies vegetais são confrontadas com opções limitadas para evitar a perda de seu hábitat ou extinção: adaptar-se, migrar ou morrer. Ecossistemas como os florestais e pastagens tropicais são particularmente vulneráveis às alterações climáticas. O incremento na concentração de CO₂, o aumento da temperatura e as alterações nos padrões sazonais de precipitação podem provocar alterações no

padrão de crescimento, fenologia da floração e frutificação, germinação e distribuição das espécies, além de impactos de pragas e doenças, e incremento no risco de incêndios. Todas essas alterações podem levar a mudanças na composição e no funcionamento dos ecossistemas florestais e de pastagens.

Para enfrentar as mudanças climáticas, são consideradas duas abordagens: a mitigação e a adaptação. A mitigação envolve a redução das fontes de emissão ou o aumento dos sumidouros dos gases de efeito estufa. Por outro lado, a adaptação envolve a resposta às alterações provocadas pelas mudanças climáticas e à redução dos impactos. As florestas contribuem com a mitigação das mudanças climáticas por meio de serviços globais do sequestro de carbono em sua biomassa através da fotossíntese. Por outro lado, os ecossistemas florestais também desempenham papel importante na adaptação, por meio dos serviços dos ecossistemas locais. Entre a mitigação e a adaptação, podem existir sinergias ou conflitos de escolha. Assim, projetos de mitigação podem facilitar ou dificultar a adaptação da população local para as alterações climáticas ou os projetos de adaptação podem afetar os ecossistemas e seu potencial de sequestro de carbono. Portanto, dado o potencial impacto das mudanças climáticas, os gestores florestais e pecuaristas enfrentarão grandes desafios para realizar ações em resposta às mudanças climáticas. Por outro lado, a adaptação às alterações climáticas exigirão novas abordagens para a pesquisa, bem como novas políticas e novas práticas de gestão florestal e de manejo de pastagens.

5.7 Agradecimentos

Ao CNPq (Processo 304450/2009-0 e Processo 400755/2013-0), FAPESP (Processo 2008/58075-8) e a CAPES, pelo suporte financeiro na forma de auxílios à pesquisas e pelas bolsas outorgadas aos autores do trabalho e

que permitiram a execução dos projetos na linha de pesquisa de mudanças climáticas em plantas.

5.8 Referências

- AINSWORTH, E.A.; LONG, S.P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, v.165, p.351-372, 2005.
- AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell and Environment**, v.30, p.258-270, 2007.
- ANDRADE, C.M.S.; GARCIA, R.; COUTO, L.; PEREIRA, O.G.; SOUZA, A.L. Desempenho de seis gramíneas solteiras ou consorciadas com o *Stylosanthes guianensis* cv. Mineirão e eucalipto em sistema silvipastoril. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.32, p.1845-1850, 2003.
- ATKIN, O.K.; TJOELKER, M.G. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. **Trends in Plant Science**, v.8, p.343-351, 2003.
- BIJL, C.G.; FISHER M. Crop adaptation to climate change. **CSA news magazine**, v.1, p.6-9, 2011.
- BROWN, J.H.; VALONE, T.J.; CURTIN, C.G. Reorganization of an arid ecosystem in response to recent climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, v.94, p.9729-9733, 1997.
- CUBASCH, U.; WUEBBLES, D.; CHEN, D.; FACCHINI, M-C.; FRAME, D.; MAHOWALD, N.; WINTHER, J-G. Introduction. In: STOCKER, T.F.D.; QIN, G.K.; PLATTNER, M.; TIGNOR, S.K.; ALLEN, J.; BOSCHUNG, A.; NAUELS, Y.; XIA, V. BEX; P.M.; MIDGLEY. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. eds., Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press NY, 2013.
- DRAKE, B.G.; AZCON-BIETO, J.; BERRY, J.; BUNCE, J.; DIJKSTRA, P.; FARRAR, J.; GIFFORD, R.M.; GONZALEZ-MELER, M.A.; KOCH, G.; LAMBERS, H.; SIEDOW, J.; WULLSCHLEGER, S. Does elevated atmospheric CO₂ concentration inhibit mitochondrial respiration in green plants? **Plant Cell Environ.**, v.22, p.649-657, 1999.
- DRAKE, B.G.; GONZÁLEZ-MELER M.A.; LONG, S.P. More efficient plants: A Consequence of Rising Atmospheric CO₂? **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.48, p.609-639, 1997.
- DUKES, J.S.; CHIARELLO, N.R.; CLELAND, E.E.; MOORE, L.A.; SHAW, M.R.; THAYER, S.; TOBECK, T.; MOONEY, H.A.; FIELD, C.B. Responses of grassland production to single and multiple global environmental changes. **Plos Biology**, v.3, p.1829-1837, 2005.
- DUVAL, B.D.; ANDERSON-TEIXEIRA, K.J.; DAVIS, S.C.; KEOGH, C.; LONG, S.P.; PARTON, W.J.; DELUCIA, E.H. Predicting greenhouse gas emissions and soil carbon from changing pasture to an energy crop. **Plos One**, v.8, p.e72019-e72019, 2013.

- EMBRAPA. **Cultivo e uso de estilosantes campo-grande**. Comunicado Técnico n° 105, 11 p., 2007.
- FAO. Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options. **Food and Agriculture Organisation**, Rome, Italy, 2006 <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a0701e/a0701e.pdf>
- GONZÁLEZ-MELER, M.A.; TANEVA, L.; TRUEMAN, R.J. Plant respiration and elevated atmospheric CO₂ concentration: cellular responses and global significance. **Annals of Botany**, v. 94, p.647-656, 2004.
- HERRERO, M.; HAVLÍK, P.; VALIN, H.; NOTENBAERT, A.; RUFINO, M.C.; THORNTON, P.K.; BLUMMEL, M.; WEISS, F.; GRACE, D.; OBERSTEINER, M. Biomass use, production, feed efficiencies and greenhouse gas emissions from global livestock systems. **PNAS Early Edition**, p. 1-6, 2013.
- HOEPPNER, S.S.; DUKES, J.S. Interactive responses of old-field plant growth and composition to warming and precipitation. **Global Change Biology**, v.18, p.1754-1768, 2012.
- HUMPHREYS, M.W.; YADAV, R.S.; CAIRNS, A.J.; TURNER, L.B.; HUMPHREYS, J.; SKOT, L. A changing climate for grassland research. **New Phytologist**, v.169, p.9-26, 2006.
- IPCC. CORE WRITING TEAM, PACHAURI, R.K.; REISINGER, A. (Eds.). Climate change 2007: synthesis report. **Contribution of Working Group I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- KIMBALL, B.A.; CONLEY, M.M.; WANG, S.; LIN, X.; LUO, C.; MORGAN, J.; SMITH, D. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. **Global Change Biology**, v.14, p.309-320, 2008.
- KÖRNER, C. Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply. **New Phytologist**, v.172, p.393-411, 2006.
- LAMBERS, H.; CHAPIN III, F.S.; PONS, T.L. **Plant Physiological Ecology** Springer: Science Business Media, LLC, p.604, 2008.
- LEAKEY, A.D.B.; AINSWORTH, E.A.; BERNACCHI, C.J.; ROGERS, A.; LONG, S.P.; ORT, D.R. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, v.60, p.2859-2876, 2009.
- LI, F.Y.; NEWTON, P.C.D.; LIEFFERING, M. Testing simulations of intra- and inter-annual variation in the plant production response to elevated CO₂ against measurements from an 11-year FACE experiment on grazed pasture. **Global Change Biology**, v.20, p.228-239, 2014.
- LIENHARD, P.; TERRAT, S.; MATHIEU, O.; LEVÊQUE, J.; PRÉVOST-BOURÉ, N.C.; NOWAK, V.; RÉGNIER, T.; FAIVRE, C.; SAYPHOUMMIE, S.; PANYASIRI; TIVET, F.; RANJARD, L.; MARON, P.A. Soil microbial diversity and C turnover modified by tillage and cropping in Laos tropical grassland. **Environmental Chemistry Letters**, v.11, p.391-398, 2013.
- LONG, S.P.; AINSWORTH, E.A.; LEAKEY, A.D.B.; NÖSBERGER, J.; ORT, D.R. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. **Science**, v.312, p.1918-1921, 2006.

- LONG, S.P.; AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A.; ORT, D.R. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the Future. **Annual Review of Plant Biology**, v.55, p.591-628, 2004.
- MARTINEZ, C.A.; BIANCONI, M.; SILVA, L.; APPROBATO, A.; LEMOS, M.; SANTOS, L.; CURTARELLI, L.; RODRIGUES, A.; MELLO, T.; MANCHON, F. Moderate warming increases PSII performance, antioxidant scavenging systems and biomass production in *Stylosanthes capitata* Vogel. **Environmental and Experimental Botany**, 2014 [no prelo]
- MARTINEZ, C.A.; OLIVEIRA, E.A.D.; LEGRACIE JUNIOR, J.R.; APPROBATO, A.U. The effects of elevated CO₂ on tropical trees are related to successional status and soil nutritional conditions. In: J.F. ALLEN; E. GANTT; J.H. GOLBECK; B. OSMOND. (Org.) **Photosynthesis**. Energy from the Sun. 1ªed.Munich: Springer, v. 1, p. 1383-1386, 2008.
- MATTHEWS, D.; GRAHAM, T.; KEVERIAN, S.; LAMONTAGNE, C.; SETO, D.; SMITH, T. National contributions to observed global warming. **Environmental Research Letters**, v.9, p.9, 2014.
- MITTLER, R.; FINKA, A.; GOLOUBINOFF, P. How do plants feel the heat? **Trends in Biochemical Sciences**, v.37, p.118-125, 2012.
- MOSQUERA, O; BUURMAN, P.; RAMIREZ, B; AMEZQUITA, M. Carbon stocks and dynamics under improved tropical pasture and silvopastoral systems in Colombian Amazonia. **Geoderma**, v.189-190, p.81-86, 2012.
- MYERS-SMITH, I.; FORBES, B.C.; WILMKING, M.; HALLINGER, M.; LANTZ, T.; BLOK, D.; TAPE, K.; MACIAS-FAURIA, M.; SASS-KLAASSEN, U.; LÉVESQUE E.; BOUDREAU, S.; ROPARS, P.; HERMANUTZ, L.; TRANT, A.; COLLIER, L.; WEIJERS, S.; ROZEMA, H.; RAYBACK, S.; SCHMIDT, N.M.; SCHAEPMAN-STRUB, G.; WIPF, S.; RIXEN, C.; MÉNARD, C.; VENN, S.; GOETZ, S.; ANDREU-HAYLES, L.; ELMENDORF, S.; RAVOLAINEN, V.; WELKER, J.; GROGAN, P.; EPSTEIN, H.; HIK, D. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. **Environmental Research Letters**, v.6, p.15, 2011.
- NOBRE, C.A.; SELLERS, P.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v.4, p. 957-988, 1991.
- OLIVEIRA, E.A.D.; APPROBATO, A.U.; LEGRACIE JR, J.R.; MARTINEZ, C.A. Soil-nutrient availability modifies the response of young pioneer and late successional trees to elevated carbon dioxide in a Brazilian tropical environment. **Environmental and Experimental Botany**, v.77, p.53-62, 2012.
- PETTIT, J.R.; JOUZEL, J.; RAYNAUD, D.; BARKOV, N.I.; BARNOLA, J-M.; BASILE, I.; BENDER, M.; CHAPPELLAZ, J.; DAVISK, M.; DELAYGUE, G.; DELMOTTE, M.; KOTLYAKOV, V.M.; LEGRAND, M.; LIPENKOV, V.Y.; LORIUS, C.; PEPIN, L.; RITZ, C.; SALTZMANK, E.; STIEVENARD, M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, v.399, p.429-436, 1999.
- PINTO, H.; TISSUE, D.T.; GHANNOUM, O. *Panicum milioides* (C3-C4) does not have improved water or nitrogen economies relative to C3 and C4 congeners exposed to industrial-age climate change. **Journal of Experimental Botany**, v.62, p.3223-3234, 2011.
- RIBEIRO, R.; MACHADO, E.C.; NUÑEZ, E.; RAMOS, R.; MACHADO, D. Moderate warm temperature improves shoot growth, affects carbohydrate status and stimulates

- photosynthesis of sweet orange plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.24, p.37-46, 2012.
- SANAULLAH, M.; CHABBI, A.; GIRARDIN, C.; DURAND, J.L.; POIRIER, M.; RUMPEL, C. Effects of drought and elevated temperature on biochemical composition of forage plants and their impact on carbon storage in grassland soil. **Plant and Soil**, v.374, p.767-778, 2014.
- SOLOMON, S.; PLATTNER, G.K.; KNUTTI, R.; FRIEDLINGSTEIN, P. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.106, p.1704-1709, 2009.
- SOUSSANA, J.F.; A. LÜSCHER. Temperate grasslands and global atmospheric change: a review. **Grass and Forage Science**, v.62, p.127-134, 2007.
- SOUZA, A.P.D.; GASPAR, M.; DA SILVA, E.A.; ULIAN, E.C.; WACLAWOVSKY, A.J.; NISHIYAMA JR, M.Y.; DOS SANTOS, R.V.; TEIXEIRA, M.M.; SOUZA, G.M.; BUCKERIDGE, M.S. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, Cell and Environment**, v.31, p.1116-1127, 2008.
- SOUZA, D.C.; OYAMA, M.D. Climatic consequences of gradual desertification in the semi-arid area of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.103, p. 345-357, 2011.
- TORRES, R.R.; MARENGO, J.A. Uncertainty assessments of climate projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v.112, p.253-272, 2013.
- UN-REDD. The United Nations Collaborative Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries. 2014. <http://www.unredd.org/AboutREDD/tabid/102614/Default.aspx> (acessado em fevereiro de 2014).
- VON CAEMMERER, S. **Biochemical models of leaf photosynthesis CSIRO**, Collingwood, Australia, 2000.
- VOSS, I.; SUNIL, B.; SCHEIBE, R.; RAGHAVENDRA, A.S. Emerging concept for the role of photorespiration as an important part of abiotic stress response. **Plant Biology**, v.15, p.713-722, 2013.
- WANG, D.; HECKATHORN, S.; WANG, X.; PHILPOTT, S.A meta-analysis of plant physiological and growth responses to temperature and elevated CO₂. **Oecologia**, v.169, p.1-13, 2012.
- YADAV, S.S.; REDDEN R.; HATFIELD, J. L.; LOTZE-CAMPEN, H.; HALL, A. J. W. **Crop Adaptation to Climate Change**. Wiley-Blackwell, p.632, 2011.