

ECOFISIOLOGIA E RELAÇÕES SOLO-ÁGUA-PLANTA NO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO¹

Napoleão Esberard de Macêdo Beltrão²

De acordo com informações bem recentes (Maltchik, 1997) cerca de 20% da população humana mundial, aproximadamente 1,0 bilhão de pessoas, vivem nas regiões semi-áridas e no Brasil são mais de 20 milhões de indivíduos que vivem no semi-árido nordestino. Segundo dados e registros da Embrapa-CPATSA (1990) o Nordeste brasileiro tem área de 1.556.001,1 km², correspondente a 18% do território nacional, sendo 75% desta área classificada como semi-árida e árida.

Da área total da região 19% tem aptidão para agricultura dependente das precipitações pluviais, 3% tem potencial de água e solo para irrigação o que corresponde a mais de 4 milhões de hectares de terras das classes I, II e III (classificação de uso agrícola) e 78% para exploração silvopastoril (Silva et al. 1988, Embrapa-CPATSA, 1990).

Com base nos levantamentos e estudos existentes, em especial da SUDENE, a região Nordeste, pode ser subdividida em seis sub-regiões, cada uma delas com características próprias. A diversificação é imensa, variando a precipitação pluvial, por exemplo, de apenas 286 mm/ano em Cabaceiras, PB até 4.253 mm/ano em Cândido Mendes, MA, sendo o semi-árido a maior das sub-regiões, com 900.500 km² ou seja, 90.050.000 ha, o que corresponde a 54% da área total da região, compreendendo 892 municípios dos nove Estados e uma densidade demográfica de cerca de 19 habitantes/km² (SUDENE, 1996).

Considerando os grandes desafios nacionais como o desemprego e as mega-tendências mundiais com a globalização, é importante que se forneça atenção ao setor primário, onde o estabelecimento de um emprego estável é bem menos custoso do que nos demais setores. Neste particular, são significativos os valores informados pelo MAARA (1994) quando é colocado que um emprego na agricultura é gerado com cerca de R\$ 5.000,00, enquanto na indústria ultrapassa os R\$ 80.000,00, além de ser na atualidade, a indústria cada vez mais automatizada. É importante, também, afirmar que 70% da população economicamente ativa da área rural, que corresponde a mais de 20% da força de trabalho nacional, vive da pequena produção rural e que 48% da população rural do Brasil está no Nordeste. É preciso que se estude a sub-região semi-árida de uma maneira global, e tendo cuidado especial com o setor rural. A agricultura e os agronegócios são os meios mais fáceis de se empregar pessoas, hoje um grande problema a nível mundial, mesmo nos países desenvolvidos, além da fome e de outros mega-problemas. Aqui no Brasil, e em especial no Nordeste, devido a problemas conjunturais, com a redução da área plantada com um único produto, *o algodão*, cerca de 2,5 milhões de pessoas ficaram desempregadas (Zandonadi, 1996). Para tal, conhecer parte das interações que são estabelecidas no sistema solo-planta-atmosfera (SSPA) é muito importante para se entender a funcionalidade dos processos e influenciar positivamente na capacidade de produção das culturas, com lucratividade e sustentabilidade global.

Desta forma, objetivou-se com este trabalho de revisão, se aglutinar algumas informações sobre o SSPA, visando contribuir para o conhecimento da ecofisiologia das nossas culturas inseridas no contexto do semi-árido nordestino.

¹ Conferência apresentada no XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola UFPb. Campina Grande, PB. 21 a 25 de julho de 1997

² Pesquisador III e atual Chefe Geral da Embrapa-Algodão, Rua Osvaldo Cruz, 1143, Centenário, 58107-720 - Campina Grande, PB

CARACTERIZAÇÃO DO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO

Segundo Duque (1973) as condições de aridez de muitas regiões do mundo, tem sido estudadas, por diversos especialistas sob os aspectos meteorológico e fisiográfico.

Com referência ao clima, o semi-árido é caracterizado pelo **balanço hídrico negativo**, resultante, segundo os técnicos da SUDENE (1996) de precipitações médias anuais inferiores a 800 mm, insolação média de 2800 h/ano, temperaturas médias anuais de 23°C a 27°C, evaporação de 2000 mm/ano e umidade relativa do ar média em torno de 50%. Em várias regiões fisiográficas do semi-árido, como é o caso do Seridó, onde não há orvalho, o índice de aridez é de 3,3 e a temperatura média das máximas atinge 33°C, com baixa umidade relativa do ar durante quase todo ano, com estação de cultivo curta e mais de 60% das chuvas do ano ocorrem em 3 a 4 meses, o potencial hídrico do ar (ψ_{war}) ditado pela fórmula

$$Y_{war} = \frac{RT}{\nabla_w} \ln \frac{(UR\%)}{100}, \text{ onde } R = \text{constante dos gases perfeitos (1,987 cal/mole}^{-\circ}\text{K)}, T \text{ é a}$$

temperatura absoluta (273 + °C), ∇_w é o volume molar parcial da água (18,048 cm³/mole a 20°C) e UR% é a umidade relativa do ar, atinge valores tão baixos quanto -1500 bars, especialmente nos meses mais secos e quentes como outubro e novembro, caracterizando a elevadíssima demanda evaporativa do ar reinante na região semi-árida, o que estabelece um gradiente do potencial hídrico bastante elevado no SSPA. Em vários municípios pertencentes ao semi-árido nordestino, como por exemplo Cruzeta, RN e Cabrobó, PE, em nenhum mês do ano há sobra de água e nem umedecimento do solo, sendo que a deficiência de água no solo é quase uma constante. Há regiões fisiográficas, como o Sertão, que segundo Duque (1973) ocupa área de 69.827,5 km², sem considerar o Sertão Central do Estado do Ceará, onde a insolação anual chega a 3400 horas, a evaporação maior do que 2200 mm e a temperatura máxima, diurna, em dezembro e janeiro atinge valores de até 37°C. Do ponto de vista de solos, existe uma grande diversidade, no semi-árido predominando, no entanto, solos rasos e com baixa capacidade de infiltração de água. No Estado do Piauí os principais na região semi-árida são os Litólicos, as Areias Quartzosas e os Bruno Não Cálcidos. No Ceará os Bruno Não Cálcidos representam cerca de 17,9% da superfície do Estado, os Litólicos cerca de 18,7% e as Areias Quartzosas 8,9%, o que de maneira geral ocorre nos demais Estados que têm áreas no polígono das secas. Em todos os Estados ocorrem solos aluviais (Embrapa, 1989), que junto com outros tipos, podem ser utilizados para irrigação, dependendo, logicamente da quantidade de água disponível e de sua qualidade. No semi-árido o regime térmico do solo é do tipo isoipertérmico, com média anual superior a 22°C e a diferença entre os meses frios e quentes é menor do que 5°C. (Resende et al. 1988). Na superfície do solo na região do Seridó, a temperatura, nos meses mais quentes, chega a ser superior a 65°C e no Sertão, como em Sousa, na Paraíba, chega a 50°C. Um dos grandes problemas do semi-árido é a capacidade de erodibilidade dos solos que é alta e com o uso de implementos agrícolas inadequados, como o caso de grades aradoras pesadas parte significativa já tem problemas de compactação, com adensamentos, que elevam a densidade aparente do meio edáfico, promovendo redução da porosidade de areação, levando às plantas a deficiência de oxigênio nas raízes com profundos reflexos no crescimento e no desenvolvimento vegetal e por conseqüência na capacidade de produção. HAAG (1987) estima que na América tropical cerca de 35% dos solos estão com problemas de compactação.

PROBLEMAS E RELAÇÕES ECOFISIOLÓGICAS NO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO

Como em todas regiões consideradas semi-áridas do mundo, um dos principais problemas e limitante da produção é a água, devido a não somente a quantidade precipitada, mas, também a distribuição irregular, coadjuvada pela elevada demanda evaporativa do ar e baixa capacidade de armazenamento de água no solo, o que promove modificações profundas nos fitossistemas eucarióticos cultivados, refletindo negativamente nas produtividades obtidas, nos índices de colheitas e nos escores de produtividade, (soma da produtividade econômica, produtividade biológica e o coeficiente de migração da cultura), seguindo conceitos emitidos por Stoskopf (1981). Em função da deficiência de água no SSPA e também da elevada temperatura que ocorre normalmente nas regiões semi-áridas, a temperatura das plantas, aumentam, pois a água é o grande "tampão" térmico dos ecossistemas e agroecossistemas, devido a suas propriedades singulares, em especial o elevado calor de vaporização (Nobel 1974) e também em função das espermatófitas serem organismos *poiquilotérmicos*, ou seja apresentam a temperatura de cada um de seus órgãos próximo da temperatura do ambiente, não tendo mecanismos de regulação interna (*euritermia*), como é colocado por Larcher (1975) e Paulsen (1994).

Na verdade, nas relações solo-planta-atmosfera ocorrem interações de todos os níveis, várias delas desconhecidas, com base nos *princípios mesológicos*, em especial a lei do mínimo formulada por *Liebig* no século XVIII para os nutrientes minerais e ampliada por *Taylor* no início deste século e o *holocenotismo do ambiente*, em que se verifica que não há barreiras entre os fatores do meio, um modificando-se, vários outros se modificarão e as plantas reagirão alterando nas reações metabólicas. Na Figura 1, pode ser observado como são complexas as relações com a água que ocorrem no SSPA para a definição da produtividade econômica dos cultivos. Praticamente todos os processos vitais da planta somente ocorrem em meio aquoso, sendo a água o solvente universal e a *única substância* que é *reagente* e *produto* de uma mesma reação, que é a *fotossíntese* ou assimilação clorofiliana, onde substâncias simples de baixo nível de organização H_2O e CO_2 são transformados em substâncias orgânicas de elevado nível de energia, como *proteínas, açúcares e lipídeos simples e complexos*. É importante nas condições de semi-aridez aplicar técnicas que evitem a não utilização dos fatores de produção fora do processo produtivo (relações fonte/dreno), canalizadas para a produção econômica, aqui definida do ponto de vista ecofisiológico, como sendo a parte útil da planta do ponto de vista comercial. Um aspecto de suma importância na atualidade é usar o máximo possível dos conceitos de *sustentabilidade* como pode ser verificado na Figura 2, onde deve-se reduzir o uso de insumos industriais, principalmente pesticidas. No semi-árido, devido as condições do clima, os problemas com as pragas e doenças são bem menores do que os verificados nas regiões onde chove mais e a temperatura do ar é mais baixa e a umidade do ar é maior. Tendo a água como elemento escasso e conseqüentemente limitante da produção, vários problemas ocorre no metabolismo celular, a começar pelo crescimento, aqui colocado como o aumento irreversível de fitomassa e função do *alongamento celular* [depende de dois componentes: a pressão de turgor e o ácido indolilacético (IAA)] e da *multiplicação celular*, até a fotossíntese, a síntese protéica e a respiração oxidativa ou mitocondrial, além de vários outros aspectos do anabolismo e do catabolismo vegetal, reduzindo a carga de energia e assim a quantidade de ATP em circulação na planta, ou seja, a moeda energética da célula, o *trifosfato de adenosina*. Como diz o pesquisador Arnon (1984) nas regiões áridas e semi-áridas são verificadas as maiores temperaturas do mundo e isto traz conseqüências enormes para os agroecossistemas tropicais, em especial os com *deficiência hídrica crônica*. Como a fotossíntese e a respiração, que representam respectivamente a *produção* e a *perda* de *matéria seca* (fitomassa) dos

fitossistemas apresentam **pontos de compensação térmicos** diferentes, aliado a **fotorrespiração** das plantas de metabolismo fotossintético C₃ que aumenta com o incremento da temperatura, a produção líquida é diminuída, ou seja a fotossíntese aparente, líquida ou o saldo fotossintético. Com a elevação da temperatura a respiração aumenta mais do que a fotossíntese, reduzindo a **taxa de assimilação líquida** da comunidade vegetal, que é ao lado do **índice de área foliar**, os dois componentes que definem a taxa de crescimento da cultura, ou produtividade ou ainda o incremento médio diário de fitomassa, expresso pela fórmula

$$C = \int_{t_1}^{t_2} c' dt = \frac{1}{P(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dw}{dt} dt = \frac{w_2 - w_1}{P(t_2 - t_1)} \text{ (g / m}^2 \text{ de solo / dia)}, \text{ que no máximo atinge 77 g}$$

de fitomassa/m² de solo/dia (Loomis & Williams 1963). No semi-árido, sem irrigação, e consequentemente com alguma limitação hídrica, a taxa de crescimento da cultura atinge valores bem menores, variando de 4 a 25 g/m²/dia, dependendo da cultura, estágio do desenvolvimento e condições de cultivo, incluindo os aspectos nutricionais. Na equação de **C** anteriormente colocada **t** é o tempo **em dias**, **P** é a área do solo ocupada pela cultura e **W** é a fitomassa produzida. A consequência da defasagem entre a fotossíntese e a respiração devido

ao aumento da temperatura é a alteração do coeficiente fotossintético $\left(Kf = \frac{F_B}{R} = \frac{F_e}{R} + Rd \right)$

onde F_B é a fotossíntese bruta, F_I é a fotossíntese líquida, **R** é a respiração total (oxidativa + fotorrespiração) e Rd é a respiração mitocondrial. Com os problemas ocasionados pelo aumento da temperatura, associado a deficiência da água, a tendência é a redução significativa do coeficiente fotossintético. Quando o Kf atingir o valor 2, significa que metade do que foi produzido foi respirado, o que é aproximadamente o que ocorre na nossa condição, diferente das regiões tropicais que a respiração representa cerca de 1/3 da fotossíntese (Loomis e Williams 1963). Apenas para se ter uma idéia do valor do K_p, o **plancton marinho** tem normalmente coeficiente fotossintético próximo de **10**. Com a elevação da temperatura e o conseqüente aumento da "renovação" celular, ocorre dificuldade de absorção de água pela planta e é reduzida a sububilidade do oxigênio, um dos **mega-nutrientes** das plantas ao lado do carbono e do hidrogênio, quando, por paradoxal que parece aumenta a demanda pelo oxigênio, devido ao incremento do processo respiratório mitocondrial.

Por outro lado, com elevadas temperaturas e alta radiação solar a taxa de fotorrespiração das plantas de metabolismo C₃, que é a maioria, aumenta substancialmente, reduzindo ainda mais o saldo fotossintético, alterando pelo menos, a capacidade de produção dos cultivos.

No ambiente semi-árido a natureza desenvolveu mecanismos fotossintéticos de sobrevivência e produção tais como o **metabolismo ácido crassuláceo** (CAM) e o C₄, altamente produtivo, com elevada eficiência no uso da água (Arnon 1984 E Brown 1994). O CAM é uma rota alternativa de elevado nível de evolução que algumas espécies de várias famílias botânicas, tais como **agavaceae**, **crassulaceae**, **cactaceae**, **bromeliaceae** etc, adquiriram para sobreviver em ambientes **xéricos** e **oligotrópicos**, comuns nas regiões semi-áridas. Tais plantas para não perderem água durante o dia, via processo transpiratório, fecham os estômatos e a noite acumulam o CO₂ em ácidos orgânicos, em especial o málico, abrindo os estômatos. Além disso, possuem os estômatos em criptas (cavidades) que representa mais uma **resistência**, e **alta**, para evitar a **perda de água**. Na Figura 3, pode ser visualizado todo mecanismo fotossintético que ocorre nas folhas do sisal, uma das poucas plantas cultivadas que apresenta o CAM, ao lado do abacaxi. Nas Figuras 4 e 5 com diversos aumentos podem ser observados os estômatos das folhas do sisal, especialmente nos aumentos de 500 e 1000 vezes onde podem ser verificadas as criptas.

Além da adaptação fisiológica e morfológica externa, ocorre em plantas de metabolismo CAM o aumento substancial do parênquima esponjoso foliar, como pode ser visto na Figura 6, o que se constitui em um importante "reservatório" de água. Já as plantas C₄ são de elevada eficiência no uso do CO₂ e da água (Brown, 1994) sendo um mecanismo extremamente importante em ambientes com **estresses múltiplos** como ocorre no semi-árido. Elas não apresentam fotorrespiração detectável e produzem muito mais matéria seca por unidade de água transpirada. Neste particular é importante a equação idealizada por Passioura (1994) em que a produtividade de uma cultura é função da **água transpirada**, do **uso eficiente da água** e do **índice de colheita**. O importante para a produção máxima, econômica e sustentável no semi-árido é o entendimento das relações ecofisiológicas que ocorrem nos agroecossistemas, associado a identificação dos fatores limitantes da produção, manipuláveis. Na Figura 7, pode ser observadas as relações que são estabelecidas nos agroecossistemas para a definição da produtividade de uma determinada cultura (Hearn 1976). No manejo dos agroecossistemas do semi-árido, em especial de sequeiro, é importante que várias medidas sejam tomadas para evitar maiores reduções nos índices de produtividades obtidas. Entre elas, destacam-se: **espaçamentos mais abertos**, com populações de plantas menores, visando reduzir a perda de água pois a maioria da água que passa via evapotranspiração, é no processo transpiratório, **eficiente controle das plantas daninhas**, **rotação cultural**, **pousio**, **sistemas policulturais** (consórcio), entre outros. Quando tem-se restrição de água no agroecossistema tropical, semi-árido tem-se que ter um índice de área foliar pequeno, no máximo de 2 para culturas planofilares, com coeficiente de extinção da luz igual ou maior que 1, como é o caso do algodoeiro, pois caso contrário, ou seja, se for superior a 3,5, os substratos orgânicos (assimilados) disponíveis para os drenos úteis (frutos, no caso), ficam negativos, ou seja insuficientes, e assim aumenta a queda das estruturas de reprodução, e consequentemente, redução da produtividade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os agroecossistemas tropicais, da região semi-árida nordestina podem ser mais produtivos, mais sustentáveis e assim lucrativos, tanto na condição de precipitação natural (sequeiro), quanto em condições de irrigação, onde a água, fator limitante da produção, pode ser controlado. Para se alcançar tais objetivos é necessário que se conheça o mínimo da **funcionalidade** do sistema solo, planta, atmosfera (SSPA), em termos do uso efetivo da água e dos **demais fatores de produção**, incluindo **fertilizantes** (orgânicos e inorgânicos), **protetores biológicos**, **uso racional de pesticidas** e **manejo cultural**, elemento global, chave para o sucesso da exploração agrícola.

A agricultura no semi-árido em termos de eficiência cultural é uma das mais eficientes do mundo, com índices superiores aos colocados por Spedding et al. (1981), como no caso do algodoeiro arbóreo cultivado na região do Seridó da Paraíba e do Rio Grande do Norte, que pode atingir valores superiores a 20, ou seja, de cada unidade de energia colocada no sistema, 20 unidades são retiradas. Há culturas no mundo, como por exemplo, a beterraba, em alguns sistemas de cultivo que este valor é menor do que 1.

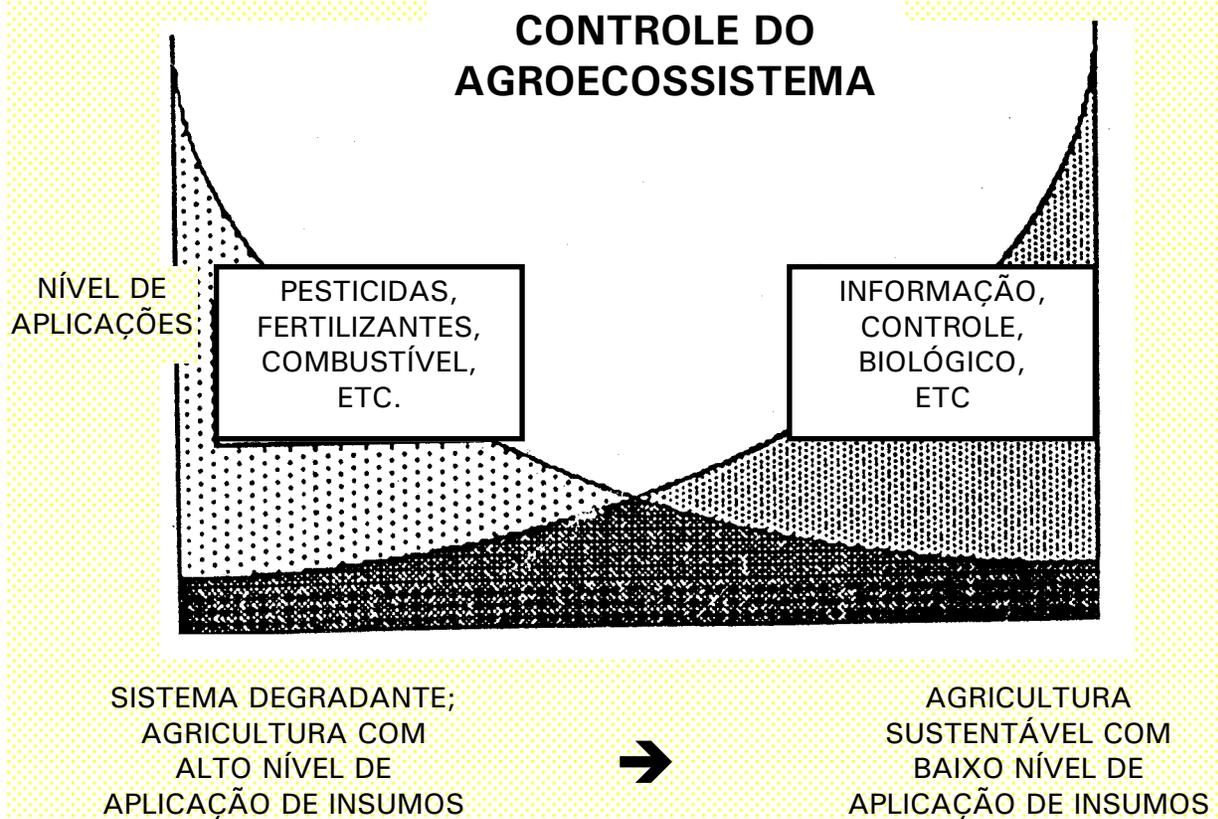


FIGURA 2. O conceito de agricultura sustentável
FONTE: Stinner et al. (1987)

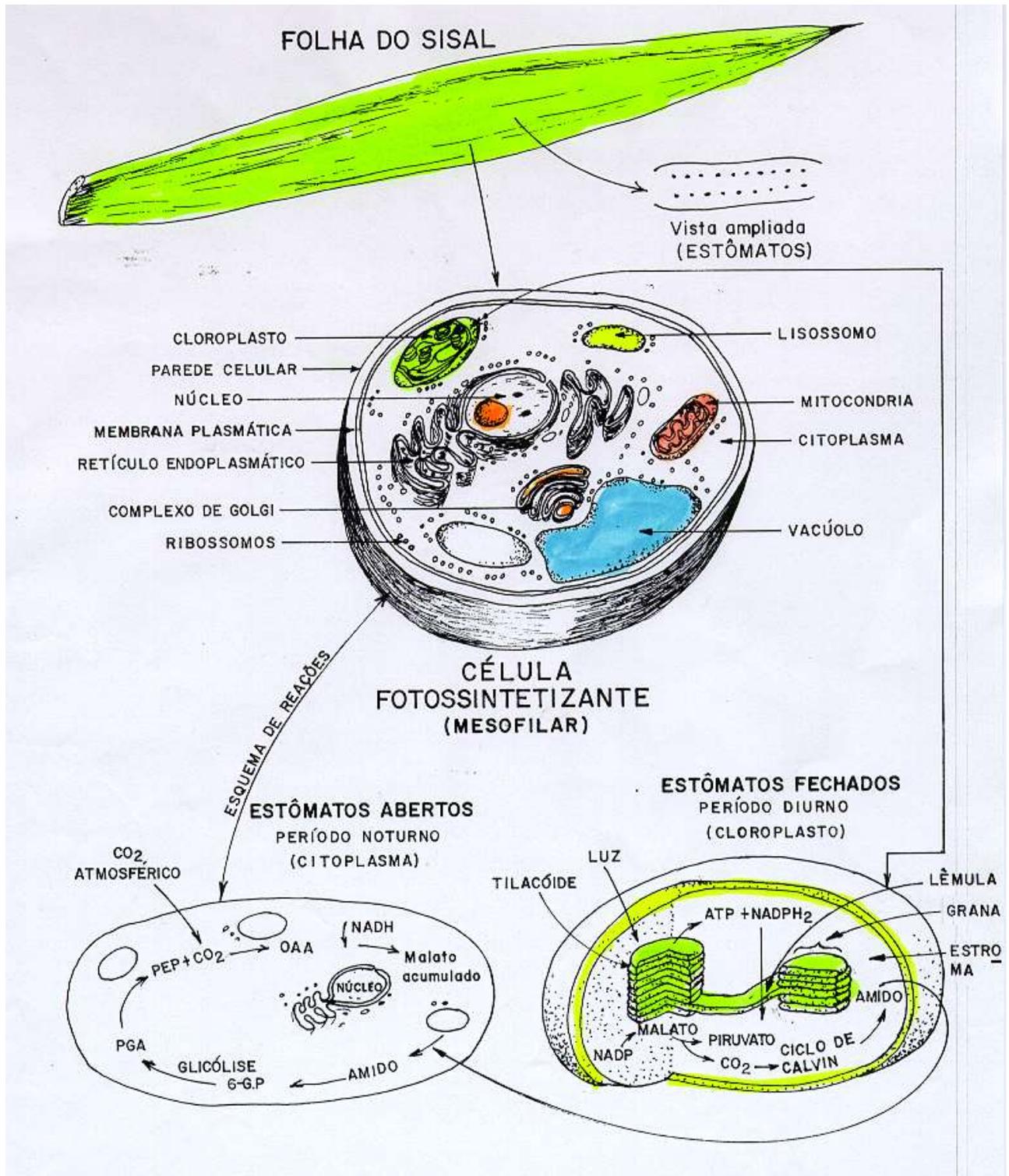


FIGURA 3. Esquema simplificado do metabolismo ácido crassuláceo (CAM) da fotossíntese que ocorre na planta do SISAL.

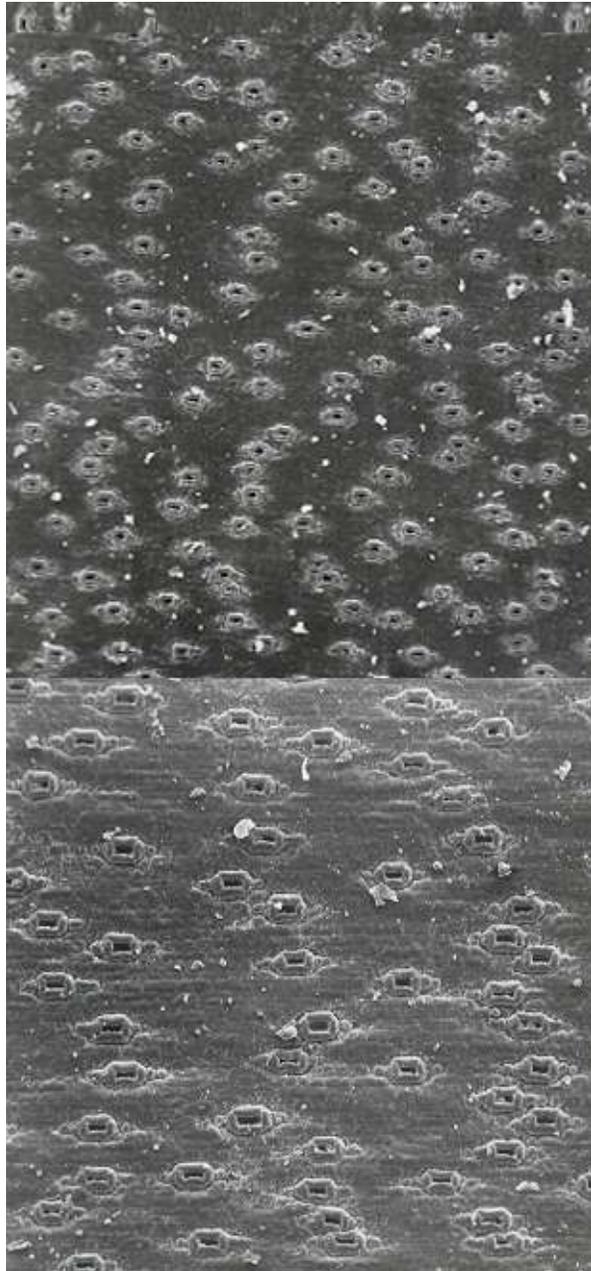


FIGURA 4. Estômatos das folhas do sisal, aumentados de 50 e 100 vezes

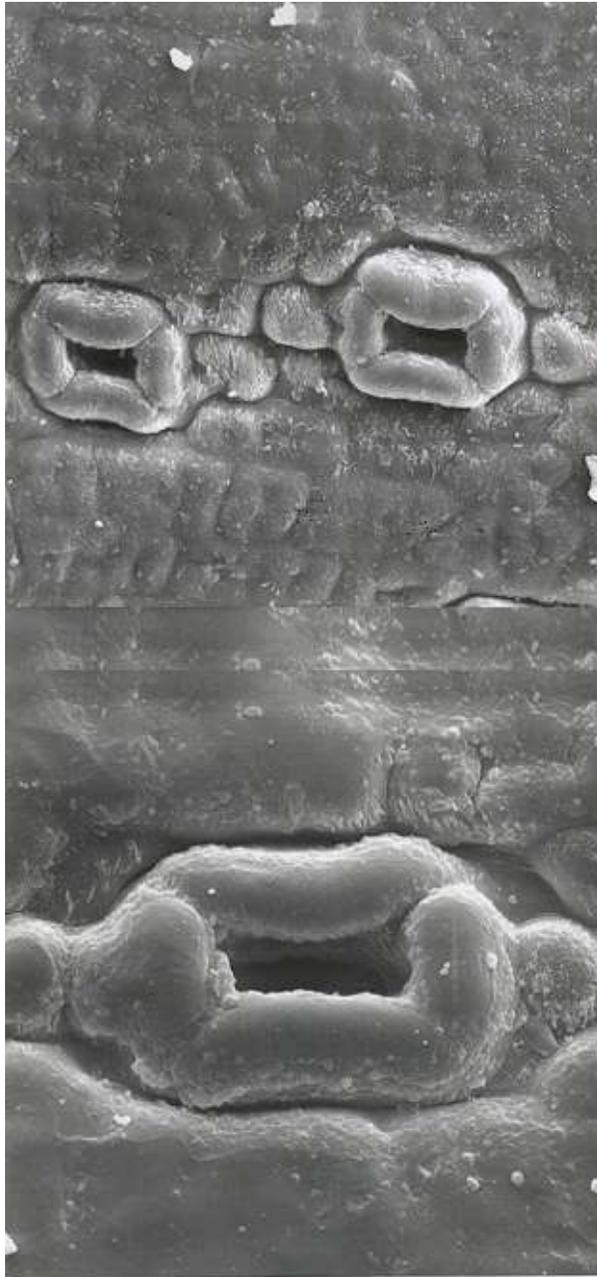


FIGURA 5. Estômatos das folhas do sisal aumentados de 500 e 1000 vezes

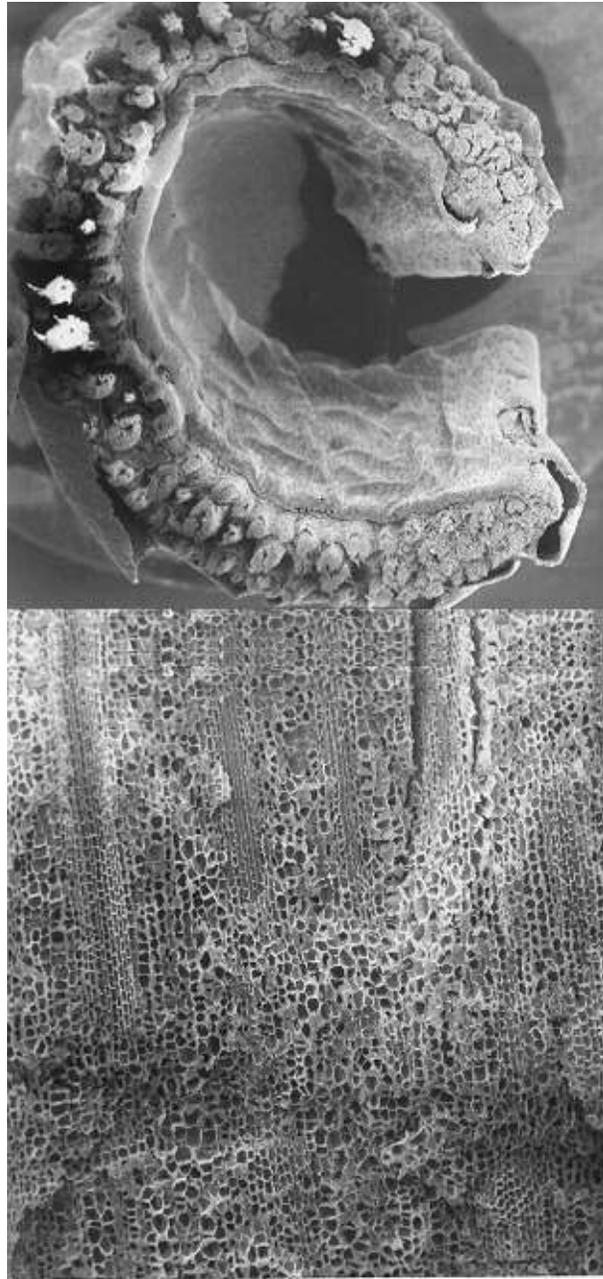


FIGURA 6. Folha do sisal anatomia geral

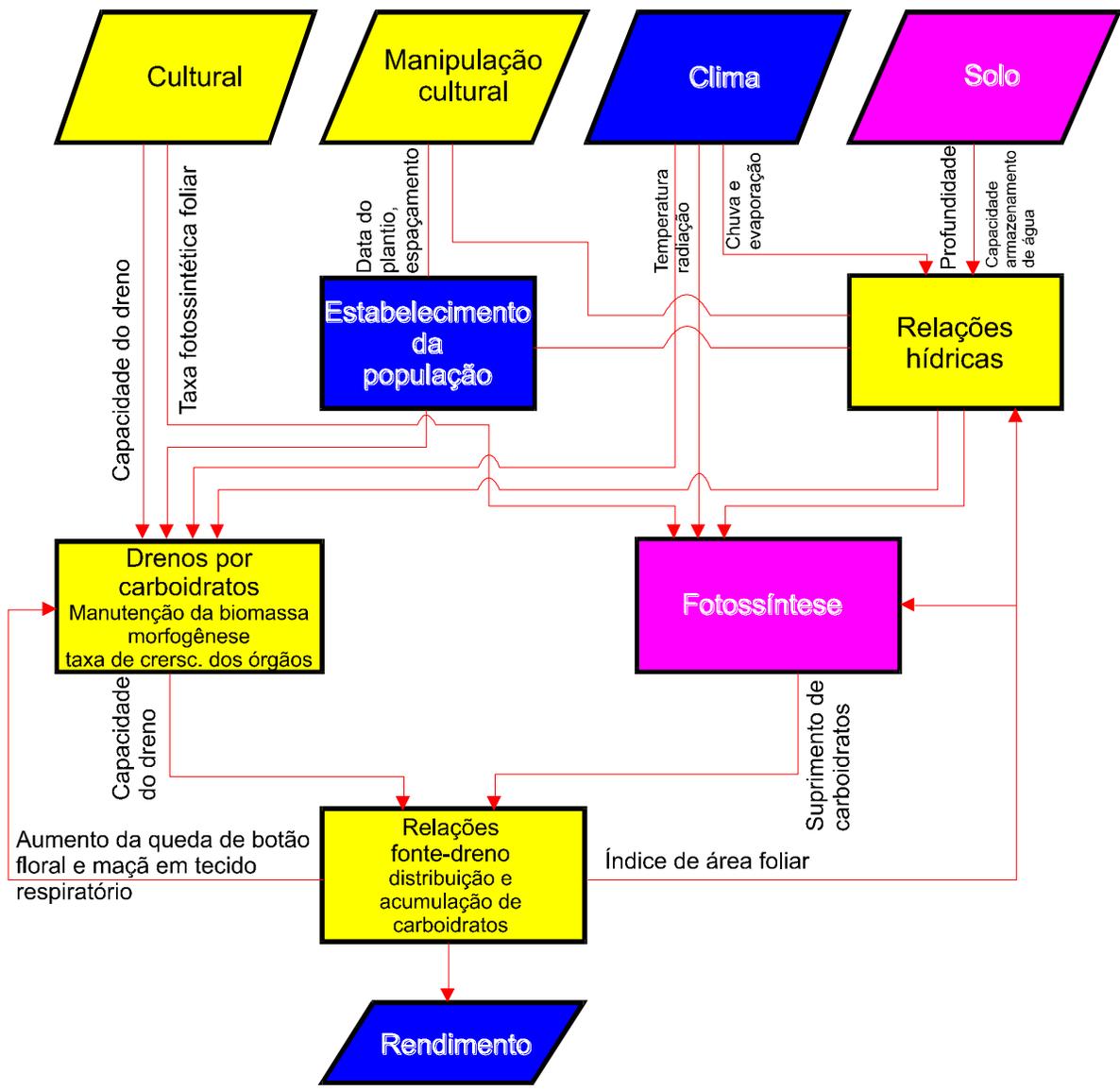


FIGURA 7. Relações entre os componentes que vão fornecer o rendimento da cultura

FONTE: Henn (1976), modificada pelo autor

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNON, I. Physiological principles of dryland crop production. In: GUPTA, U.S. ed. ***Physiological aspects of dryland farming***. New Delhi, India: Oxford & IBH, 1984. p. 3-145
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Abastecimento e Reforma Agrária (Brasília, DF). ***Propostas e recomendações de política agrícola diferenciada para o pequeno produtor rural***. Brasília: 1994. 37p. (Relatório da Comissão Técnica MAARA x CONTAG).
- BROWN, R.H. The conservative nature of crop photosynthesis and the implications of carbon dioxide fixation pathways. In: BOOTE, K.J.; BENNETT, J.M.; SINCLAIR, T.R.; PAULSEN, G.M. eds. ***Physiology and determination of crop yield***. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1994. p. 211-219.
- DUQUE, G. ***O Nordeste e as lavouras xerófilas***. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 1973. 238p.
- EMBRAPA (Brasília, DF) ***Diagnóstico e prioridades de pesquisa em agricultura irrigada Região Nordeste***. Brasília: EMBRAPA-DPL, 1989. 526p. (EMBRAPA-DPL. Documentos, 9).
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (Petrolina, PE). ***Relatório técnico anual. 1979-1990***. Petrolina:, 1993. 175p.
- HAAG, H.P. A nutrição mineral e o ecossistema. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. eds. ***Ecofisiologia da produção agrícola***.
- HEARN, A.B. Crop physiology. In: ARNOLD, M.H. ed. ***Agricultural research for development: the namulonge contribuiton***. London, England: Cambridge University Press, 1976. p. 76-122.
- LARCHER, W. ***Physiological plant ecology***. New York: Springer-Verlag, 1975. 251p.
- LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A. Maximum crop productivity: An estimate. ***Crop Science***, v.3, p. 67-72, 1963.
- MALTCHIK, L. Transposição ou política regional de águas? ***Jornal Correio da Paraíba***, João Pessoa, Milenium 3.23 março 1997.
- NOBEL, P.S. ***Introduction to biophysical plant physiology***. San Francisco, Califórnia: W.H. Freeman, 1974. 488p.
- PASSIOURA, J.B. The yield of crops in relation to drought. In: BOOTE, K.J.; BENNETT, J.M.; SINCLAIR, T.R.; PAULSEN, G.M. eds. ***Physiology and determination of crop yield***. Madison, Wisconsin: american Society of Agronomy, 19... p. 343-359.
- PAULSEN, G.M. High temperature responses of crop plants. In: BOOTE, K.J.; BENNETT, J.M.; SINCLAIR, T.R.; PAULSEN, G.M. eds. ***Physiology and determination of crop yield***. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1994. p. 365-389.

- RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D.P. ***Pedologia e fertilidade do solo: Interações e aplicações***. Brasília: MEC/ESAL/POTAFOS, 1988. 83p.
- SILVA, M.J. da; BELTRÃO, N.E. de M.; SANTOS, E.O. dos. ***Perspectivas da irrigação na cultura algodoeira no Nordeste brasileiro***. Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, 1988. 28p. (EMBRAPA-CNPA: Documentos, 35).
- SPEEDING, C.R.W.; WALSINGHAM, J.M.; HOXEY, A.M. ***Biological efficiency in agriculture***. London: Academic Press, 1981. 383p.
- STINNER, B.R.; HOUSE, G.J. Role of ecology in lower-input, sustainable agriculture: An introduction ***American Journal of Alternative Agriculture***, v. 2, n. 4, p. 146, 1987.
- STOSKOPF, N.C. ***Understanding crop production***. Reston, Virginia: Reston Publishing, 1981. 433p.
- SUDENE. ***Pacto Nordeste: ações estratégicas para um salto do desenvolvimento regional***. Recife: SUDENE, 1996. 77p.
- ZANDONADI, R. ***Fundamentos técnicos para o diagnóstico da agricultura brasileira***. Brasília: CNA, 1996. 142p.