

# FLUXO DE ENERGIA E EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO NA PRODUÇÃO DE FORRAGEM

Hilton Silveira Pinto\*

Tatiana Deane A. Sã\*\*

## 1. INTRODUÇÃO

A significativa expansão que vem experimentando a atividade pecuária, em especial a partir da década de sessenta na América Latina, tem levado à substituição da cobertura vegetal de extensas áreas, originalmente ocupadas por vegetação nativa ou por culturas agrícolas, por plantios de espécies forrageiras, que entretanto, frequentemente, vêm exibindo desempenho inferior ao esperado (SERRÃO & TOLEDO, 1988).

O rendimento alcançado nas áreas ocupadas por espécies forrageiras é determinado, primariamente, pela oferta sazonal de energia solar cuja utilização, contudo, é condicionada por fatores climáticos, como temperatura e disponibilidade hídrica. Da mesma forma, o estado nutricional do solo e a potencialidade da comunidade de plantas em captar e converter a energia solar em biomassa, direcionam os esforços ao aumento da produtividade de biomassa forrageira a uma avaliação detalhada dos diversos componentes do processo de conversão de energia solar em biomassa para, então, identificar os pontos que ora limitam a produtividade em diferentes am

---

\* Depto. de Fisiologia Vegetal - IB/CEPAGRI/UNICAMP-CNPq.

\*\* CEPATU-EMBRAPA.

bientes. Permite-se assim orientar a seleção de linhas de pesquisa a serem incentivadas para maximizar a produtividade forrageira.

Considera-se neste texto como forragem, todo material vegetal verde, seco ou na forma de concentrados, usados para a alimentação de animais, incluindo não apenas o proveniente de plantas pertencentes às famílias de espécies forrageiras mais tradicionais, como as gramíneas e leguminosas, mas também o oriundo de espécies produtoras de raízes e de frutos que se prestam à alimentação animal (HAVARD - DUCLOS & COSTE, 1967; CHURCH & POND, 1974).

O presente trabalho procura mostrar como a radiação solar incidente se distribui qualitativa e quantitativamente em fluxos energéticos na superfície terrestre, que atuam na comunidade para a produção de biomassa. Mostra ainda, a partir de informações disponíveis sobre a eficiência de conversão de energia solar em biomassa de forragem, as possibilidades atuais de avaliação deste processo, mediante o emprego de técnicas de análise quantitativa de crescimento, modelagem e simulação e de sensoriamento remoto. São apresentadas sugestões para a maximização de produtividade através, por exemplo, de práticas de manejo ou melhoramento genético, visando maior captação de energia e/ou melhor eficiência de conversão em biomassa.

## 2. FLUXOS DE ENERGIA NO MEIO AMBIENTE

A fonte primária de energia que atinge a superfície terrestre é o sol que, em situações extremas pode forne

cer até 2,0 calorias por centímetro quadrado de superfície da terra, a cada minuto. Isto significa que, em um dia típico de verão, nas condições tropicais, cerca de 800 calorias serão fornecidas a cada centímetro quadrado de superfície podendo promover, em caso extremo, através da evaporação, o abaixamento do nível de água de um lago, ou qualquer superfície líquida, em cerca de 14 mm. No entanto, outros fatores diversos contribuem para que a energia em questão seja repartida entre outros fenômenos, já que, do total incidente, apenas parte é usada para a evaporação de água. Em condições normais, descontadas as frações refletidas e utilizadas em outros processos, cerca de 75% destinam-se a evaporação da água, ou seja, 5 a 7 milímetros ao dia, que equivale a 5 a 7 litros de água por metro quadrado de superfície.

## 2.1. Radiação Solar de Ondas Curtas

A energia emitida pelo sol, caminhando pelo espaço sob a forma de onda eletromagnética, tem como característica principal o seu comprimento de onda ( $L$ ), entre 380 e 3.000 nm, chamadas de ondas curtas (O.C.). Essa energia trafega sob a forma de fótons, ou pacotes de energia, a uma velocidade de  $3 \times 10^8$  m/s, com propriedades de partículas e de ondas propriamente ditas. Assim, os fótons são absorvidos ou emitidos pela matéria como resultados dos "saltos quânticos" dos elétrons em suas camadas ao redor do núcleo atômico. A energia ( $e$ ) transportada em cada fóton é representada pela lei de Planck que estabelece que  $e = h.c/L$ , onde  $h$  é a constante de Planck= $6,63 \times 10^{-34}$ . J.S. e  $L$  o comprimento da on

da. Assim, o fóton verde por exemplo, caracterizado por  $L = 500 \text{ nm}$  possui uma energia  $e = 6,63 \times 10^{-34} \cdot \text{J.S.} \times 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1} / 5,5 \times 10^{-7} \text{ m}$  ou seja,  $e = 3,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Sendo esta uma unidade muito pequena, convencionou-se utilizar como padrão de medida de energia o mol de fótons ou Einstein (E), que equivale a  $6,02 \times 10^{23}$  fótons (Número de Avogadro). Nesse caso,  $e = 3,6 \times 10^{-19} \text{ J} \times 6,02 \times 10^{23}$  fótons equivale à energia  $e = 2,2 \times 10^5 \text{ J/E}$ . Costuma-se representar ainda, como medida quantométrica, o fluxo de fótons e não a energia do mol.

Sabe-se que as plantas, de um modo geral, utilizam apenas a energia localizada entre 400 e 700 nm, que caracteriza a chamada Radiação Fotossinteticamente Ativa, ou mais comumente PAR, que corresponde a apenas uma fração - cerca de 45% - da energia na faixa de O.C. do sol. Nesse caso, considerando o comprimento de onda média de PAR ou seja, 510 nm, com energia  $e = 2,35 \times 10^5 \text{ J/E}$ , ao meio dia de um dia típico de verão, quando a densidade de fluxo de radiação  $RC = 500 \text{ watts/m}^2$ , verifica-se que o fluxo de fótons é da ordem de  $2,1 \times 10^{-3} \text{ E.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . No processo fotossintético, frações entre 60 e 90% dessa energia serão absorvidos pela clorofila e carotenóides, em função direta da absorção dos fótons pelos pigmentos (LOOMIS, 1965 e FEDERER & TANNER, 1966). As frações do azul e do vermelho são as mais absorvidas, sendo que o ultra-violeta (L menor que 400 nm) e infra-vermelho (L maior que 700 nm) não exercem praticamente nenhuma influência na fotossíntese. A teoria quântica mostra que a excitação de uma simples molécula de clorofila depende de um simples fóton de luz e que, embora o fóton azul tenha mais energia que o vermelho, ambos produzem a mesma quantidade de fo

tossintetizado, sendo o excesso de energia usado para aquecimento (FEDERER & TANNER, 1966).

Em um dia típico de céu claro, a energia solar recebida por uma superfície é da ordem de  $1,36 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$  ou  $950 \text{ w/m}^2$ . A faixa do PAR corresponde a cerca de  $1.800 \text{ } \mu\text{E/m}^2 \cdot \text{s}$  ou seja, aproximadamente  $399 \text{ w/m}^2$  ou cerca de 42% do total. Nesse caso, ocorre a relação média de  $1 \text{ w/m}^2 = 1,89 \text{ } \mu\text{E/m}^2 \cdot \text{s}$ .

O Quadro 1 mostra as relações existentes entre densidade de fluxo de energia, iluminação e PAR bem como as variações que ocorrem nas suas proporções, dependendo da fonte de emissão, podendo levar a uma incoerência no uso de unidades como o Lux ou Foot-candle em estudos de fisiologia vegetal, conforme mostrado por McCREE (1972).

## 2.2. Radiação Infra-Vermelho Termal (Ondas Longas)

Toda e qualquer superfície com temperatura superior ao zero absoluto emite energia com comprimento de onda inversamente proporcional à sua temperatura absoluta, de acordo com a lei de Wien ( $\lambda_{\text{máx}} = \text{constante}/T^{\text{OK}}$ ) e cujo valor é dado por  $R = e \cdot s \cdot T^4$ , onde  $e$  é o poder emissivo da superfície,  $s$  a constante de Stefan-Boltzmann e  $T$  a temperatura absoluta. A maioria das superfícies naturais apresenta valores de  $e$  entre 0,95 e 1,0, permitindo avaliar a radiação emitida apenas em função da quarta potência da temperatura absoluta. Essa energia, possui, na natureza, comprimento de onda entre 3 e 15 microns, com picos ao redor de 10 microns, sendo largamente absorvida pelo vapor de água e dióxido de carbono. Assim,

QUADRO 1 - Comparação entre valores da radiação solar global e fotossinteticamente ativa (PAR), iluminação e fluxo de fôtons e causas de erros de conversão entre unidades, quando se considera três tipos diferentes de fontes de emissão. A última coluna representa o fator de conversão de  $1,0 \text{ watt.m}^{-2}$  para o fluxo de fôtons equivalente a  $\mu\text{E.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

Fonte Energia	Radiometria $\text{Watts.m}^{-2}$	Fotometria Lux Proporção Rad / fot	PAR (400-700 nm)			Relação Radiom.
			Quantometria $\mu\text{E.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	Radiometria		Quantom. PAR
				$\text{W.m}^{-2}$	% OC	
Rad. Global Ô.C. Meio Dia-Pleno Sol	950	95.000 (1 : 100)	1.800	399	42	1,89
Rad. Difusa-Céu Meio Dia-Pleno Sol	72	9.000 (1 : 125)	200	45	63	2,78
Lampada Vapor Hg 400 W. Alta Pressão	153	24.000 (1 : 157)	350	78	52	2,29

supondo que a atmosfera terrestre não contivesse esses componentes, praticamente toda a energia emitida se perderia para o espaço, tornando as noites extremamente frias. Modernamente, alguns ecologistas querem acreditar que o aumento de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, pelo motivo acima, possa promover um aumento da temperatura da superfície terrestre, fato este no entanto impossível de ser detectado pelas séries termométricas históricas disponíveis.

### 2.3. Fluxos de Energia e Balanço de Radiação

A radiação solar de ondas curtas,  $R_{Co}$ , ao penetrar na atmosfera perde uma fração de seu total devido à reflexão pelas nuvens, pela superfície e pela própria atmosfera, chegando à superfície já atenuada -  $R_C$ . Parte de  $R_{Co}$  é espalhada ainda pelas moléculas dos gases atmosféricos, de acordo com a lei de Rayleigh, que estabelece que a eficiência de espalhamento é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda, resultando daí a cor azul do céu. A fração absorvida das ondas curtas promove o aquecimento das superfícies que, por sua vez, passam a reemitir de acordo com a quarta potência de sua temperatura e a perder energia por condução de calor para as camadas mais internas ou mais profundas.

Assim, com relação a ondas curtas, a superfície recebe as frações diretas do sol, refletidas e espalhadas pela atmosfera. Essa radiação pode ser refletida com maior ou menor intensidade, pela vegetação ou solo ( $R_{Cr}$ ), dependendo do albedo dessas superfícies (a).

Assim, do total  $RC_0$  que foi recebido pela terra, descontando-se a fração total refletida, a energia líquida resultante ( $RC_1$ ) é:

$$RC_1 = RC_0 - RC_r \quad (1)$$

A fração de ondas longas pode ser calculada em função das temperaturas das superfícies, em termos instantâneos (CAMPBELL, 1977) ou mais amplos (MONTEITH, 1973), de forma a resultar um valor líquido também para esse tipo de onda -  $RL_1$ . De um modo geral,  $RL_1$  é a diferença entre a energia emitida pela superfície ( $RL_s$ ) e recebida da atmosfera ( $RL_a$ ) em função de suas temperaturas. No caso,  $RL_a$  pode ser estimado de acordo com BRUNT (1932) ou outros autores (SWINBANK, 1963; MONTEITH, 1973). Assim:

$$RL_1 = RL_s - RL_a \quad (2)$$

Considerando os fluxos de ondas longas e de ondas curtas que ocorrem simultaneamente na superfície, pode-se estabelecer, de (1) e (2) que a radiação líquida ( $RI$ ) é dada por:

$$RI = RC_1 - RL_1 \quad (3)$$

Pode-se perceber assim que, durante a noite, quando  $RC_1$  inexistente, o valor de  $RI$  é negativo e as superfícies se resfriam mais do que o ar.

## 2.4. Balanço de Energia

A radiação líquida  $R_l$  expressa em (3) representa o saldo de energia existente em um determinado momento. Nesse caso, durante o dia, essa energia deverá ser utilizada pelos diversos processos físicos ou biológicos que ocorrem na terra, podendo se representar numericamente essa partição através da equação abaixo (GATES, 1963):

$$R_l = LE + H + G + P + M \quad (4)$$

onde LE representa o fluxo vapor de água (transpiração e evaporação), G o fluxo de calor para as camadas mais internas ou profundas das superfícies ou vice-versa, H o fluxo de calor sensível, M a energia metabólica e P a fração usada para a fotossíntese nos vegetais.

A maioria dos autores (KNOER & GAY, 1965; IDSO & BAKER, 1967; SEGUIN, 1986 e 1988; SELLERS, 1987), consideram os valores de P e M como não significativos ao Balanço Geral, desprezando-os para fins práticos.

No entanto, quando se considera especificamente o aspecto de utilização de energia para fotossíntese, cujo valor oscila entre 1 e 5% da energia líquida, essa fração precisa ser analisada com maior detalhe.

## 2.5. Absorção de Energia pelas Folhas e Fotossíntese

A produtividade das plantas, em condições hídricas satisfatórias, é ligada diretamente à fotossíntese que

tem como fatores limitantes a energia radiante, a quantidade de CO<sub>2</sub> e a temperatura.

A relação entre fotossíntese e energia solar deve ser analisada sempre sob o ponto de vista da fração energética que, seletivamente, é utilizada pelas plantas. Considerando a faixa típica que vai dos 300 aos 3.000 nm de comprimento de onda, vários autores adotam como fisiologicamente importante a fração compreendida entre 400 e 700 nm, chamada de Radiação Fotossinteticamente Ativa - PAR - (BRITTON & DODD, 1976; GATES, 1963 e 1970; LOOMIS, 1965; McCREE, 1972; ROSENBERG *et alii*, 1983). O PAR, dependendo das condições atmosféricas dominantes e da época do ano, pode apresentar variações quanto à sua proporção em relação ao total da radiação solar incidente, atingindo valores entre 44 e 58% (BRITTON & DODD, 1976).

Segundo LOOMIS (1965), do total de radiação incidente, as folhas vegetais normais absorvem cerca de 92% na faixa do azul - 400 a 500 nm -, 71% no verde - 500 a 600 nm - e 84% no vermelho - 600 a 700 nm.

Com a absorção da energia pelas folhas, ocorre uma tendência ao seu aquecimento, já que a maior parte dessa energia é dispensável à fotossíntese. Relativamente ao meio ambiente, a temperatura da folha pode atingir valores acima de 30°C de diferença, que, no entanto, podem ser atenuadas principalmente pela transpiração (GATES, 1963 e 1970) ou de cisivamente pela re-irradiação (LOOMIS, 1965) em processos paralelos e simultâneos, cuja interpretação ainda causa polêmica. Quando as folhas atingem temperaturas próximas a 40°C a fotossíntese diminui drasticamente, a respiração aumenta,

os estômatos se fecham e a transpiração é reduzida a níveis mínimos. Nesse caso pode-se discutir quanto à validade das afirmações, que consideram a transpiração vegetal como forma de redução da temperatura. Folhas praticamente estressadas por calor, desde que haja água suficiente, tenderiam a perder muito mais água para promoverem o resfriamento, mantendo os estômatos abertos e não fechados, como se verifica naturalmente.

IDSO & BAKER (1967), em experimentos de campo com milho e sorgo, observaram que a geometria das plantas, sua orientação no terreno e a posição das folhas promoviam produções diárias de fotossintetizados significativamente diferentes umas das outras. Assim por exemplo, folhas superiores, periféricas à planta, produziram em média taxas de fotossíntese de  $462 \text{ mg/dm}^2$  (milho) e  $548 \text{ mg/dm}^2$  (sorgo) ao passo que folhas inferiores, no interior da planta, produziram apenas  $92 \text{ mg/dm}^2$  (milho) e  $67 \text{ mg/dm}^2$  (sorgo). Os autores apresentam curvas características de taxas fotossintéticas -  $\text{mg CO}_2$  fixada por  $\text{dm}^2$  de área foliar por hora - em função dos tipos de folhas e sua posição no terreno.

Procurando estudar a influência da irradiância e da qualidade de radiação - azul, verde ou vermelho - no desenvolvimento de trigo e do rabanete, TIKHOMIROV & SID'KO (1982) verificaram que, em casos extremos, com irradiâncias superiores a  $300 \text{ w/m}^2$  (PAR) e ausência de luz azul (400 - 500 nm) ocorria a degenerescência da copa por destruição da clorofila. Os autores verificaram ainda variações significativas na taxa de fotossíntese com as folhas dispostas em camadas e submetidas a intensidades diferentes de radiação, nas

três faixas básicas. Valores extremos da ordem de 0,06 a 1,17 mg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.s foram observados nos diferentes tratamentos.

Deve-se observar que o potencial de produção de uma planta depende primeiramente da energia solar disponível, decaindo em função da nutrição e do balanço hídrico existente.

### 3. CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM BIOMASSA

A biomassa vegetal é acumulada através da conversão da energia solar, que alcança as folhas e outros órgãos fotossinteticamente ativos da planta, em carboidratos, via processo da fotossíntese.

Do espectro de energia solar de onda curta que atinge a superfície da terra, como visto acima, apenas a faixa de 400 a 700 nm é fotossinteticamente ativa e representa somente 40 a 50% do total de energia do espectro solar.

A redução de um mol de CO<sub>2</sub> para formar carboidratos requer cerca de 0,469 MJ de energia e, como um mol de fótons (Einstein-E) de energia na faixa fotossinteticamente ativa tem conteúdo de energia em torno de 0,172 MJ, seriam necessários três quanta de energia nesta faixa para reduzir uma molécula de CO<sub>2</sub>. Entretanto, grande número de experimentos têm evidenciado que, em geral, o requerimento quântico real das plantas situa-se entre oito e doze, podendo, como acontece com o milho, atingir até dezesseis (ROSENBERG *et alii*, 1983).

Analisando a taxa da conversão de energia em bio

massa, com base em valores de eficiência quântica, ou seja, da energia fixada através de reação química, LOOMIS & WILLIAMS, citados por ROSENBERG *et alii* (1983) estimaram a produtividade fotossintética máxima teórica admitindo: i) que em uma área que recebe  $20,9 \text{ MJ/m}^2$  de radiação solar por dia, a densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa seria de  $2,06 \mu\text{E/J}$  da radiação disponível e o requerimento quântico da fotossíntese seria cerca de 10 para esta faixa do espectro; ii) as perdas devidas à respiração representariam 33% da produtividade fotossintética bruta. Assim, calcularam uma produção potencial de  $71 \text{ g (CH}_2\text{O)/m}^2 \cdot \text{dia}$ , ou seja,  $3,3 \mu\text{g (CH}_2\text{O)/J}$  da radiação total incidente. Este nível de produtividade representa um armazenamento de compostos de carbono com um conteúdo energético de  $15,66 \text{ KJ/g}$ , ou cerca de 5,3% da energia solar total de um dia de incidência igual a  $20,9 \text{ MJ/m}^2$  e cerca de 12% da faixa fotossinteticamente ativa.

Grande discrepância existe entre os valores reais de conversão realizada pela fotossíntese e o potencial teórico de fixação. Em condições ótimas de clima e solo, plantas do tipo  $\text{C}_4$ , podem atingir uma eficiência fotossintética (EF) média da ordem de 5 a 6% (MACHADO, 1981). Eficiência Fotossintética é definida mais abaixo.

Os valores de eficiência fotossintética variam em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura. Assim é que, BISCOE *et alii*, citado por ROSENBERG *et alii* (1983), calculando a eficiência fotossintética de uma cultura de cevada em capturar a energia da faixa fotossinteticamente ativa, encontraram na fase inicial de desenvolvimento, eficiên

cia máxima em dias nublados, quando a irradiância era inferior a  $6 \text{ MJ/m}^2$ . Na maioria dos dias claros o sistema fotossintético da cevada saturou-se quando a eficiência atinge de 4-6% da faixa fotossinteticamente ativa. Na fase de maturação, com a redução de tecido fotossinteticamente ativo, a taxa de fotossíntese reduziu-se em dias claros, mas alcançou eficiência de cerca de 10% da faixa fotossinteticamente ativa, em dias nublados.

Em cana-de-açúcar, MACHADO (1981) encontrou eficiência fotossintética baixa - 0,4 e 0,9% - em relação, respectivamente à radiação solar global e à fotossinteticamente ativa no período inicial de cultivo (ao redor dos cem dias), enquanto que, aos 300 dias do plantio os valores aumentaram para 2,3 e 5,0% em relação à radiação solar global e à fotossinteticamente ativa, respectivamente, para em seguida, diminuir novamente.

Em termos gerais, as forrageiras de clima tropical e sub-tropical, exibem superioridade no potencial de produção de matéria seca sobre as forrageiras de clima temperado, devido não somente à sua maior eficiência fotossintética ( $70 \text{ mg CO}_2/\text{dm}^2.\text{h}$  contra 20 a  $30 \text{ mg CO}_2/\text{dm}^2.\text{h}$  das forrageiras de clima temperado), como também pela maior incidência de radiação nos trópicos e sub-trópicos em relação às zonas temperadas. A conversão do total de energia que incide nas regiões tropicais e sub-tropicais em produção de matéria seca, também é maior (5-6%) do que as obtidas nas regiões temperadas (2-3%) de acordo com COOPER (1970).

A taxa de crescimento - peso de matéria seca por unidade de área ocupada pelo terreno - também reflete a efi

ciência de conversão de energia solar em biomassa. Os Quadros 2 e 3 exibem valores de taxa de crescimento e de conversão de energia para diferentes espécies forrageiras.

#### 4. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM BIOMASSA

As técnicas de avaliação da conversão de energia solar em biomassa podem ser agrupadas em:

- a) análise quantitativa de crescimento
- b) modelagem
- c) sensoriamento remoto

- a) Análise quantitativa de crescimento

A análise de crescimento é um método para se estimar o incremento da produção de matéria pela planta, devido à fotossíntese. Permite também o estudo da distribuição dessa matéria pelas diversas partes da planta. O desenvolvimento de trabalhos nessa área exige que sejam determinados o uso da matéria seca total e a atividade fotossintética, em intervalos sequenciais de tempo.

MACHADO (1981), em estudos de análise de crescimento, utilizou diversos índices que podem ser calculados com base em dados experimentais de campo, tais como:

- i) taxa de crescimento da cultura - TCC - correspondente ao peso da matéria seca por unidade de área do terreno.

- ii) taxa de crescimento relativo ou o acúmulo de

QUADRO 2 - Valores da taxa de crescimento da cultura (TCC) e da produtividade líquida (PL) de matéria seca pela parte aérea de várias plantas em diferentes tipos de comunidades forrageiras, segundo LOWRENCE *et alii* (1984).

Espécie	Tipo	TCC ( $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ )		PL parte aérea $\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$
		Máxima	Média	
Capim Bermuda	C <sub>4</sub>	-	7,5	23-32
Capim elefante	C <sub>4</sub>	54	23,4	85
Azevém	C <sub>3</sub>	20	7,6	27-29
Alfafa	C <sub>3</sub>	-	7,8	28-29
Gramíneas Forrageiras	C <sub>3</sub>	16-43	6,0-13,2	21-23
Gramíneas Forrageiras	C <sub>4</sub>	39-52	7,4-23,4	25-85
Pastagens Nativas Norte	-	-	2,8	2,45
Pastagens Nativas Sul	-	-	0,9	0,20
Mandioca	C <sub>3</sub>	16	4,5	15-18
Cana-de-açúcar	C <sub>4</sub>	38	17,8	63-67
Cevada	C <sub>3</sub>	-	11,8	20
Milho	C <sub>4</sub>	52	18 - 23	38
Milheto	C <sub>4</sub>	54	19,6	28
Sorgo	C <sub>4</sub>	51	12 - 18	19
Soja	C <sub>3</sub>	27	6,7	11

QUADRO 3 - Valores de taxas máximas de crescimento e de conversão de energia em gramíneas forrageiras e outras espécies cultivadas (COOPER, 1970).

Local	Espécie	Taxa de Crescimento $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$	Radiação Incidente $\text{Ly}.\text{dia}^{-1}$	Radiação Convertida %
Reino Unido	<i>Lolium perenne</i>	16,6	290	5,4
	<i>Dactylis glomerata</i>	18,9	331	6,4
	Cevada	23,0	484	4,0
	Beterraba	31,00	294	9,5
Holanda	<i>Lolium perenne</i>	20,0	(450)	(4,2)
	Beterraba	20,6	(350)	(5,6)
	Cevada	17,7	(450)	(3,7)
	Trigo	17,5	(450)	(3,7)
	Milho	17,1	(350)	(4,6)
N. Zelândia	<i>Lolium perenne</i>	17,5	(480)	(3,4)
	Milho	29,2	(450)	(6,1)
	<i>Brassica oleracea</i>	15,7	(510)	(2,9)
	<i>Trifolium pratense</i>	23,1	(510)	(4,3)
EUA				
N. Hampshire	Milho	27,0	-	-
Nebraska	Milho	24,0	-	-
Ithaca, N.Y.	Milho	52,0	(500)	(9,8)
California	Milho	52,0	736	6,4
	Sorgo	51,0	690	6,7

peso de matéria seca por unidade do próprio peso das plantas.

iii) Índice de área foliar ou a área correspondente às folhas existentes, considerando-se uma face, por unidade de área do solo.

iv) taxa de assimilação líquida, que é a variação do peso da matéria seca por unidade de área foliar. Considera o material produzido pela fotossíntese menos o perdido pela respiração.

v) razão de área foliar dada pela relação entre a área foliar e o peso da matéria seca total.

vi) eficiência fotossintética ou a relação entre a energia acumulada pela matéria seca e a energia disponível, considerando um determinado período. De um modo geral, 1 grama de matéria seca equivale a 4.200 calorias. A eficiência fotossintética EF, em porcentagem, pode ser estimada por:

$$EF = \frac{TCC \cdot H \cdot 100}{I}$$

onde TCC é a taxa de crescimento da cultura, H o valor energético de 1 grama de matéria seca e I a densidade de fluxo de radiação solar.

#### b) Modelagem

Com os avanços observados na área de informática e nas técnicas de monitoramento de variáveis micrometeorológicas e fisiológicas ligadas à fotossíntese, vem aumentando a utilização de técnicas de simulação para avaliar a eficiência

cia de conversão de energia solar em biomassa, através do desenvolvimento de modelos, simples, como os baseados em equação de regressão com poucas variáveis, aos mais complexos, que são os modelos de simulação propriamente ditos.

Em termos de plantas forrageiras, desde há muito vêm sendo aplicadas técnicas de modelagem para tais fins. Assim é que PELTRIDGE (1970) desenvolveu um modelo de crescimento de pastagem baseado no conceito de valores limitantes onde considera que, a qualquer tempo e a um nível particular do dossel, o crescimento é determinado por um dos três parâmetros básicos - radiação disponível,  $CO_2$  disponível, ou a capacidade de folhas individuais em realizar a conversão fotossintética - e que são calculáveis de condições definidas acima da cultura e de parâmetros das plantas que foram selecionadas como independentes:

Para o milho BAKER & HORROCKS (1976) desenvolveram o modelo CORNMOD, que é um simulador dinâmico da produção dessa gramínea, capaz de simular trocas de energia e de gás na interface planta-ar, enquanto que STAPPER & ARKIN (1980) desenvolveram o modelo dinâmico de crescimento CORNF.

INN (1978) desenvolveu um modelo de simulação para pastagens nativas de gramíneas. PEAKE *et alii* (1979) desenvolveram, na Carolina do Sul, E.U.A., um modelo que simula alterações sazonais do peso seco de pasto em relação à transpiração.

SLABBERS, citado por DOORENBOS & KASSAM (1979) desenvolveu um modelo linear para a determinação de matéria seca em alfafa, milho, sorgo e trigo.

MACHADO (1981) e FUNCAMP (1984) apresentam mode

los matemático-fisiológicos para simular o acúmulo de matéria seca em cana-de-açúcar com base em análise de crescimento.

RAMBAL (1984) apresentou um modelo de simulação de crescimento de pastagens na Tunísia, ao passo que SIVAKUMAR & HUDA (1985) desenvolveram um modelo relacionando radiação solar, fenologia e produção sazonal de matéria seca de sorgo no ICRISAT, em região semi-árida da Índia, durante as estações chuvosa e pós-chuvosa.

SHARRATT *et alii* (1986) utilizou técnicas de análise de regressão múltipla para relacionar variáveis climáticas (radiação solar, precipitação pluviométrica e temperatura do ar) com a produção de matéria seca de alfafa. REDDY & TIMBERLAKE (1987) apresentaram um modelo simples de estimativa do potencial primário de produtividade de pasto em Moçambique.

### c) Sensoriamento remoto

Desde há longo tempo vem se tentando utilizar a técnica de sensoriamento remoto na estimativa da produtividade biológica de áreas cultivadas na superfície terrestre. No entanto, pode-se afirmar que até o momento, apesar do aparecimento de novas tecnologias, como processamento de imagens ou de novos equipamentos, nada foi conseguido a nível realmente aplicado. Mesmo o desenvolvimento de novos satélites de recursos naturais e meteorológicos, com geração de imagens de alta resolução, chegando a 10 metros na superfície, como o SPOT, permitiu definir, visualmente ou automaticamen

te a cobertura vegetal, de uma forma confiável. A grande parte desse tipo de atividade ainda fica por conta dos fotointerpretes, que utilizam aerofotos de alto custo financeiro e por isso mesmo não podem sofrer atualizações constantes.

Um dos trabalhos que pode ser considerado clássico nessa área foi publicado por COLWELL *et alii* (1970) como parte da obra Remote Sensing, onde o autor procurava, na época, mostrar o potencial da tecnologia para levantamento de produtividade agrícola. Centenas de trabalhos foram escritos ou apresentados em reuniões científicas onde se procurava atingir esse mesmo objetivo, ficando no entanto, restritos aos conceitos teóricos. Pode-se dizer que, com algumas exceções, ainda é impossível se distinguir culturas no campo, através de imagens de satélites, de uma maneira confiável.

No entanto, os trabalhos de pesquisas continuam a ser desenvolvidos de maneira contínua e, atualmente, com mais capacidade operacional, forçando os especialistas da área a serem mais pragmáticos e realistas.

LO *et alii* (1986), utilizando imagens Landsat MSS chegaram a resultados práticos ainda não muito diferentes dos obtidos por COLWELL *et alii* (1970), na área agrícola. SERRA FILHO *et alii* (1985), mostraram que um programa de informações sobre a cobertura vegetal pode ser perfeitamente desenvolvido com o uso de aerofotogrametria e computadores dirigidos a processamento de imagens. Nesse caso é possível um acompanhamento temporal dos diferentes tipos de cobertura.

A grande força dos trabalhos atuais está voltada ainda para o estudo do meio físico, como auxílio aos modelos de simulação de produção da biomassa. Os comunicados mais

recentes têm mostrado já melhores perspectivas no uso dessa tecnologia, principalmente na detecção dos fluxos energéticos na superfície. Assim, SEGUIN (1986) apresenta modelos para a estimativa dos fluxos térmicos e hídricos na superfície com o uso de informações provenientes de satélites meteorológicos. Posteriormente desenvolveu (SEGUIN, 1988) estudos no sentido de estimar índices de vegetação e rendimentos agrícolas, fazendo também um estudo detalhado dos trabalhos existentes sobre o assunto.

No entanto, quer parecer que um dos estudos mais completos sobre o assunto foi desenvolvido por SELLER & DORMAN (1987), propondo o chamado SiB ("Simple Biosphere Model") onde os autores mostram resultados de trabalhos intensivos realizados na Alemanha Ocidental e Estados Unidos da América com a finalidade de estimar parâmetros do balanço de energia e fluxos de água através de imagens de satélites, com vistas à determinação da produção de biomassa.

## **5. PERSPECTIVAS DE MAXIMIZAR A CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM BIOMASSA DE FORRAGEM**

Mesmo que sejam adequadamente disponíveis água e nutrientes, o potencial biológico de espécies forrageiras, tanto temperadas como tropicais, excede em muito os níveis vigentes de rendimento. Considere-se que, embora haja suficiente variabilidade genética que permita aos melhoristas aumentarem essa potencialidade, o que se observa ainda, em áreas ocupadas por espécies forrageiras, são valores de conversão de energia solar em biomassa muito aquém do potencial

de produção do material genético utilizado em diferentes ambientes.

A alteração desse quadro, visando maximizar as taxas de conversão de energia em biomassa é complexa e envolve uma análise detalhada e particularizada por parte dos setores interessados. As tomadas de decisão nesse sentido devem ser específicas, uma vez que envolvem considerações a respeito das condições climáticas, edáficas e sócio-econômicas, bem como a oferta atual de genótipos adaptados a tais condições.

Para compreender as estratégias a serem seguidas é importante atentar para os pontos que entravam essa conversão nas grandes zonas climáticas existentes na terra: em áreas tropicais úmidas, a oferta não limitante de energia solar e de água associada às temperaturas adequadas ao longo do ano, sugerem que a melhoria de rendimento deve ser buscada na seleção de genótipos com melhor performance em solos de baixa fertilidade química, predominantes nestas áreas (SERRÃO & TOLEDO, 1988), bem como através de manejo, voltado a melhor usufruir esta contínua oferta de energia e água.

Em áreas tropicais secas, o ponto limitante é a baixa oferta de água em períodos prolongados, sugerindo a necessidade de genótipos tolerantes à seca e práticas de manejo adequadas, como épocas e densidades apropriadas de plantio, épocas, intensidade e modalidade de corte ou de pastoreio, visando maximizar o uso da água, associado à maximização da conversão de energia solar.

Em regiões sub-tropicais a oferta de energia solar não é limitante, mas a temperatura baixa durante o inverno limita a produção, sugerindo a busca de genótipos resis

tentes ao frio e práticas de manejo adequadas às condições térmicas locais.

Em regiões temperadas, o potencial produtivo é limitado tanto pela baixa oferta de energia solar, como pela ocorrência de baixas temperaturas levando a sugerir a maximização da produção no período favorável ao crescimento e à seleção de genótipos, que pela resistência ao frio e boa performance em baixas intensidades de radiação, possam ser cultivadas em períodos críticos à maioria das espécies (COOPER, 1970).

Para facilitar a visualização dos aspectos abordados, as medidas a serem tomadas visando maximizar a conversão de energia em biomassa de forragem podem ser agrupadas da seguinte maneira:

- medidas voltadas a adequar espécies ou genótipos a condições do ambiente e
- medidas voltadas a adequar o manejo de áreas ocupadas por forrageiras.

No primeiro grupo enquadram-se os trabalhos na linha de zoneamento ou de regionalização de cultivos, ou seja, escolha de áreas adequadas a espécies ou genótipos e vice-versa, considerando fundamentalmente a adaptabilidade ao meio físico. São importantes os trabalhos de melhoramento genético visando adequar espécies a diferentes situações do ambiente e que condicionem arquitetura foliar que garanta maior interceptação de energia solar. Deve-se buscar características do aparelho fotossintético que garantam maior eficiência na conversão - redução da respiração por exemplo - ou características gerais de resistência a condições específi

cas do ambiente como seca, frio, encharcamento, toxicidade iônica, salinidade, etc. (COOPER, 1970; SIVAKUMAR & HUDA, 1985; BITTMAN & SIMPSON, 1987).

No segundo grupo enquadram-se medidas de manejo, tais como combinação de espécies, densidades da população de plantas, época de plantio, época e intensidade do corte ou de pastoreio (BEGG & JARVIS, 1968; WILLIAMS & JOSEPH, 1974; SHARRAT *et alii*, 1986 e 1987; BALAKRISHNAN *et alii*, 1987; BUNCE, 1988). Alguns trabalhos nesse sentido começaram a ser executados com a *Pueraria* ou Kudzu (PEREIRA NETTO, 1988) e com *Desmodium* (SIQUEIRA, 1989), através do estudo do comportamento eco-fisiológico dessas plantas, visando um possível plantio intercalar com a seringueira, que permita ao gado, durante períodos de menor disponibilidade alimentar, o seu uso sob a forma verde ou fenada.

## 6. LITERATURA CITADA

- BAKER, C.H. & HORROCKS, R.D. CORNMOD - A dynamic simulation of corn production. *Agricultural System*, 1:57-77, 1976.
- BALAKRISHNAN, K.; NATARAJARATNAM, N. & RAJENDRAN, C. Influence of sowing date on photosynthesis and production of *Cajanus cajan* (L.) Millsp. *Photosynthetic*, 21: 308-313, 1987.
- BEGG, J.E. & JARVIS, P.G. Photosynthesis in Townsville lucerne (*Stylosanthes humilis* H.B.K.), *Agric. Meteor.*, 5: 91-109, 1968.
- BITTMAN, S. & SIMPSON, J.E. Soil water deficit effect on Yield,

- leaf area and net assimilation rate of three grasses: Crested wheatgrass, smooth brome grass and altai wildrye. *Agron. J.*, 79: 768-774, 1987.
- BRITTON, C.M. & DODD, J.D. Relationship of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance *Agric. Meteorol.*, 17: 1-7, 1976.
- BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 58: 389-418, 1932.
- BUNCE, J.A. Mutual shading and photosynthetic capacity of exposed leaves of field grown soybeans. *Photosynthesis Res.*, 15: 75-83, 1988.
- CAMPBELL, G.S. *An introduction to environmental biophysics*. New York, Springer-Verlag, 1977. 159 p.
- CHURCH, D.C. & POND, W.G. *Basic animal nutrition and feeding*. Corvallis, O & B book, 1974. 300 p.
- COLWELL, R.N.; CARNEGIE, D.; CROXTON, R.; MANZER, F.; SIMONETT, D. & STEINER, D. Applications of remote sensing in agriculture and forestry. In: National Academy of Sciences, *Remote sensing with special reference to agriculture and forestry*. Washington, National Academy of Science, 1970. p. 164-223.
- COOPER, J.R. Potential production and energy conversion in temperate and tropical grasses. *Herbage Abstracts*, 40(1): 1-15, 1970.
- DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma, FAO, 1979. 212 p. (Es

- tudio FAO: Riege y Drengie, 33).
- FEDERER, C.A. & TANNER, C.B. Sensors for measuring light available for photosynthesis. *Ecology*, 47(4): 654 -657, 1966.
- FUNCAMP. *Sistema de simulação de crescimento e produtividade de cana-de-açúcar*. (Relatório final). Campinas, 1984. 128 p.
- GATES, D.M. The energy environment in which we live. *American Scientist*, 51(1): 327-348, 1963.
- GATES, D.M. Physical and physiological properties of plants. In: National Academy of Sciences. *Remote sensing with special reference to agriculture and forestry*. Washington, National Academy of Science, 1970. p. 224-252.
- HAVARD-DUCLOS, B. & COSTE, R. *Las plantas forrageras tropicales*. Madrid, Blume, 1967. 380 p. (Colección agricultura tropical).
- IDSO, S.B. & BAKER, D.G. Method for calculating the photosynthetic response of a crop to light intensity and leaf temperature by an energy flow analysis of the meteorological parameters. *Agron. J.*, 59: 13-21, 1967.
- INN, G.S. *Grassland simulation model*. New York, Springer-Verlag, 1978. 298 p. (Ecological studies, 26).
- KNOERR, K.R. & GAY, L.W. Tree leaf energy balance. *Ecology*, 46: 17-24, 1965.

- LO, H.C.; SCARPACE, F.L. & LILLESAND, T.M. Use of multi-temporal spectral profiles in agricultural land - cover classification. *PE & RS*, 52: 535-544, 1986.
- LOOMIS, W.E. Absorption of radiant energy by leaves. *Ecology*, 46: 14-17, 1965.
- LOWRENCE, R.; STINNER, B.R. & HOUSE, G.J. *Agricultural ecosystems unifying concepts*. New York, John Wiley & Sons, 1984. 233 p.
- MACHADO, E.C. *Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (Saccharum sp)*. Campinas, UNICAMP, 1981. 115 p. (Tese de mestrado).
- McCREE, K.J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, 10: 443-453, 1972.
- MONTEITH, J.L. *Principles of environmental physics*. London, Edward Arnold, 1973. 241 p.
- PEAKE, D.C.; HENZELL, E.F.; STIRK, G.B.; PEAKE, A. Simulation of changes in herbage biomass and drought response of a buffel grass (*Cenchrus ciliaries* cv, Biloela) in southern Queensland. *Agro-ecosyst.*, 5: 23-40, 1979.
- PELTRIDGE, G.W. A model of a growing pasture. *Agric. Meteorol.*, 7: 93-130, 1970.
- PEREIRA-NETO, A.B. de. *Comportamento fisio-ecológico de plantas de kudzu (Pueraria spp) no estado de S. Paulo: efeito da temperatura e da deficiência hídrica sobre a*

- assimilação do nitrato e balanço hídrico*. Campinas, UNICAMP. 1988. 117 p. (Tese de mestrado).
- RAMBAL, S. Un modèle de simulation du pâturage en Tunisie présaharienne. *Oecol. gener.*, 5(4): 351-364, 1984.
- REDDY, S.J. & TIMBERLAKE, J.R. A simple method for the estimation of potential primary pasture productivity over Mozambique. *Agric. For. meteorol.*, 39:335-349, 1987.
- ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L. & VERMA, S.B. *Microclimate the biological environment*. 2nd. ed. New York, John Wiley & Sons, 1983. 495 p.
- SEGUIN, B. *Aplicaciones de los satelites a la agrometeorología*. Ginebra, CMag., 1986. pp. 1-80.
- SEGUIN, B. *Determination of surface parameters and fluxes from satellite observations*. Trieste, ICTP, SMR / 293 - 32. 1988. 33 p.
- SELLER, P.J. & DORMAN, J.L. Testing the simple biosphere model (Si B) using point micrometeorological and biophysical data. *J. Climate Appl. Meteorol.*, 26(5):622-651. 1987.
- SERRA FILHO, R.; CAVALLI, A.C. & PINTO, H.S. Surveying and automatic mapping of São Paulo state, Brazil: A geographic information system with emphasis on land use. In: Asp Annual Meeting, 51, *Technical papers*, vol. 1, 1985. p. 229-236.
- SERRÃO, E.A. & TOLEDO, J.M. Sustaining pasture - based production systems for the humid tropics. In: Mab

- Conference on Conversion of Tropical Forest to Pasture in Latin America, Oaxaca, México. 1988, 47 p.
- SHARRATT, B.S.; BAKER, D.G. & SHEAFFER, C.C. Climatic effect on alfalfa dry matter production. Part I. Spring harvest. *Agric. For. Meteorol.*, 37: 123-131, 1986.
- SHARRATT, B.S.; BAKER, D.G. & SHEAFFER, C.C. Climatic effect on alfalfa production. Part II. Summer harvest. *Agric. For. Meteorol.*, 39: 121-129, 1987.
- SIQUEIRA, L.O.M. *Crescimento, propagação e floração de Desmodium barbatum*. Campinas, UNICAMP. 1989. 93 p. (Tese de mestrado).
- SIVAKUMAR, M.V.K. & HUDA, A.K.S. Solar energy utilization by tropical sorghums. *Agric. For. Meteorol.*, 36: 17-67, 1985.
- STAPPER, M.I. & ARKIN, G.F. CORNF: dynamics growth and development models for maize (*Zea mays* L.). Texas Agric. Exp. Station. Blackland Research Center. Temple, Texas. 1980.
- SWINBANK, W.C. Long-wave radiation from clear skies. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 89: 339-348, 1963.
- TIKHOMIROV, A.A. & SID'KO, F. Ya. Photosynthesis and structure of raddish and wheat canopies as acetate by radiation of different energy and spectral composition. *Photosynthetic*, 16(2): 191-195, 1982.