

A IMPORTÂNCIA DA FLORESTA NO EQUILÍBRIO DO DIÓXIDO DE CARBONO

Anton Krapfenbauer*

Os limites ambientais do atual modelo de civilização são evidentes: cerca de 7 bilhões de toneladas de carbono na forma de CO₂ são lançadas na atmosfera a cada ano; destes, 5,5 bilhões originam-se da queima de combustíveis fósseis, enquanto o restante se deve à destruição de florestas, em especial das formações tropicais. Como resultado deste processo, verifica-se um contínuo aumento do efeito estufa com reflexos prováveis sobre o clima, o equilíbrio dos solos, o nível dos oceanos etc. Entre as alternativas propostas com o sentido de alterar o curso das mudanças no meio ambiente, merecem análise mais acurada projetos como o FLORAM/USP, onde se prevê o reflorestamento de 20.10⁶ hectares ao longo de 30 anos. Qual o real significado desta ação, enquanto mecanismo de controle de CO₂? Em igual medida, há que se examinar o potencial de utilização de novas fontes energéticas livres de CO₂ e as possibilidades de colaboração internacional para a resolução destes problemas decisivos para o futuro da humanidade.

* Professor Dipl.Ing.Dr. da Universidade Rural de Viena, Áustria.

AUMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE CO₂ E OUTROS GASES

O aumento do conteúdo de CO₂ na atmosfera terrestre equivale a aproximadamente 0,5% ou 1,75 ppm por ano, significando 11 bilhões de toneladas de CO₂ ou 3 bilhões de toneladas de carbono. Também colaboram diretamente para o aumento do efeito estufa o vapor d'água, o metano, o gás hilariante, o ozônio da troposfera e os carbonetos halogênicos e, indiretamente, o monóxido de carbono (Tabela 1).

TABELA 1: Conteúdo atual, taxa de incremento, tempo de vida, absorção infra-vermelho e contribuição no aumento da temperatura.

Fórmulas Químicas	Nome	Conteúdo Atual ppb _v *	Tendência do Crescimento Anual	Tempo de Vida (anos)	Absorção Infra-vermelho (um)	Contribuição no aumento da temp. (%)
CO ₂	Dióxido de Carbono	348.000	0,5	- 500 (Atmosfera-Biosf.-Oceano)	2,5, 4,5, 15	45 50**
CH ₄	Metano	1.780	1,0 - 1,4	7 - 14	3 - 8	10 19
CO	Monóxido de Carbono	120	1,0	= 0,4	-	efeito indireto sobre CH ₄
N ₂ O	Óxido de Nitrogênio	310	0,3	150	3 - 8	5 4
O ₃	Ozônio (Troposfera)	5 - 250	1,0 - 4,0	de curta duração	9,6	5 8
O ₃	Ozônio (Estratosfera)	10.000	- 0,6 até - 1,0	-	9,6	- -
CFCl ₃	FREON 11	0,23	5,0	- 75	10 - 12	25 17
CF ₂ Cl ₂	FREON 12	0,40	5,0	- 110	10 - 12	25 17

* ppb_v = 1 parte por bilhões de volume

FONTE: SCHUURMANS, C.G.E. (1989); WUEBLES, D.J. et alii (1989); BOUWMAN, A.F. (1989); RAMANATHAN, V.** (1987)¹.

¹ SCHUURMANS, C.G.E. Changes in the atmospheric compositions and climate. In: *Atmospheric Ozone Research and Policy Implications*. Elsevier Science Publishers B.V., 1989.

WUEBLES, D.J. et alii. The role of atmospheric chemistry in climate change. IAPCA, 39(1), jan. 1989.

BOUWMAN, A.F. The role of soils and land use in the greenhouse effects. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, (37):13-19, 1989.

RAMANATHAN, V. Climate - Chemical-Interactions and effect of changing atmosphere - Trace gases. *Review of Geophysics*, (25):1.441- 1.482, 1987.

Um efetivo controle do efeito estufa só é possível através da redução da liberação de CO₂ e também da redução ou eliminação das emissões dos gases anteriormente relacionados. Um menor conteúdo de vapor d'água pode ser obtido mediante a redução das concentrações destes gases ou pela diminuição do efeito estufa.

CICLO DO CARBONO

A subsistência da vida sobre a terra depende dos ciclos de transformação e síntese do carbono. O carbono tem um papel especial, nas suas diferentes formas, tanto nos acontecimentos biológicos, como nos processos físicos e químicos. Na forma de CO₂ o carbono tem uma importante par-

ticipação na geração do efeito estufa e, conseqüentemente, grande influência no clima terrestre.

O ciclo de CO₂ representa uma parte do ciclo global de carbono. Dignas de nota são as reservas de CO₂ nos oceanos, 50 vezes mais altas que o conteúdo atmosférico (respectivamente 36.000 Gt C e 730 Gt C). A biomassa viva conta com cerca de 650 Gt C. Comparada com a atmosfera, a quantidade de C no solo é duas vezes mais alta, aproximadamente 1.500 Gt, com predominância de C na forma orgânica. Na forma de combustíveis fósseis ainda existentes, avalia-se um montante de 5.000 a 10.000 Gt C (Figura 1).

O conteúdo de CO₂ na atmosfera pode sofrer transformações devido a sua liberação ou absorção pelos vegetais, pelos solos ou pelos oceanos, assim como pelas transformações verificadas na litosfera, onde existem grandes reservatórios de CO₂ - 25 bilhões de Gt C. Atualmente são transformados 200 Gt C através do ciclo de carbono, na terra firme e nos oceanos, graças à síntese e ao processamento deste elemento nas plantas. Por outro lado, são liberados por ano 5,5 Gt C em forma de CO₂ devido à queima de combustíveis fósseis e 1,5 Gt C devido à destruição das florestas, perfazendo um total de 7,0 Gt C. Destes, 4 Gt C são, em tese, fixados através do ciclo de carbono, nos continentes e oceanos, na forma de biomassa. Aproximadamente 3 Gt C (1, 5% do carbono reciclado/ano) permanecem na atmosfera e contribuem, dessa forma, para o aumento do efeito estufa.

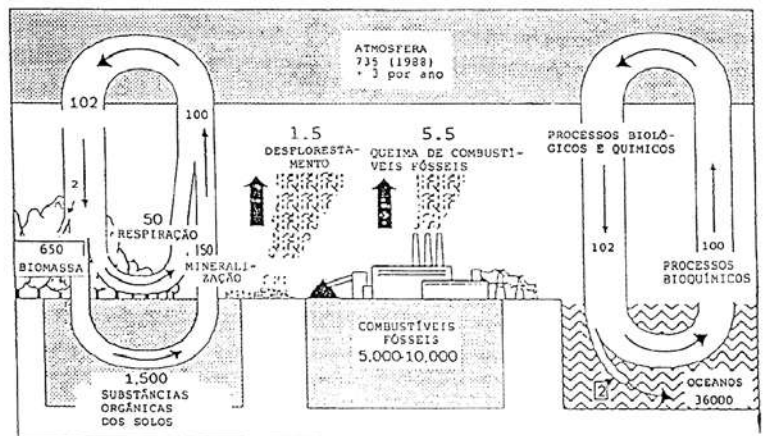


FIGURA 1: Balanço do carbono: emissão e circulação de carbono na atmosfera, solo e água, carbono compreendido na biomassa, nos combustíveis fósseis queimados, nos ecossistemas terrestres e aquáticos (gigatoneladas = 10⁹ t/ano).

FONTE: SCHNEIDER, St. H. (1989)².

² SCHNEIDER, St.H. The changing climate. *Science American*, 260(9), 1989.

Nas avaliações da vegetação como consumidora ou como produtora de dióxido de carbono, permanecem sem a devida atenção os efeitos de reação.

É fato que a concentração de CO_2 na atmosfera é um fator limitante para a produção vegetal. Numa situação ótima de todos os outros fatores, a produção de matéria vegetal pode ser incrementada consideravelmente através do aumento de CO_2 , até a saturação desta substância na atmosfera. Na Figura 1, é representado o consumo adicional de cerca de 4 bilhões de toneladas de carbono por ano pela biomassa marítima e terrestre. Como consequência do aumento anual do CO_2 reciclado através da biomassa (que decorre, obrigatoriamente, de um aumento no conteúdo de CO_2 na atmosfera) surgem os efeitos de reação do sistema. O aumento da produção de biomassa através de medidas visando maior produtividade, como culturas agrícolas, irrigação e adubação, leva também ao enriquecimento da atmosfera. A biomassa seria, portanto, um constante regulador do conteúdo de CO_2 se, conforme sua produção, não sofresse processo de reciclagem (exploração).

O PROJETO FLORAM E A REDUÇÃO DE CO_2

A biomassa em forma de madeira ou de outras substâncias orgânicas é um autêntico mecanismo de regulagem de CO_2 , se for evitada a sua exploração durante períodos longos; a madeira deve ter sua existência garantida, evitando-se a queima e determinando-se áreas para preservação e áreas para exploração.

Discute-se, na atualidade, a introdução de novos plantios florestais, assim como a elevação da capacidade de produção das florestas já existentes como forma de reter CO_2 na biomassa de madeira. No Brasil, nos Estados Unidos, na Indonésia e em muitos outros países existem considerações nesse sentido.

É o caso do Projeto FLORAM, elaborado pelo Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo³ (Brasil), cujo objetivo principal consiste na redução do conteúdo de CO_2 na atmosfera. O projeto prevê, para um período de 30 anos, o reflorestamento de $20 \cdot 10^6$ hectares com custos da ordem de $20 \cdot 10^9$ US\$, contemplando três tipos de reflorestamento:

³ USP. Projeto Floram - uma plataforma. *Estudos Avançados*, 4(9), 1990.

- 1 - reflorestamentos com objetivos ecológicos que deverão ser executados com espécies nativas, visando a proteção dos solos e a preservação de áreas com especial significado ecológico e paisagístico;
- 2 - reflorestamentos com significado preponderantemente econômico, executados com vistas à exploração econômica, mas, também, com objetivos de proteção ambiental, restrita a alguns locais, em especial contra erosão e desmoronamentos;
- 3 - reflorestamentos para ambos os objetivos citados anteriormente, mas atendendo também a outras exigências, como o reflorestamento de regiões específicas do Amazonas, ameaçadas por um sistema de exploração ineficiente.

Nas Tabelas 2 e 3 estão representados os tópicos relativos ao planejamento e às metas do Projeto FLORAM.

TABELA 2: Superfície estimada para os diferentes objetivos e níveis de produção (Km²).

Produtividade	OBJETIVO			TOTAL	
	Econômico	Ecológico	Ecológico + Econômico	km ²	10 ⁶ ha
Alta	10.605	575	700	11.800	1,180
Alta até média	35.937	15.325	16.188	67.450	6,745
Média	74.350	5.027	7.375	86.950	8,695
Média até baixa	4.575	7.375	750	12.700	1,270
Baixa	19.200	600	2.700	22.500	2,250
TOTAL	144.667	28.900	27.913	201.480	20,148

FONTE: PROJETO FLORAM - IEA/USP. Op. cit.

O projeto prevê diferentes planos localizados, assim como diferentes formas de execução, devido à extensão das terras brasileiras e à grande diversidade geográfica e social das áreas atingidas pelo mesmo. Na região Amazônica, por exemplo, o problema principal é a procura de métodos adequados que garantam o máximo possível de proteção para as florestas existentes.

TABELA 3: Avaliação do carbono fixado em diferentes superfícies produtivas num período de 30 anos.

Produtividade	Superfície Plantada/Ano 1/30 da Superfície Total (ha.10 ⁶) (a)	Superfície Acumulada em 30 anos (ha.10 ⁶) (b)	Potencial Limite tC*ha ⁻¹ A ⁻¹ m ³ *ha ⁻¹ A ⁻¹ (c)	Carbono Fixado (10 ⁶ t) (d)
Alta	0,0396	18,418	13,1 (52,4)	241,2
Alta até média	0,2248	104,547	10,1 (40,4)	1.055,9
Média	0,2898	134,772	7,3 (29,2)	983,8
Média até baixa	0,0423	19,685	4,7 (18,8)	92,5
Baixa	0,0750	34,875	1,3 (5,2)	45,3
TOTAL	0,6715	312,293	-	2.418,7 (2,4 Gt C)

FORNTE: PROJETO FLORAM - IEA/USP. Op. cit.

b = superfície acumulada ao longo de 30 anos (= n)

$$b = a \cdot 465 \text{ (fator)} \left(\text{fator} = \frac{n(1+n)}{2} = \frac{30 \cdot 31}{2} = 465 \right)$$

Espera-se, em 30 anos, que a redução de carbono na forma de CO₂ atmosférico seja da ordem de 2,4 Gt C. O projeto prevê um plantio progressivo, com um reflorestamento anual de 1/30 da superfície total prevista (20 . 10⁶ ha). O carbono a ser fixado pela cobertura florestal após 30 anos (2,4 Gt), equivale a apenas 0,91% das 262 Gt provenientes das emissões de CO₂ originadas da queima de combustíveis fósseis durante o mesmo período. A emissão de 5,5 Gt C provenientes da queima de combustíveis fósseis com um aumento de 3% ao ano serve de base para as considerações anteriores. Atualmente o aumento do conteúdo de carbono na atmosfera equivale a 3 Gt C ao ano na forma de CO₂ (Figura 1).

O conteúdo de 1 ppm_v de CO₂ na atmosfera corresponde a 2,13 Gt C. No período entre 1991 e 2021 se contaria, portanto, com um aumento de aproximadamente 350 a 395 ppm, considerando-se as mesmas quantidades de CO₂ advindas das emissões deste gás. Nas condições atuais (se não houver alterações), isto significa aproximadamente 0,4 a 0,5%. O conteúdo de carbono na forma de CO₂ atmosférico crescerá, então, em 96,1 Gt num período de 30 anos. Caso o Projeto FLORAM venha a ser executado, a redução resultante, de 2,4 Gt C, num prazo de 30 anos, corresponde a apenas 2,5% do aumento do conteúdo deste gás na atmosfera no mesmo período.

A biomassa funciona como um autêntico controle para o conteúdo de CO₂, somente se o carbono correspondente não for reconduzido ao seu ciclo. No Projeto FLORAM

prevê-se, nos casos 2 e 3, reflorestamentos que produzam, sem restrições, madeira para uso econômico. Isso seria a biomassa de madeira de 86% da superfície prevista (20 . 10⁶ ha) e, no mínimo, de 90% da massa de madeira produzida. O restante da madeira resultante da execução do projeto foi também pensado em termos de valor econômico.

No Projeto FLORAM, o efeito permanente obrigatório do CO₂ restringe-se, portanto, à eventual reserva de madeira dos reflorestamentos (estoque em pé) e à multiplicação das ligações orgânicas no solo. Tão logo o equilíbrio do ecossistema seja atingido, ou seja, quando houver equilíbrio entre as saídas e entradas de carbono no sistema, as novas florestas não mais representarão uma forma de controle de CO₂.

A utilização da biomassa produzida para geração de energia significa substituição de combustíveis fósseis. Teoricamente, vale dizer que o ciclo ativo do carbono transcorrerá sem danos ao meio ambiente. Isto, porém, é apenas uma referência teórica, pois:

- 1 - na produção e utilização de biomassa como fonte de energia observam-se, ainda hoje, consideráveis danos ao meio-ambiente;
- 2 - um incremento na produção e/ou produtividade conduz, automaticamente, devido às ligações do CO₂, à inclusão do carbono dos combustíveis fósseis no ciclo deste elemento.

No Projeto FLORAM não foram considerados os possíveis efeitos negativos das emissões sobre o aumento global da temperatura e sobre mudanças na distribuição de precipitação.

DESTRUIÇÃO DAS FLORESTAS TROPICAIS

Não se pode perder de vista o fato de que a contínua destruição das florestas existentes nas regiões tropical-úmida e subtropical representa uma fonte considerável para o aumento de CO₂ na atmosfera, com a liberação de cerca de 1,5 bilhões de toneladas.

Ecossistemas florestais intocados (naturais) têm um ciclo de nutrientes equilibrado. Isso também é válido em

relação ao carbono. Novos povoamentos florestais só funcionam como controle se o carbono na sua biomassa for fixado (imobilizado) até a quantidade limite do ecossistema (equilíbrio dinâmico). A partir de uma determinada armazenagem no solo e na biomassa viva atinge-se o equilíbrio, como se vê nos ecossistemas naturais: a geração e consumo da biomassa, assim como o ciclo de nutrientes e, em consequência, também o ciclo de CO_2 , encontram-se equilibrados.

A queima de biomassa, incluindo a destruição das florestas, contribui anualmente com até 2,5 Gt na forma de CO_2 para a elevação do efeito estufa⁴. Nos últimos anos, estima-se um montante anual de 1,4 até 1,5 Gt C, oriundos apenas da destruição das florestas tropicais, o que corresponde a aproximadamente 27% da quantidade liberada por ano, através da queima de combustíveis fósseis (5,5 Gt C).

Na Figura 2, pode-se constatar a evolução dos desmatamentos na América Latina no período de 1850 a 1985. De acordo com essa representação, as florestas naturais perderam, neste período, $370 \cdot 10^6$ ha, o que corresponde a uma perda de cerca de 28% da área florestada.

⁴HOUGHTON, R.A. et alii. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985. I. Progressive loss of forests. *Forest Ecology and Management*, (38):143-172, 1991.

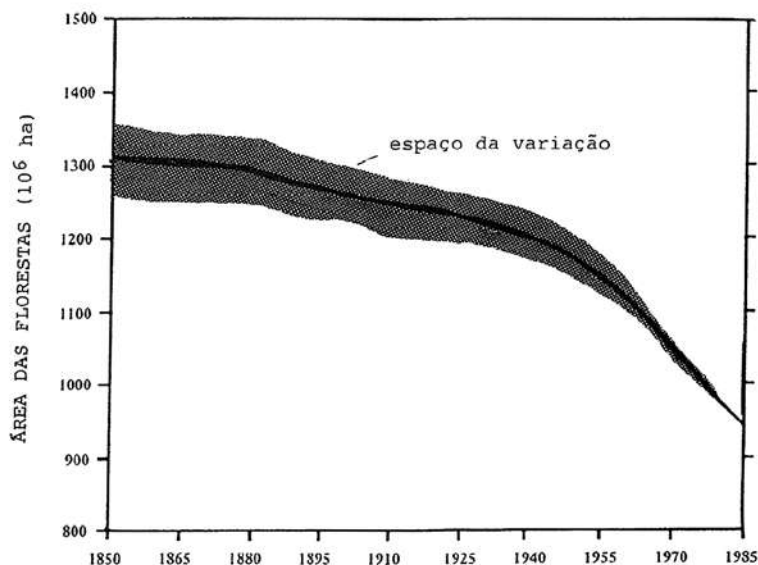


FIGURA 2: Evolução da destruição das florestas na América Latina entre 1850 e 1985.

FONTE: HOUGHTON, R.A. et alii. Op.cit.

⁵ HOUGHTON, R.A. et alii.
Op.cit.

A maior parte dos desmatamentos resultou do aumento da superfície destinada a pastagens (44%), seguido por culturas agrícolas (25%), superfícies degradadas (20%) e rotação de culturas (10%). A evolução desta transformação entre 1850 e 1985 pode ser observada na Figura 3⁵. Também os campos naturais sofreram considerável redução da sua superfície (17% em 1850), devido, principalmente, à introdução de culturas agrícolas no período de 1850 a 1985.

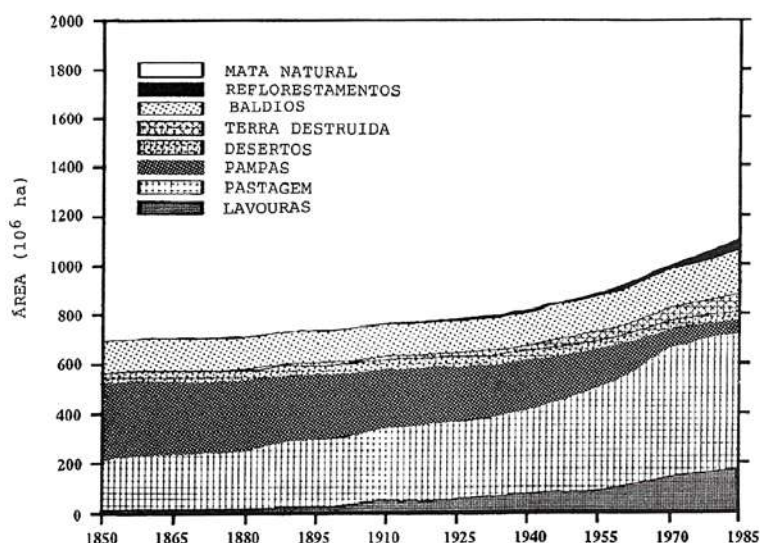


FIGURA 3: Mudança das superfícies correspondentes a diferentes formas de vegetação na América Latina entre 1850 e 1985.

FORNTE: HOUGHTON, R.A. et alii. Op.cit.

As florestas contêm, em comparação com as outras formas de vegetação, a maior quantidade (reserva) de carbono, tanto acima da superfície do solo como no subsolo. Pela transformação dos sistemas naturais em campos cultiváveis e em pastagens, ocorre uma queda da quantidade de carbono, na parte superficial do solo (manta) e no subsolo. Abandonando as áreas antes cultivadas, as formas de vegetação natural podem, às vezes, regenerar-se, requerendo para isso períodos de duração variáveis.

TABELA 4: Dinâmica do carbono na vegetação e no solo, correspondente à transformação de um sistema natural em um sistema agrícola (quantidade: t/ha e tempo: ano).

	TRÓPICOS			Florestas de Coníferas de Clima Quente	Florestas Temperadas de Folhosas	Savanas	Desertos com Arbustos
	Florestas Equatoriais	Florestas Sazonais	Florestas de Estepe				
Carbono da vegetação preservada	200	140	55	168	100	10	06
Perda de carbono através da colheita	05	05	05	05	05	05	05
Parte da vegetação original, abandonada para decomposição depois da derrubada							
1 ano	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,48	0,48
10 anos	0,35	0,35	0,30	0,35	0,35	0,0	0,0
1.000 anos	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Restante a ser convertido	0,33	0,33	0,38	0,33	0,33	0,50	0,50
Constante da decomposição local							
	0,5	0,4	0,3	0,3	0,5	0,4	0,3
Tempo exigido para a regeneração após a transferência							
	40	35	18	42	25	02	01
Conteúdo de carbono do solo intocado							
	98	98	69	134	134	42	58
Conteúdo de carbono após a rápida transformação da matéria de fácil decomposição							
	78	78	55	107	107	34	46
Tempo exigido para o processo de rápida decomposição							
	05	05	05	05	05	05	05
Conteúdo mínimo de solo cultivado							
	74	74	52	100	100	32	44
Tempo exigido para a incorporação do conteúdo mínimo de carbono no solo							
	20	20	20	20	20	20	20
Tempo requerido para a produção do conteúdo de carbono original no solo							
	40	35	18	42	40	02	01

RONTE: HOUGHTON et alii. Op.cit.

⁶ HOUGHTON, R.A. et alii. Op.cit.

Considerações a esse respeito foram elaboradas por HOUGHTON et alii⁶. Nas Tabelas 4 e 5, são discutidas as mudanças de um sistema natural para um sistema agrícola e para um sistema de pastagens, respectivamente. O restabelecimento do estado original só é possível se prevalecerem condições favoráveis. Existem inúmeros exemplos onde o processo regenerativo não ocorre mais.

No entanto, as projeções das Tabelas 4 e 5 só têm validade se não ocorrer nenhuma mudança climática, porém, existem indícios de que tais mudanças já estão acontecendo.

TABELA 5: Dinâmica do carbono na vegetação e no solo correspondente à transformação de um sistema natural em pastagens (quantidade: t/ha e tempo: ano).

TRÓPICOS							
	Florestas Equatoriais	Florestas Sazonais	Florestas de Estepe	Florestas de Coníferas de Clima Quente	Florestas Temperadas de Folhosas	Savanas	Desertos com Arbustos
Carbono da vegetação preservada	200	140	55	168	100	10	06
Conteúdo de carbono nas pastagens	10	10	28	10	10	10	06
Parte da vegetação original, abandonada para decomposição depois da derrubada							
1 ano	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,48	0,48
10 anos	0,35	0,35	0,30	0,35	0,35	0,0	0,0
1.000 anos	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Restante a ser convertido	0,33	0,33	0,38	0,33	0,33	0,50	0,50
Constante da taxa de decomposição local	0,5	0,4	0,3	0,3	0,5	0,4	0,3
Tempo exigido para a regeneração após a transferência	40	35	18	42	25	02	01
Conteúdo de carbono do solo intocado	98	98	69	134	134	42	58
Conteúdo mínimo de carbono nas pastagens	87	87	69	118	118	42	58
Tempo requerido para incorporação do conteúdo mínimo de carbono no solo	20	20	20	20	20	20	20
Tempo exigido para a regeneração do conteúdo original de carbono no solo	40	35	18	42	40	02	01

FONTE: HOUGHTON et alii. Op.cit.

A FLORESTA COMO CONTROLE PARA O CO₂: PERSPECTIVAS

A razão para as considerações sobre a necessidade do controle do conteúdo de CO₂ na atmosfera é o atual aumento de 3 bilhões de toneladas de carbono ao ano nesta forma.

TABELA 6: Distribuição mundial de terras cultivadas, florestas, estepes, savanas e terras sem cultivo com as transformações verificadas no período entre 1950 e 1985 (em bilhões de km²).

Continentes	Terra Cultivada, Agricultura Pastagens		Florestas		Estepes e Savanas		Terras sem Cultivo		Superfície Total
	1950	1985	1950	1985	1950	1985	1950	1985	
Europa	4,4	4,4	5,0	5,0	0,6	0,6	2,0	2,0	12,0
Ásia*	9,0	17,5	15,0	12,5	9,2	3,2	15,0	16,1	48,2
Austr. e Oceania	1,0	1,0	1,5	1,5	5,4	5,4	3,3	3,3	11,2
África	5,5	13,6	9,4	7,8	9,8	3,3	5,3	5,6	30,0
América do Norte	3,5	3,5	9,0	9,0	4,0	4,0	7,5	7,5	24,0
América do Sul	3,8	7,8	8,0	6,6	4,0	1,4	2,0	2,2	17,8
Antártica	-	-	-	-	-	-	14,2	14,2	14,2
Total	27,2	47,8	47,9	42,4	33,0	17,9	49,3	50,9	157,4
Diferença	(+20,6		(-)5,5		(-)15,1		(+1,6		

* Regiões com superfície florestal reduzida em 11,5% e superfície de savanas reduzida em 54%, em relação a 1950; neste mesmo período, as superfícies cultiváveis aumentaram em 75% e as terras incultas em 3,2%.
FONTE: MURIS, O. (1954)⁷.

⁷ MURIS, O. *Hansa Weltatlas*. Laupheim: Hermann Pfahl-Verlag, 1954.

Na Tabela 6, vê-se a distribuição de terras, florestas, estepes e savanas, assim como das terras sem cultivo na superfície terrestre. A superfície florestada equivale atualmente a cerca de $4,24 \cdot 10^9$ ha, aproximadamente 11,5% menos que em 1950. A longo prazo, quando se pensa em termos de florestas tropicais naturais, a floresta não representa um meio de controle para o CO₂. As entradas e saídas nesse ecossistema estão em equilíbrio.

O incremento da madeira utilizável nas florestas com manejo sustentado é bastante variável. Na Tabela 7, são representados os valores-limites (máximos) e os tempos de manejo das florestas plantadas e exploradas economicamente. Convém lembrar que apenas 1/3 das florestas da superfície terrestre ($1,16 \cdot 10^9$ ha) são alvo de exploração econômica e cerca de 1/7 ($0,63 \cdot 10^9$ ha) são manejadas.

Florestas plantadas com alta produção sustentada demandam contínuo abastecimento com nutrientes que significam, em última instância, altos custos com adubação, além de exigir diferentes medidas de proteção; florestas naturais, com manejo sustentado, ao contrário das primeiras, apresentam menor capacidade de produção de madeira.

TABELA 7: Produtividade de florestas plantadas com exploração econômica.

REGIÕES	CRESCIMENTO (m ³ /ha.ano)	TEMPO DE MANEJO (ciclo)
Canadá	1,0	-
Sibéria	1,0 - 1,4	-
Suécia	3,3	60 - 100
Estados Unidos	2,6	-
Inglaterra (coníferas)	10,0	40 - 65
Nova Zelândia (pinheiro-bravo)	18,0 - 30,0	20 - 40
África do Sul (pinheiro-bravo)	10,0 - 25,0	20 - 35
Sub-tropical (eucalipto)	5,0 - 30,0	8 - 25
Plantações de Teak	4,0 - 18,0	40 - 80
Plantações tropicais (folhosas)	25,0 - 35,0	8 - 20
Plantações tropicais (pinheiro-bravo)	15,0 - 45,0	8 - 30
Plantações tropicais (eucalipto)	60,0	7 - 20
Florestas tropicais (exploração econômica)	0,5 - 7,0	-
Florestas de Dipterocarpus do Sudeste Asiático (exploração econômica)	17,0	-

⁸ WOOD, P.J. The world situation as it will affect the U.K. *Scott. For.* (29):25-28, 1975.
EVANS, A.F. *Plantation forestry in the tropics*. Oxford: Clarendon Press, 1989.

⁹ WOOD, P.J. Op.cit.

¹⁰ SEDJO, R.A. Forests to offset the Greenhouse effect. *Journal of Forestry*, 87(7), 1989.

FONTE: WOOD (1975), cit. em EVANS (1982)⁸.

Nos Estados Unidos, por exemplo, é referido um crescimento anual médio de 2,6 m³/ha⁹ a 3,15 m³/ha¹⁰. Na Áustria esse crescimento é de aproximadamente 6 m³/ha/ano. Nos trópicos esperam-se produções de até 60 m³/ha/ano em plantações de eucalipto.

Em síntese, existem duas alternativas de contribuição da floresta enquanto "tampão" para o aumento de CO₂ na atmosfera:

- 1 - criação de novas florestas através de novos reflorestamentos e criação de reservas florestais por longos períodos;
- 2 - aproveitamento contínuo da biomassa de madeira das florestas manejadas, de forma a evitar a reciclagem de CO₂.

CRIAÇÃO DE NOVAS FLORESTAS

O cenário para as considerações seguintes foi criado para quatro situações de incremento da biomassa de madeira por ha/ano: 3, 6, 9 e 12 m³. O conteúdo de carbono por m³ de madeira é de 0,25 t. Para produções-limite de 3, 6, 9 e 12 m³/ha/ano, a fixação de CO₂ na forma de carbono corresponde, respectivamente, a 0,75, 1,50, 2,25 e 3 toneladas/ha/ano. Para imobilizar os 3 . 10⁹ t C correspondentes ao aumento anual de CO₂ na atmosfera, devido à queima de combustíveis fósseis e à destruição de florestas, deveriam ser replantadas as superfícies indicadas na Tabela 8.

É difícil imaginar que novos plantios florestais possam

ser introduzidos numa parte significativa da superfície hoje utilizada para agricultura ($17,8 \cdot 10^9$ ha). Na melhor das hipóteses, tais plantios ocupariam solos marginais com capacidade de produção média ($6 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$) a baixa ($3 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$). Mesmo com uma produção de $12 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ seriam necessários, para controle-tampão do CO_2 , 21% da superfície global utilizada pela agricultura. Além disso, a madeira assim produzida deveria ser excluída dos processos destrutivos que significam reciclagem rápida de CO_2 . Essa hipótese é, no entanto, irreal.

TABELA 8: Superfície florestal a ser replantada para o controle-tampão de CO_2

PRODUÇÃO-LIMITE (valores médios anuais, m^3/ha)	3	6	9	12
Formação de C (t/ha/ano)	0,75	1,50	2,25	3,00
Adicional de superfície florestal necessário (ha)	$4 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$1,34 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$
% das áreas cultivadas ($4,78 \cdot 10^9$ ha)	85	42	28	21
% das áreas florestadas já existentes ($4,24 \cdot 10^9$ ha)	94	47	31	24
% das áreas florestadas exploradas ($1,46 \cdot 10^9$ ha)	247	137	92	68
% das áreas florestadas com manejo sustentado ($0,63 \cdot 10^9$ ha)	635	317	213	159

Outro problema a ser equacionado refere-se aos custos dos novos plantios e dos tratamentos culturais exigidos na fase de implantação. Os valores são, porém, muito diferentes nas diversas regiões do planeta. Nos países do Terceiro Mundo, tais valores são substancialmente menores que, por exemplo, nos Estados Unidos e na Europa Ocidental. Considerando-se os custos de implantação e, no mínimo, dos tratamentos culturais iniciais, tem-se um montante de 1.000 US\$ por hectare; dessa forma, seria necessário, de acordo com os dados da Tabela 8, um total de 1,34 a 4 trilhões de dólares.

Aos custos iniciais devem-se acrescentar, ainda, os juros conforme a duração do manejo, entre 7 e 100 anos.

Os custos, com certeza, não seriam cobertos com o produto de venda da biomassa de madeira que só se valorizaria num prazo longo. É, porém, improvável que esta massa de madeira, produzida em um período mais ou me-

nos longo, pudesse ter uma utilização sem processos destrutivos e, com isso, sem reciclagem de CO₂. Neste contexto, destacam-se dois importantes aspectos:

- 1 - os custos para um controle-tampão contínuo do CO₂ através da biomassa de madeira deveriam ser cobertos, em grande parte, pelo consumo de combustíveis fósseis;
- 2 - como os novos plantios florestais, quando explorados normalmente (ou seja, no ponto ótimo da biomassa armazenada no sítio, com estoque ótimo em pé), atingem o equilíbrio entre imobilização e liberação de CO₂, o controle-tampão do CO₂ (oriundo da queima de combustíveis fósseis) gerado por esses plantios é restrito ao período de acumulação da biomassa.

AS FLORESTAS EXISTENTES COMO CONTROLE OU FONTE DE CO₂

As florestas das diferentes zonas climáticas do planeta não são, em termos teóricos, nem consumidores, nem fonte de CO₂. Elas encontram-se em equilíbrio dinâmico. A imobilização de CO₂ através da formação de biomassa equivale à liberação deste gás através da decomposição. A imobilização contínua de CO₂ ocorre apenas quando a biomassa é retirada do ciclo de CO₂ e quando o conteúdo de húmus aumenta. A liberação de CO₂ manifesta-se quando da destruição das florestas e da diminuição da biomassa ocasionada por processos de queima conduzidos pela ação humana ou por perdas naturais.

Mudanças climáticas podem interferir no equilíbrio dinâmico dos solos, ocasionando aumento de carbono, por imobilização (clima mais frio) ou liberação (clima mais quente). Em ambos os casos, a concentração de substâncias húmicas no solo é afetada.

TABELA 9: Reservas de carbono e avaliação das transformações anuais no solo (entradas e saídas)*.

ECOSSISTEMA	RESERVA ESTIMADA (Gt)	TRANSFORMAÇÕES (Entradas e Saídas) (Gt/ano)
Tundra	191	0,9
Deserto boreal	20	0,1
Desertos frios	43	0,9
Desertos quentes	20	0,6
Bosques tropicais	02	0,1
Estepes temperadas frias	120	2,7
Estepes temperadas de espinheiros	30	1,8
Florestas tropicais e savanas	129	11,5
Floresta boreal úmida	49	0,8
Floresta boreal com alta pluviosidade	133	4,7
Floresta temperada de clima frio	43	3,1
Floresta temperada de clima quente	61	7,3
Floresta tropical de clima muito seco	22	1,7
Floresta tropical de clima seco	24	1,1
Floresta tropical de clima úmido	60	13,2
Floresta tropical com alta pluviosidade	78	15,3
Terras exploradas economicamente (sub-avaliada)	167	10,2
Pântanos	202	--
TOTAL	1.394	75,8

* As reservas de carbono orgânico são indicadas de acordo com POST et al. (1982). As entradas e saídas foram calculadas de acordo com o modelo Rothamsted a partir de diferentes dados.
 FONTE: JENKINSON, D.S. et alii (1991)¹¹.

¹¹ JENKINSON, D.S. et alii. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 351 (6.322) : 304-306, 1991.

O conteúdo de carbono nas substâncias orgânicas dos primeiros metros do perfil do solo é avaliado em cerca de 1.500 Gt. Isto corresponde a duas vezes o conteúdo de carbono na atmosfera, atualmente avaliado em 730 Gt, com um aumento aproximado de 3 Gt por ano. O conteúdo de carbono no solo é também duas vezes maior que o seu conteúdo na biomassa terrestre, avaliado em 650 Gt com um possível aumento anual de 2 Gt.

Um efeito de reação a um aquecimento do planeta é a diminuição das reservas orgânicas de carbono no solo através de maiores taxas de liberação de CO₂. Considerações sobre esse problema foram colocadas por JENKINSON et alii¹². Todas elas partem do princípio de que, dentro de uma zona climática, também ocorre movimentação de carbono do solo, no contexto de um equilíbrio dinâmico.

Na Tabela 9, de acordo com as considerações de JENKINSON et alii¹³, são indicadas a reserva e a conversão anual de carbono no solo, para os mais representativos ecossistemas do planeta, inclusive as superfícies exploradas economicamente, cujos valores estão, com certeza, subestimados. Na Figura 4 estão representados os diferentes cenários-modelo para uma possível liberação de CO₂ através da decomposição dos depósitos de matéria orgânica

¹² JENKINSON, D.S. et alii. Op.cit.

¹³ JENKINSON, D.S. et alii. Op.cit.

¹⁴ JENKINSON, D.S. *J. Soil Sci.* (28):424-434, 1977.
AYANABA, A. & JENKINSON, D. S. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (54): 112-115, 1990.

dos solos no período de 1991 a 2050. A base para estas considerações é o modelo "ROTHAMSTED"¹⁴. Trata-se, em sua origem, da influência da exploração agrícola sobre o conteúdo de húmus nos solos. Neste modelo estão incluídos experimentos de decomposição de gramíneas (pastagens) a longo prazo, de acordo com o comportamento dos componentes de fácil e difícil mineralização. As informações da Tabela 9, as avaliações do IPCC (International Penal on Climatic Change) de 1990 e os possíveis aumentos de temperatura são também considerados. Além disso, são utilizadas uma entrada e uma saída conforme indicação na mesma tabela.

Com aumentos simulados de temperatura da ordem de 0,02, 0,03 e 0,05°C/ano seriam liberados 11, 61 e 100 Gt C na forma de CO₂, num prazo de 60 anos. Esses valores corresponderiam a 13, 19 e 31% da liberação de CO₂ através da queima de combustíveis fósseis, no mesmo prazo, levando-se em conta os níveis atuais. Um aumento de temperatura ocasionaria, portanto, um significativo efeito de reação, que, por sua vez, produziria um aumento ainda maior da temperatura.

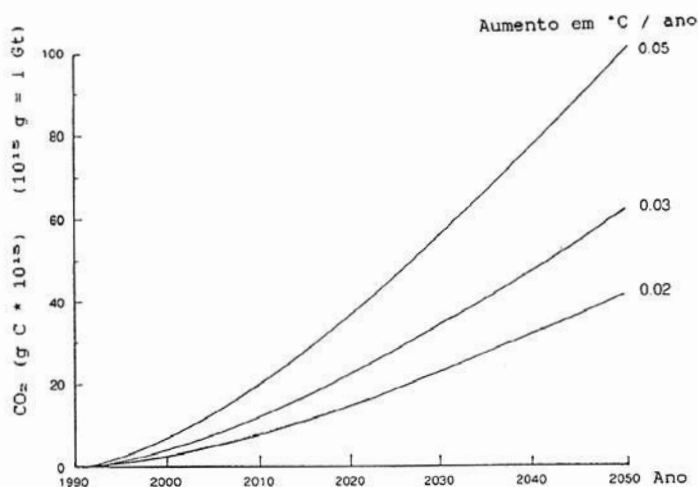


FIGURA 4: Efeitos do aumento de temperatura na liberação de CO₂ do solo (modelo global de observação).

FONTE: JENKINSON et alii. Op. cit.

Como regra geral, pode-se afirmar que as reservas de húmus no solo (inclusive os acréscimos) aumentam com

a diminuição de temperatura e vice-versa. Uma mudança do clima, especialmente com invernos mais quentes, desencadeará um efeito de reação com transformações acentuadas nas taxas de conversão de húmus nos solos, ocasionando maior disponibilidade de nutrientes e maior liberação de CO₂.

Altas temperaturas representam, também, maiores perdas respiratórias nos diferentes patamares das florestas. Estas perdas poderão ser compensadas, em âmbito local, através de um crescimento maior, devido ao aumento de temperatura e da disponibilidade de nutrientes.

Por seu turno, novas substâncias húmicas originam-se da transformação de matéria orgânica morta. Em uma dada zona climática, o solo contém húmus, em equilíbrio dinâmico. Através da conversão de grandes quantidades de resíduos orgânica advindos da exploração, do lixo etc. aumenta o conteúdo de matéria orgânica nos solos. Assim sendo, um enriquecimento do solo poderia contribuir para um aumento de carbono nos solos florestais. Este fato, associado à maior disponibilidade de nutrientes, conduz, teoricamente, a um maior crescimento e, em consequência, a maiores quantidades de carbono nas reservas de madeira (estoque em pé), desde que condições adversas não impeçam este crescimento (diminuição na precipitação, ocorrência de parasitas ou influência de substâncias nocivas).

CONTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA DE MADEIRA PARA O SUPRIMENTO DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS

O uso de 5,5 Gt C de combustíveis fósseis é responsável por 78% do consumo anual de energia. Para geração desta quantidade de energia através da produção continuada de madeira, com produções-limite de 3, 6, 9 ou 12 m³/ha/ano, seriam necessárias superfícies florestais de 7,3 . 10⁹, 3,6 . 10⁹, 2,4 . 10⁹ e 1,8 . 10⁹ ha, respectivamente. A superfície florestal global manejada é, porém, de 630 . 10⁶ ha. Mesmo tendo em vista uma produção mundial irreal de 9 m³ de madeira utilizável por ano e por hectare, as superfícies florestais com regime sustentado deveriam produzir quase quatro vezes mais para cobrir as necessidades energéticas anuais cobertas pelos combustíveis fósseis.

A necessidade energética mundial aumenta em 3% ao ano. Apenas para cobrir este aumento, as superfícies florestais com produção sustentada ($6 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$) deveriam crescer em $110 \cdot 10^6 \text{ ha}/\text{ano}$. Isso corresponderia a 17,5% das superfícies florestais do planeta hoje manejadas. De acordo com essas considerações, a contribuição da biomassa de madeira para suprir as necessidades energéticas mundiais permanecerá, também no futuro, restrita a valores bastante modestos.

PERSPECTIVAS E CONSEQUÊNCIAS DO AUMENTO DE CO_2

Abalizados cientistas e climatólogos não nutrem mais dúvida de que o aquecimento do globo terrestre já está ocorrendo¹⁵. Se a produção dos gases causadores do efeito estufa pudesse ser controlada, é provável que, mesmo assim, o aquecimento teria lugar, já que existe um alto potencial no sistema ar - oceanos - solos (ver Figura 1). Um aquecimento global maior que o receado foi detectado nos últimos tempos, através de medições da evolução térmica das superfícies marítimas¹⁶. O aumento médio de temperatura foi de $0,16^\circ\text{C}/\text{ano}$ no hemisfério norte e de $0,10^\circ\text{C}/\text{ano}$ no hemisfério sul.

Todos os cientistas que trabalham nos diversos campos da biologia precisam, por esta razão, começar, rapidamente, a planejar e executar medidas reparadoras.

Em conferência no Congresso Norte-Americano (1989) foi demonstrada pelo EPA (Environmental Protection Agency), entre outros aspectos, a necessidade de redução das emissões de CO_2 em 50 a 80%, para que os conteúdos de CO_2 atmosférico voltem aos níveis verificados no período 1950 - 1980.

Se, associado a estas observações, for considerado o fato de que 78% da necessidade energética mundial são supridos atualmente pelo consumo de combustíveis fósseis e apenas 17% por fontes renováveis, configura-se, então, um quadro ainda mais assustador. Somente através de uma efetiva e drástica redução da queima de combustíveis fósseis poder-se-ia evitar essas consequências. Imaginem-se as reações em cadeia (efeitos de reação) que poderiam ocorrer em razão da liberação de CO_2 dos oceanos aquecidos (com um potencial de 132 trilhões de toneladas de CO_2)

¹⁵ WOODWEL, M.G. The warming of the industrialized middle latitudes 1985-2050: Causes and consequences. *Climatic change*, (15):327- 335, 1989.
HOUGHTON, R.A. & WOODWELL, G.M. Global Climatic Change. *Scientific American*, 260(4):36-41, 1989.
HANSEN, J.E. et alii. Comparison of solar and other influences on long-term climate. NASA Conference Publication Nr. 3.086, Proceedings of Conference, hold at NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, 1990.
SCHONWIESE, Ch.D. & DIEKMANN, B. *Die Traibhansseffekt*, Hamburg, 1989.
SCHNEIDER, St.H. Op.cit.
GRASSL, H. & KLINGHOLTZ, R. *Wir Klimamacher* - erschienen bei S. Fischer Verlag, Frankfurt. 1990.

¹⁶ STRONG, A.E. Greater global warming revealed by satellite - derived sea surface temperature trends. *Nature*, 338 (6.217) : 642-645, 1989.

e do crescente aquecimento das camadas húmicas dos solos (com um potencial de 5,5 trilhões de toneladas de CO_2), em especial, dos solos com camadas permanentemente congeladas. Destas, seria liberado, em grandes proporções, o gás metano que, comparado ao CO_2 , tem um efeito estufa 20 vezes maior. Com base nesses efeitos de reação, é possível que nas próximas décadas o aumento médio de temperatura seja de até 1°C .

UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

Em decorrência do exposto, as fontes alternativas de energia, livres de carbono, devem ser consideradas como prioridade. A biomassa como material para combustão é tida, em algumas afirmações pouco sérias, como inócua ao meio ambiente. Isso não é correto, nem mesmo quando se pensa só em termos de liberação de carbono e vapor d'água na combustão. Até os processos mais eficientes de queima de biomassa produzem quantidades apreciáveis de monóxido de carbono, aldeídos, aromáticos e hidrogênio carburado, além do óxido de nitrogênio. Todos esses compostos são prejudiciais à atmosfera e, entre outros processos, participam da formação de oxidantes (ozônio). Para o controle-tampão do CO_2 é necessário que se aumentem, ao máximo, os estoques de madeira em pé e que se pense, com urgência, no manejo racional e sustentado para exploração das florestas. A madeira deve ser usada segundo formas duradouras até o momento que os combustíveis fósseis possam ser completamente substituídos por fontes de energia livres de CO_2 . Os proprietários de áreas com florestas e os produtores de madeira deverão ser remunerados pelos serviços indiretos de proteção.

No futuro, a utilização direta da energia solar deverá ser considerada como prioritária, senão exclusiva (Figura 5). Também a energia eólica e hidroelétrica terão grande importância como fontes indiretas, especialmente nas primeiras fases do processo de substituição, com aplicação localizada, como, por exemplo, o uso de bombas de troca de energia térmica. A utilização de energia solar como fonte de calor já é comparável à utilização de combustíveis fósseis, em termos de custos, mesmo sem a existência de uma fiscalização ecológica eficiente para o uso de combustíveis fósseis. A energia solar pode, no momento, funcionar apenas como um substituto parcial.

As maiores expectativas são dedicadas ao uso futuro da energia fotovoltaica. As plantas utilizam para a produção de biomassa, em média, apenas 1% da energia solar. Essa percentagem é ainda menor tendo em conta inevitáveis perdas nos processos de exploração e consumo. As células de energia voltaica já utilizam, em laboratório, cerca de 35% da energia solar. Certas células em uso já possuem um grau de aproveitamento de 12 a 15%.

A energia fotovoltaica com emprego direto ou as células de armazenamento (baterias) demandam necessariamente materiais de combustão altamente energéticos. Para esse tipo de tecnologia é indispensável a geração de energia de emprego estacionária ou móvel.

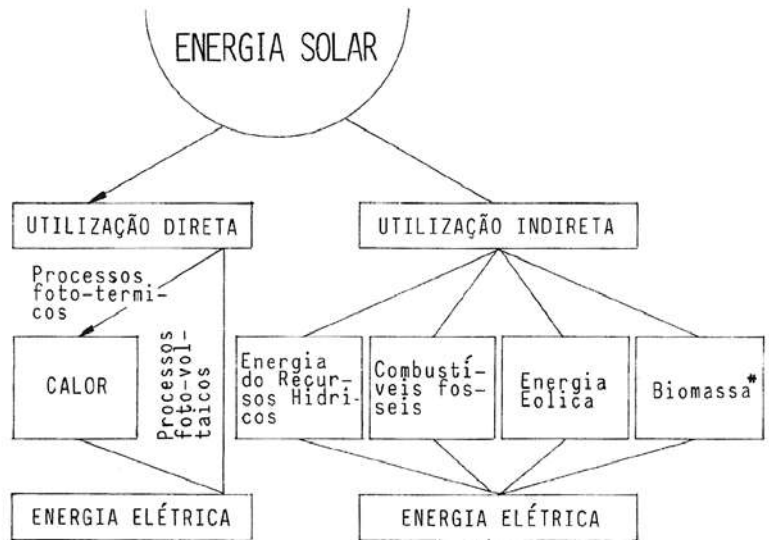


FIGURA 5: Formas direta e indireta de aproveitamento da energia solar com geração de energia elétrica (*complemento do autor).

FONTE: FRITZSCH, P. (1991)¹⁷.

¹⁷ FRITZSCH, P. *Elektrizität aus dem Sonnenlicht*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1991.

Com a ajuda da eletricidade advinda deste tipo de energia, é possível a obtenção de hidrogênio e oxigênio através do processo de cisão das moléculas de água (eletrolise). Este processo deve evitar, no entanto, a combustão do hidrogênio pela ação do ar. Isso ocasionaria a produção de altas concentrações de NOx e, em consequência, danos ao meio ambiente. Se isso acontecesse persistiriam

as condições favoráveis para a formação de oxidantes (ozônio), junto com a liberação de hidrocarbonetos da vegetação em stress. O aparecimento de pequenas quantidades de óxidos de nitrogênio promove a formação de ozônio na troposfera.

O oxigênio e o hidrogênio gerados pela eletrólise, ao invés de serem lançados na atmosfera, precisam ser reaproveitados em processos de combustão subsequentes. Através deles, a energia necessária é produzida juntamente com moléculas de água, como parte de um ciclo que, em tese, não produz resíduo algum.

Será necessária, portanto, a busca de mecanismos que, a partir deste processo, em si arriscado, consigam produzir formas de geração de energia do tipo estacionário e móvel; ressalte-se que já existe alguma experiência no campo da exploração espacial.

COLABORAÇÃO CONJUNTA NO CAMPO NACIONAL E INTERNACIONAL

Em vista da ameaça de desastre ecológico mundial é imprescindível a colaboração nacional e internacional, com a aplicação de recursos na busca de soluções para o problema energético, principalmente através do uso da energia solar. Um grande estímulo para isso é o fato de que, junto com a diminuição de CO₂ atmosférico, uma boa parte dos outros problemas ambientais poderiam ser resolvidos.

A essas considerações deve-se acrescentar, ainda, o fato de que os combustíveis fósseis acabarão um dia. Eles são, portanto, uma base frágil, ou melhor, base nenhuma, para a construção do futuro.

Além de soluções para o problema do efeito estufa, não resta dúvida de que novas normas de comportamento e novos padrões de vida devem ser buscados, mediante um planejamento representativo no campo internacional.

A melhor contribuição, no momento, é a economia no uso de energia. Também serão necessários preços mais justos para a utilização de combustíveis fósseis, como uma forma eficiente de controle sobre o consumo. Os recursos, advindos do aumento do preço dos combustíveis fósseis, deverão financiar projetos que visem a utilização das novas formas de energia solar, livres de CO₂, servindo, também, para a introdução das medidas necessárias ao controle-tampão do CO₂, no campo nacional e internacional.

OUTRAS FONTES:

- HOUGHTON, J.T. et alii. *Inter-government Panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- LASHOF, D.A. & TIRPAK, D. *A. Policy options for stabilizing global climate, executive summary*. Draft Report to Congress U.S., Environmental Protection Agency, Office of Policy Planning and Evaluation, Washington, D. C., 1989.
- RIND, D. et alii. *Change in climate variability in the 21st Century*. *Climatic change*, (14):5-37, 1989.
- WEINBERG, C.J. & WILLIAMS, R.H. *Energy from the sun*. *Scientific American*, 263 (3), 1990.