

TABELA DE POTENCIAL OSMÓTICO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE POLIETILENO GLICOL 6.000 E DA TEMPERATURA¹

FRANCISCO AMARAL VILLELA², LUIZ DONI FILHO³ e ELISEO LECLERC SEQUEIRA⁴

RESUMO - Um expressivo número de pesquisas vem sendo desenvolvido na área de pré-condicionamento em sementes. Na busca de contribuir com os técnicos envolvidos em pesquisas nesta área, procurou-se através da inter-relação entre a Termodinâmica e a Tecnologia de Sementes caracterizar potenciais hídrico, osmótico, mátrico e de pressão e, a partir do trabalho de Michel & Kaufmann (1973), construir uma tabela associando potencial osmótico, concentração de polietileno glicol 6000 e temperatura.

Termos para indexação: pré-condicionamento, sementes, termodinâmica, potencial hídrico.

TABLE OF OSMOTIC POTENTIAL AS A FUNCTION OF POLYETHYLENE GLYCOL 6000 CONCENTRATION AND TEMPERATURE

ABSTRACT - A wide number of research work has been developed in the seed preconditioning area. In order to contribute with the application of the needed techniques, hydric, osmotic, matric and pressure potentials were pointed out with the interrelation of Thermodynamics and Seed Technology. Then, based on Michel & Kaufmann's (1973) work, a table was made relationing osmotic potential and temperature with polyethylene glycol 6000 concentration.

Index terms: preconditioning, seeds, thermodynamics, hydric potential.

INTRODUÇÃO

A uniformidade, a velocidade e a porcentagem de emergência das plantas em campo apresentam significativos reflexos sobre a produção final. Temperaturas extremas, salinidade, excesso ou deficiência hídrica, crostas do solo e presença de insetos e patógenos podem afetar de forma adversa o estabelecimento das plantas no campo.

Diversos tratamentos de pré-condicionamento para sementes têm sido sugeridos, visando à uniformização e à aceleração da germinação, ao aumento da resistência das sementes às condições de estresse, e à homogeneização do desenvolvimento das plântulas (Heydecker et al. 1975).

¹ Aceito para publicação em 4 de junho de 1991.

² Eng.-Agrícola, Prof.-Adjunto, Univ. Fed. de Pelotas, Caixa Postal 354, CEP 96100 Pelotas, RS.

³ Eng.-Agr., Prof.-Adjunto, Univ. Fed. do Paraná, Caixa Postal 672, CEP 80001 Curitiba, PR.

⁴ Eng.-Agr., Dirección Nal. de Meteor. del Uruguay, Casilla Postal 64, Montevideo - Uruguay.

O controle da hidratação da semente pelo emprego de soluções diluídas até um limite que permita a realização dos processos metabólicos pré-germinativos, sem a emergência da radícula, é denominado pré-condicionamento osmótico (Bradford 1986).

A presença de solutos altera as propriedades de água, resultando numa pressão osmótica diferente de zero na solução. No condicionamento osmótico, o soluto mais utilizado tem sido o polietileno glicol 6000, cuja fórmula é $\text{HOCH}_2(\text{CH}_2\text{OCH}_2)_n\text{CH}_2\text{OH}$, por ser quimicamente inerte e não apresentar toxicidade sobre as sementes.

A determinação do potencial osmótico de uma solução, conforme a concentração de polietileno glicol 6000 e a temperatura, foi proposta por Michel & Kaufmann (1973).

O presente trabalho objetivou caracterizar potenciais hídrico, osmótico, mátrico e de pressão em sementes e construir uma tabela associando potencial osmótico, concentração de polietileno glicol 6000 e temperatura.

Princípios termodinâmicos do conceito de potencial hídrico

Para um sistema aberto, a combinação entre o Primeiro e o Segundo Princípios da Termodinâmica pode ser estabelecida através da seguinte equação:

$$dU = T dS - p dV + \sum_{j=1}^n Y_j dx_j + \sum_{i=1}^n \mu_i dn_i \quad (1)$$

onde:

dU = variação infinitesimal da energia interna

$T dS$ = calor trocado

$P dV$ = trabalho numa variação de volume

$\sum_{j=1}^n Y_j dx_j$ = outras formas de trabalho, tais como trabalho das forças gravitacional, elétrica, capilar e adsorção

$\sum_{i=1}^n \mu_i dn_i$ = trabalho químico em decorrência da variação do número de moles (n_i) do componente i

Por definição, a função energia livre de Gibbs (G) é a transformada parcial de Legendre da função energia interna, obtida por substituição simultânea das variáveis S por T , e V por p (Lee & Sears 1969), sendo expressa por

$$G = U + p V - T S \quad (2)$$

Diferenciando-se a equação (2), obtém-se:

$$dG = dU + p dV + V dp - T dS - S dT \quad (3)$$

Substituindo-se a equação (3) em (1), tem-se:

$$dG = V dp - S dT + \sum_{j=1}^n Y_j dx_j + \sum_{j=1}^n \mu_j dn_j \quad (4)$$

Utilizando-se derivadas parciais, pode-se escrever:

$$dG = \left[\frac{\partial G}{\partial p} \right]_{T, X_j, n_i, n_k} dp + \left[\frac{\partial G}{\partial T} \right]_{p, X_j, n_i, n_k} dT + \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial G}{\partial X_j} \right]_{p, T, n_i, n_k} dX_j + \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial G}{\partial n_i} \right]_{p, T, X_j, n} dn_i \quad (5)$$

onde, n_k é o número de moles de outros componentes (k) do sistema, salvo o componente i, e

$$\frac{\partial G}{\partial n_i} = \mu_i \quad \begin{array}{l} \text{é denominado potencial químico do componente i} \\ \text{de um sistema aberto e representa a variação da} \\ \text{energia livre de Gibbs do sistema, causada pela en-} \\ \text{trada ou saída de um mol do componente i, quando} \\ \text{T, p, } X_j \text{ e } n_k \text{ permanecem constantes.} \end{array}$$

O potencial químico é uma função da temperatura, pressão, número de moles do componente i, número de moles do componente k e X_j , desta forma:

$$\mu_i = \mu_i (T, p, n_i, n_k, X_j) \quad (6)$$

O potencial químico da água num determinado estado (ψ) em relação a um estado padrão (ψ_0) denomina-se potencial total da água ou potencial hídrico, e pode-se escrever:

$$\psi = \psi (T, p, n_i, n_k, X_j) \quad (7)$$

O estado padrão é definido para o sistema água pura, num determinado referencial de posição e nas condições normais de temperatura e pressão, ao qual se atribui o valor arbitrário zero.

A função energia livre de Gibbs, conforme a equação (5), também pode ser escrita:

$$G = G (p, T, n_i, n_k, X_j) \quad (8)$$

Comparando as equações (5), (7) e (8), pode-se escrever:

$$d\psi = \left[\frac{\partial \psi}{\partial p} \right]_{T, X_j, n_i, n_k} dp + \left[\frac{\partial \psi}{\partial T} \right]_{p, X_j, n_i, n_k} dT + \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial \psi}{\partial X_j} \right]_{p, T, n_i, n_k} dX_j + \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \psi}{\partial n_i} \right]_{p, T, X_j, n_k} dn_i \quad (9)$$

Desta maneira a equação (9) pode ser escrita como:

$$d\psi = v dp - s dT + \sum_{j=1}^n Y_j dX_j + \sum_{i=1}^n \mu_i dn_i \quad (10)$$

onde, v e s são, respectivamente, volume e entropia específicos e Y_j uma variável intensiva.

O trabalho resultante das forças capilar, adsorção e elétrica, entre partículas sólidas de um sistema e das forças de coesão e elétrica entre as moléculas de água do mesmo sistema é uma função do teor de água (e) do sistema e das características químicas e estruturais das partículas sólidas.

Considerando-se significativo o trabalho da força gravitacional e sendo z a coordenada de posição em relação ao referencial, pode-se escrever:

$$d\psi = v dp - s dT + g dz + q de + \sum_{i=1}^n \mu_i dn_i \quad (11)$$

onde q é uma variável intensiva relativa às interações entre as partículas sólidas e a água.

O potencial total da água num determinado estado, pode ser expresso por:

$$\psi = \int_{P_0}^P v dp - \int_{T_0}^T s dT + \int_{z_0}^z g dz + \int_{e_0}^e q de + \int_0^{n_i} \sum_{i=1}^n \mu_i dn_i \quad (12)$$

onde:

$$\int_{P_0}^P v dp = \psi_p \quad \text{potencial de pressão}$$

$$- \int_{T_0}^T ds \, dT = \psi_T \quad \text{potencial de temperatura}$$

$$\int_{z_0}^z g dz = \psi_g \quad \text{potencial gravitacional}$$

$$\int_{\Theta_0}^{\Theta} q \, d\Theta = \psi_m \quad \text{potencial mátrico}$$

$$\int_0^{n_i} \sum_{i=1}^n \mu_i dn_i = \psi_s \quad \text{potencial osmótico}$$

desta forma:

$$\psi = \psi_p + \psi_T + \psi_g + \psi_m + \psi_s \quad (13)$$

Os potenciais hídrico, de pressão, de temperatura, gravitacional, osmótico e mátrico são expressos em unidades de energia por unidade de volume, que possuem dimensões físicas de pressão. As unidades comumente usadas para medir potenciais apresentam a seguinte equivalência:

$$1 \text{ MPa} = 9,87 \text{ atm} = 10 \text{ bar}$$

Relações hídricas em sementes

Os processos que ocorrem simultaneamente nas sementes podem ser considerados isotérmicos e sem variação da coordenada de posição, levando-se a considerar nulos os potenciais de temperatura e gravitacional.

Assim sendo, o potencial hídrico nas células de uma semente pode ser expresso pela soma de três componentes: de pressão, osmótico e mátrico.

$$\psi = \psi_p + \psi_s + \psi_m \quad (14)$$

O potencial de pressão numa célula ocorre porque a entrada da água aumenta o conteúdo celular, manifestando uma pressão na parede celular externa, devido à resistência desta à expansão (Bewley & Black 1985, Reichardt 1985). A componente osmótica é condicionada pelas ligações entre a água e os solutos, pois a concentração de solutos dissolvidos na célula influencia a absorção de água (Bewley & Black 1985). O potencial mátrico resulta das interações interfaciais, tais como forças capilares das células da semente (Labouriau 1983, Bradford 1986).

Os potenciais osmótico e mátrico apresentam valores negativos porque possuem baixo potencial em relação à água pura. Entretanto, a componente de pressão apresenta valores positivos, e a soma das três componentes resulta em potenciais negativos ou eventualmente igual a zero.

Um sistema hídrico em equilíbrio apresenta um potencial total igual a zero, e o movimento da água sempre ocorre, espontaneamente, segundo um gradiente decrescente de potencial hídrico (Labouriau 1983, Bewley & Black 1985).

A disponibilidade e a velocidade de fluxo de água para a semente são determinadas pela diferença de potencial hídrico entre a semente e o solo, causada pelo elevado potencial mátrico das paredes celulares e constituintes moleculares da semente.

Entretanto, com o aumento do teor de água, após a fase inicial de absorção, as matrizes da semente (parede celular, amido e corpos protéicos) tornam-se hidratadas, e os potenciais hídricos da semente e do solo tendem a atingir valores muito próximos. A disponibilidade de água para a semente é influenciada pelo potencial hídrico das zonas do solo imediatamente ao redor da semente, condutividade hidráulica e textura do solo, compactação do solo (pode causar uma restrição mecânica à intumescência da semente), impedância da matriz do solo e área de contato entre a semente e o solo (Bewley & Black 1985).

Ajuste do potencial osmótico pelo uso do polietileno glicol 6.000

A pressão osmótica de uma solução resulta da presença de solutos que afetam as propriedades da água, pelo fato de o soluto causar diminuição na energia livre de Gibbs do solvente. Os estudos da termodinâmica das soluções diluídas estabelecem que o potencial osmótico de uma solução depende essencialmente da temperatura e da concentração.

Michel & Kaufmann (1973), utilizando psicrômetro termopar e osmômetro de pressão de vapor, estudaram os efeitos da concentração de polietileno glicol 6.000 (PEG 6.000) e da temperatura no potencial osmótico de soluções e encontram uma relação entre a concentração (C) de polietileno glicol, a temperatura (T) e o potencial osmótico (ψ_s) da solução, expressa pela equação:

$$\psi_s = -(1,18 \times 10^{-2})C - (1,18 \times 10^{-4})C^2 + (2,67 \times 10^{-4})CT +$$

$$(8,39 \times 10^{-7})C^2T$$

(15)

sendo, C expresso em g de PEG 6.000/kg de água, T em °C e ψ_s em bar. A estimativa do erro padrão para o potencial osmótico determinado pela equação é de $\pm 0,28$ bar.

Considerando a equação (15) e por meio de um programa de computador, construiu-se uma tabela de dupla entrada, relacionando os valores de concentração de polietileno glicol 6.000, temperatura e potencial osmótico da solução.

A Tabela 1 mostra os valores da concentração de polietileno glicol 6.000 para valores de temperatura entre 1 e 40°C e para potenciais osmóticos da solução entre -1 e -40 bar.

Observa-se que uma pequena concentração de polietileno glicol (55,461g/kg) é necessária para a obtenção de um potencial osmótico de -1 bar (-0,987 atm), à temperatura de 1°C. Entretanto, para um potencial osmótico de -40 bar (-39,48 atm), à temperatura de 40°C, é necessária uma concentração de 681,665 g de PEG 6.000 por kg de água.

A equação (15) permite verificar que para uma determinada concentração de PEG 6.000, o potencial osmótico aumenta de forma linear com a temperatura, possivelmente, segundo Michel & Kaufmann (1973), pela redução das pontes de hidrogênio entre o polietileno glicol e a água, com a elevação da temperatura.

Por outro lado, sob temperatura constante, constata-se uma redução de forma curvilínea do potencial osmótico da solução com a elevação da concentração de PEG 6.000 que, de acordo com Michel & Kaufmann (1973), provavelmente pode ser explicada pelo aumento da viscosidade da solução, de maneira exponencial, com a concentração, devido a mudanças estruturais no polietileno glicol 6.000.

TABELA 1. Concentrações de polietileno Glicol-6000 para valores de potencial osmótico e temperatura.

| TEMP \ PO | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 | -6 | -7 | -8 | -9 | -10 |
|-----------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 55.461 | 90.399 | 118.198 | 141.997 | 163.146 | 182.372 | 200.119 | 216.685 | 232.277 | 247.050 |
| 2 | 56.178 | 91.355 | 119.311 | 143.231 | 164.481 | 183.794 | 201.620 | 218.257 | 233.915 | 248.750 |
| 3 | 56.911 | 92.330 | 120.443 | 144.485 | 165.836 | 185.238 | 203.143 | 219.852 | 235.577 | 250.473 |

TABELA 1. (Continuação).

| TEMP \ PO | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 | -6 | -7 | -8 | -9 | -10 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 4 | 57.662 | 93.323 | 121.595 | 145.760 | 167.213 | 186.704 | 204.688 | 221.470 | 237.262 | 252.222 |
| 5 | 58.430 | 94.336 | 122.767 | 147.055 | 168.612 | 188.193 | 206.258 | 223.113 | 238.972 | 253.995 |
| 6 | 59.216 | 95.368 | 123.960 | 148.373 | 170.033 | 189.704 | 207.851 | 224.779 | 240.708 | 255.794 |
| 7 | 60.021 | 96.421 | 125.175 | 149.713 | 171.478 | 191.240 | 209.468 | 226.471 | 242.468 | 257.619 |
| 8 | 60.845 | 97.495 | 126.411 | 151.075 | 172.946 | 192.800 | 211.110 | 228.189 | 244.255 | 259.471 |
| 9 | 61.689 | 98.590 | 127.670 | 152.461 | 174.438 | 194.385 | 212.778 | 229.933 | 246.069 | 261.350 |
| 10 | 62.553 | 99.707 | 128.952 | 153.871 | 175.955 | 195.995 | 214.472 | 231.703 | 247.910 | 263.257 |
| 11 | 63.439 | 100.846 | 130.258 | 155.305 | 177.497 | 197.631 | 216.193 | 233.501 | 249.780 | 265.193 |
| 12 | 64.346 | 102.009 | 131.588 | 156.765 | 179.065 | 199.294 | 217.941 | 235.327 | 251.677 | 267.159 |
| 13 | 65.276 | 103.196 | 132.942 | 158.250 | 180.660 | 200.985 | 219.717 | 237.181 | 253.605 | 269.154 |
| 14 | 66.229 | 104.407 | 134.323 | 159.762 | 182.281 | 202.703 | 221.522 | 239.065 | 255.562 | 271.180 |
| 15 | 67.206 | 105.644 | 135.729 | 161.300 | 183.931 | 204.450 | 223.356 | 240.979 | 257.550 | 273.237 |
| 16 | 68.208 | 106.907 | 137.162 | 162.867 | 185.609 | 206.226 | 225.220 | 242.924 | 259.570 | 275.326 |
| 17 | 69.236 | 108.196 | 138.623 | 164.462 | 187.317 | 208.032 | 227.116 | 244.901 | 261.622 | 277.449 |
| 18 | 70.290 | 109.513 | 140.113 | 166.086 | 189.055 | 209.870 | 229.042 | 246.910 | 263.706 | 279.605 |
| 19 | 71.372 | 110.858 | 141.631 | 167.740 | 190.823 | 211.739 | 231.002 | 248.952 | 265.825 | 281.795 |
| 20 | 72.482 | 112.232 | 143.180 | 169.425 | 192.624 | 213.640 | 232.994 | 251.028 | 267.979 | 284.021 |
| 21 | 73.621 | 113.637 | 144.759 | 171.142 | 194.456 | 215.575 | 235.021 | 253.130 | 270.167 | 286.283 |
| 22 | 74.790 | 115.072 | 146.370 | 172.891 | 196.322 | 217.543 | 237.082 | 255.285 | 272.393 | 288.583 |
| 23 | 75.991 | 116.539 | 148.014 | 174.674 | 198.223 | 219.547 | 239.179 | 257.468 | 274.656 | 290.920 |
| 24 | 77.224 | 118.038 | 149.691 | 176.491 | 200.158 | 221.587 | 241.314 | 259.688 | 276.957 | 293.297 |
| 25 | 78.490 | 119.571 | 151.402 | 178.343 | 202.130 | 223.664 | 243.485 | 261.948 | 279.297 | 295.713 |
| 26 | 79.791 | 121.139 | 153.149 | 180.231 | 204.138 | 225.778 | 245.696 | 264.246 | 281.678 | 298.171 |
| 27 | 81.128 | 122.743 | 154.932 | 182.157 | 206.185 | 227.932 | 247.946 | 266.586 | 284.100 | 300.670 |
| 28 | 82.501 | 124.384 | 156.753 | 184.121 | 208.271 | 230.126 | 250.237 | 268.966 | 286.564 | 303.213 |
| 29 | 83.913 | 126.062 | 158.612 | 186.124 | 210.397 | 232.360 | 252.571 | 271.390 | 289.072 | 305.801 |
| 30 | 85.365 | 127.780 | 160.511 | 188.168 | 212.564 | 234.637 | 254.947 | 273.858 | 291.625 | 308.434 |
| 31 | 86.858 | 129.539 | 162.451 | 190.253 | 214.774 | 236.958 | 257.367 | 276.371 | 294.224 | 311.113 |
| 32 | 88.393 | 131.339 | 164.434 | 192.382 | 217.028 | 239.323 | 259.833 | 278.930 | 296.870 | 313.841 |
| 33 | 89.972 | 133.182 | 166.455 | 194.554 | 219.327 | 241.734 | 262.346 | 281.537 | 299.565 | 316.618 |
| 34 | 91.596 | 135.069 | 168.530 | 196.772 | 221.672 | 244.192 | 264.907 | 284.193 | 302.309 | 319.446 |
| 35 | 93.268 | 137.003 | 170.646 | 199.038 | 224.065 | 246.699 | 267.518 | 286.899 | 305.105 | 322.327 |
| 36 | 94.988 | 138.984 | 172.810 | 201.351 | 226.507 | 249.256 | 270.180 | 289.658 | 307.954 | 325.261 |
| 37 | 96.759 | 141.013 | 175.024 | 203.714 | 228.995 | 251.864 | 272.894 | 292.470 | 310.857 | 328.250 |
| 38 | 98.583 | 143.093 | 177.288 | 206.128 | 231.544 | 254.526 | 275.662 | 295.336 | 313.816 | 331.296 |
| 39 | 100.460 | 145.226 | 179.604 | 208.598 | 234.143 | 257.242 | 278.485 | 298.260 | 316.833 | 334.400 |
| 40 | 102.394 | 147.412 | 181.974 | 211.118 | 236.797 | 260.015 | 281.366 | 301.241 | 319.908 | 337.565 |

TABELA 1. (Continuação).

| TEMP \ PO | -11 | -12 | -13 | -14 | -15 | -16 | -17 | -18 | -19 | -20 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 261.121 | 274.580 | 287.502 | 299.946 | 311.962 | 323.591 | 334.867 | 345.822 | 356.481 | 366.868 |
| 2 | 262.878 | 276.392 | 289.367 | 301.861 | 313.924 | 325.599 | 336.920 | 347.917 | 358.618 | 369.045 |
| 3 | 264.660 | 278.230 | 291.257 | 303.801 | 315.912 | 327.633 | 338.999 | 350.040 | 360.783 | 371.250 |
| 4 | 266.467 | 280.093 | 293.173 | 305.768 | 317.928 | 329.696 | 341.106 | 352.191 | 362.976 | 373.484 |
| 5 | 268.300 | 281.982 | 295.115 | 307.761 | 319.971 | 331.786 | 343.242 | 354.371 | 365.199 | 375.749 |
| 6 | 270.159 | 283.898 | 297.085 | 309.783 | 322.042 | 333.905 | 345.407 | 356.581 | 367.451 | 378.043 |
| 7 | 272.045 | 285.841 | 299.083 | 311.833 | 324.142 | 336.053 | 347.602 | 358.820 | 369.735 | 380.369 |
| 8 | 273.958 | 287.811 | 301.109 | 313.911 | 326.271 | 338.231 | 349.827 | 361.090 | 372.049 | 382.726 |
| 9 | 275.899 | 289.811 | 303.164 | 316.020 | 328.430 | 340.439 | 352.082 | 363.392 | 374.395 | 385.115 |
| 10 | 277.868 | 291.839 | 305.248 | 318.158 | 330.620 | 342.679 | 354.370 | 365.726 | 376.774 | 387.537 |
| 11 | 279.867 | 293.898 | 307.363 | 320.327 | 332.841 | 344.950 | 356.690 | 368.092 | 379.186 | 389.993 |
| 12 | 281.896 | 295.986 | 309.509 | 322.528 | 335.095 | 347.254 | 359.042 | 370.492 | 381.631 | 392.484 |
| 13 | 283.955 | 298.106 | 311.687 | 324.761 | 337.381 | 349.591 | 361.429 | 372.927 | 384.112 | 395.009 |
| 14 | 286.045 | 300.258 | 313.897 | 327.027 | 339.701 | 351.962 | 363.850 | 375.396 | 386.628 | 397.571 |
| 15 | 288.168 | 302.442 | 316.141 | 329.327 | 342.054 | 354.368 | 366.307 | 377.901 | 389.181 | 400.169 |
| 16 | 290.323 | 304.660 | 318.418 | 331.661 | 344.443 | 356.810 | 368.799 | 380.443 | 391.770 | 402.805 |
| 17 | 292.512 | 306.912 | 320.730 | 334.031 | 346.868 | 359.288 | 371.329 | 383.023 | 394.398 | 405.480 |
| 18 | 294.735 | 309.199 | 323.077 | 336.436 | 349.330 | 361.804 | 373.896 | 385.640 | 397.065 | 408.194 |
| 19 | 296.993 | 311.522 | 325.462 | 338.879 | 351.829 | 364.357 | 376.502 | 388.297 | 399.771 | 410.948 |
| 20 | 299.288 | 313.881 | 327.883 | 341.360 | 354.367 | 366.950 | 379.148 | 390.994 | 402.518 | 413.744 |
| 21 | 301.619 | 316.278 | 330.342 | 343.879 | 356.944 | 369.583 | 381.834 | 393.733 | 405.307 | 416.581 |
| 22 | 303.988 | 318.713 | 332.841 | 346.439 | 359.562 | 372.256 | 384.562 | 396.513 | 408.138 | 419.462 |
| 23 | 306.396 | 321.188 | 335.380 | 349.039 | 362.220 | 374.972 | 387.333 | 399.337 | 411.013 | 422.387 |
| 24 | 308.844 | 323.704 | 337.960 | 351.681 | 364.922 | 377.731 | 390.147 | 402.205 | 413.933 | 425.358 |
| 25 | 311.332 | 326.261 | 340.582 | 354.365 | 367.667 | 380.533 | 393.006 | 405.118 | 416.899 | 428.375 |
| 26 | 313.863 | 328.860 | 343.247 | 357.094 | 370.456 | 383.381 | 395.910 | 408.077 | 419.912 | 431.440 |
| 27 | 316.436 | 331.503 | 345.957 | 359.867 | 373.291 | 386.276 | 398.862 | 411.084 | 422.973 | 434.553 |
| 28 | 319.053 | 334.190 | 348.712 | 362.687 | 376.173 | 389.217 | 401.862 | 414.140 | 426.083 | 437.716 |
| 29 | 321.715 | 336.924 | 351.514 | 365.554 | 379.102 | 392.208 | 404.911 | 417.246 | 429.244 | 440.931 |
| 30 | 324.424 | 339.705 | 354.363 | 368.469 | 382.082 | 395.248 | 408.010 | 420.403 | 432.457 | 444.198 |
| 31 | 327.180 | 342.534 | 357.262 | 371.435 | 385.111 | 398.340 | 411.162 | 423.613 | 435.723 | 447.520 |
| 32 | 329.985 | 345.413 | 360.211 | 374.452 | 388.193 | 401.484 | 414.367 | 426.877 | 439.045 | 450.896 |
| 33 | 332.841 | 348.342 | 363.212 | 377.521 | 391.328 | 404.683 | 417.627 | 430.197 | 442.422 | 454.330 |
| 34 | 335.748 | 351.325 | 366.266 | 380.644 | 394.518 | 407.937 | 420.943 | 433.573 | 445.857 | 457.822 |
| 35 | 338.708 | 354.361 | 369.375 | 383.823 | 397.764 | 411.248 | 424.317 | 437.008 | 449.351 | 461.373 |
| 36 | 341.722 | 357.452 | 372.540 | 387.059 | 401.068 | 414.618 | 427.751 | 440.503 | 452.906 | 464.987 |
| 37 | 344.793 | 360.601 | 375.763 | 390.353 | 404.431 | 418.048 | 431.245 | 444.060 | 456.523 | 468.663 |
| 38 | 347.922 | 363.808 | 379.046 | 393.708 | 407.856 | 421.539 | 434.802 | 447.680 | 460.205 | 472.405 |
| 39 | 351.109 | 367.075 | 382.386 | 397.125 | 411.343 | 425.095 | 438.423 | 451.365 | 463.953 | 476.213 |
| 40 | 354.358 | 370.405 | 385.796 | 400.605 | 414.895 | 428.716 | 442.111 | 455.118 | 467.769 | 480.090 |

TABELA 1. (Continuação).

| TEMP \ PO | -21 | -22 | -23 | -24 | -25 | -26 | -27 | -28 | -29 | -30 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 377.001 | 386.899 | 396.577 | 406.049 | 415.329 | 424.426 | 433.352 | 442.116 | 450.727 | 459.191 |
| 2 | 379.217 | 389.153 | 398.868 | 408.377 | 417.692 | 426.824 | 435.784 | 444.581 | 453.224 | 461.721 |
| 3 | 381.462 | 391.436 | 401.189 | 410.735 | 420.085 | 429.253 | 438.247 | 447.078 | 455.754 | 464.283 |
| 4 | 383.736 | 393.750 | 403.541 | 413.123 | 422.510 | 431.713 | 440.742 | 449.606 | 458.316 | 466.877 |
| 5 | 386.041 | 396.094 | 405.923 | 415.543 | 424.966 | 434.204 | 443.268 | 452.168 | 460.911 | 469.505 |
| 6 | 388.376 | 398.468 | 408.336 | 417.994 | 427.454 | 436.729 | 445.828 | 454.762 | 463.539 | 472.167 |
| 7 | 390.743 | 400.875 | 410.782 | 420.478 | 429.975 | 439.287 | 448.422 | 457.391 | 466.202 | 474.864 |
| 8 | 393.141 | 403.314 | 413.261 | 422.995 | 432.530 | 441.878 | 451.049 | 460.054 | 468.900 | 477.596 |
| 9 | 395.573 | 405.786 | 415.773 | 425.546 | 435.119 | 444.505 | 453.712 | 462.752 | 471.633 | 480.364 |
| 10 | 398.037 | 408.292 | 418.319 | 428.132 | 437.744 | 447.166 | 456.411 | 465.487 | 474.404 | 483.169 |
| 11 | 400.536 | 410.833 | 420.900 | 430.753 | 440.403 | 449.864 | 459.146 | 468.259 | 477.211 | 486.011 |
| 12 | 403.070 | 413.409 | 423.517 | 433.410 | 443.100 | 452.599 | 461.919 | 471.068 | 480.057 | 488.893 |
| 13 | 405.639 | 416.021 | 426.171 | 436.104 | 445.834 | 455.372 | 464.730 | 473.916 | 482.942 | 491.813 |
| 14 | 408.245 | 418.670 | 428.862 | 438.836 | 448.606 | 458.183 | 467.579 | 476.804 | 485.866 | 494.774 |
| 15 | 410.888 | 421.357 | 431.591 | 441.607 | 451.417 | 461.034 | 470.469 | 479.732 | 488.831 | 497.776 |
| 16 | 413.569 | 424.082 | 434.359 | 444.417 | 454.268 | 463.926 | 473.400 | 482.701 | 491.838 | 500.820 |
| 17 | 416.290 | 426.847 | 437.167 | 447.267 | 457.160 | 466.858 | 476.372 | 485.712 | 494.888 | 503.907 |
| 18 | 419.050 | 429.652 | 440.016 | 450.159 | 460.094 | 469.833 | 479.387 | 488.766 | 497.981 | 507.038 |
| 19 | 421.851 | 432.498 | 442.907 | 453.093 | 463.070 | 472.851 | 482.445 | 491.865 | 501.118 | 510.214 |
| 20 | 424.693 | 435.386 | 445.840 | 456.070 | 466.090 | 475.913 | 485.548 | 495.008 | 504.301 | 513.435 |
| 21 | 427.579 | 438.318 | 448.818 | 459.092 | 469.155 | 479.020 | 488.697 | 498.198 | 507.531 | 516.704 |
| 22 | 430.508 | 441.294 | 451.840 | 462.159 | 472.266 | 482.173 | 491.893 | 501.435 | 510.808 | 520.021 |
| 23 | 433.482 | 444.316 | 454.907 | 465.272 | 475.423 | 485.374 | 495.136 | 504.720 | 514.134 | 523.387 |
| 24 | 436.502 | 447.384 | 458.022 | 468.433 | 478.629 | 488.624 | 498.429 | 508.054 | 517.510 | 526.804 |
| 25 | 439.568 | 450.499 | 461.185 | 471.642 | 481.884 | 491.923 | 501.771 | 511.440 | 520.937 | 530.272 |
| 26 | 442.683 | 453.664 | 464.397 | 474.901 | 485.189 | 495.273 | 505.165 | 514.877 | 524.417 | 533.794 |
| 27 | 445.848 | 456.878 | 467.660 | 478.211 | 488.545 | 498.675 | 508.612 | 518.367 | 527.950 | 537.369 |
| 28 | 449.063 | 460.143 | 470.975 | 481.574 | 491.955 | 502.131 | 512.113 | 521.912 | 531.538 | 541.000 |
| 29 | 452.330 | 463.461 | 474.342 | 484.990 | 495.419 | 505.641 | 515.669 | 525.513 | 535.183 | 544.688 |
| 30 | 455.650 | 466.833 | 477.764 | 488.461 | 498.938 | 509.208 | 519.282 | 529.171 | 538.886 | 548.434 |
| 31 | 459.025 | 470.260 | 481.242 | 491.989 | 502.514 | 512.832 | 522.953 | 532.888 | 542.648 | 552.241 |
| 32 | 462.456 | 473.743 | 484.778 | 495.575 | 506.149 | 516.515 | 526.683 | 536.665 | 546.470 | 556.108 |
| 33 | 465.944 | 477.285 | 488.372 | 499.220 | 509.844 | 520.259 | 530.475 | 540.504 | 550.355 | 560.038 |
| 34 | 469.491 | 480.887 | 492.026 | 502.926 | 513.601 | 524.065 | 534.330 | 544.406 | 554.304 | 564.033 |
| 35 | 473.099 | 484.549 | 495.742 | 506.694 | 517.421 | 527.935 | 538.249 | 548.374 | 558.319 | 568.095 |
| 36 | 476.769 | 488.275 | 499.522 | 510.527 | 521.305 | 531.870 | 542.234 | 552.408 | 562.401 | 572.224 |
| 37 | 480.504 | 492.065 | 503.367 | 514.426 | 525.257 | 535.873 | 546.288 | 556.511 | 566.553 | 576.424 |
| 38 | 484.303 | 495.922 | 507.280 | 518.393 | 529.277 | 539.945 | 550.411 | 560.684 | 570.776 | 580.695 |
| 39 | 488.171 | 499.847 | 511.261 | 522.429 | 533.367 | 544.089 | 554.606 | 564.930 | 575.071 | 585.040 |
| 40 | 492.108 | 503.842 | 515.313 | 526.537 | 537.530 | 548.305 | 558.875 | 569.250 | 579.442 | 589.460 |

TABELA 1. (Continuação).

| TEMP \ PO | -31 | -32 | -33 | -34 | -35 | -36 | -37 | -38 | -39 | -40 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 467.517 | 475.711 | 483.779 | 491.726 | 499.559 | 507.281 | 514.898 | 522.413 | 529.830 | 537.154 |
| 2 | 470.078 | 478.303 | 486.401 | 494.379 | 502.241 | 509.992 | 517.637 | 525.181 | 532.626 | 539.977 |
| 3 | 472.672 | 480.928 | 489.057 | 497.065 | 504.957 | 512.737 | 520.411 | 527.983 | 535.456 | 542.835 |
| 4 | 475.299 | 483.586 | 491.746 | 499.785 | 507.706 | 515.517 | 523.220 | 530.820 | 538.322 | 545.729 |
| 5 | 477.959 | 486.278 | 494.470 | 502.539 | 510.491 | 518.331 | 526.064 | 533.693 | 541.224 | 548.659 |
| 6 | 480.654 | 489.005 | 497.228 | 505.329 | 513.311 | 521.182 | 528.944 | 536.603 | 544.162 | 551.626 |
| 7 | 483.383 | 491.767 | 500.023 | 508.154 | 516.168 | 524.069 | 531.861 | 539.550 | 547.138 | 554.631 |
| 8 | 486.149 | 494.566 | 502.853 | 511.017 | 519.062 | 526.993 | 534.816 | 542.535 | 550.153 | 557.674 |
| 9 | 488.951 | 497.401 | 505.721 | 513.917 | 521.993 | 529.956 | 537.810 | 545.559 | 553.206 | 560.757 |
| 10 | 491.790 | 500.274 | 508.627 | 516.855 | 524.964 | 532.958 | 540.843 | 548.622 | 556.300 | 563.881 |
| 11 | 494.667 | 503.185 | 511.571 | 519.832 | 527.974 | 536.000 | 543.916 | 551.726 | 559.435 | 567.045 |
| 12 | 497.583 | 506.135 | 514.556 | 522.850 | 531.024 | 539.082 | 547.030 | 554.871 | 562.611 | 570.252 |
| 13 | 500.539 | 509.126 | 517.580 | 525.908 | 534.115 | 542.206 | 550.186 | 558.059 | 565.829 | 573.501 |
| 14 | 503.536 | 512.157 | 520.646 | 529.008 | 537.248 | 545.372 | 553.384 | 561.289 | 569.092 | 576.795 |
| 15 | 506.574 | 515.231 | 523.755 | 532.151 | 540.425 | 548.582 | 556.627 | 564.564 | 572.398 | 580.133 |
| 16 | 509.654 | 518.347 | 526.906 | 535.337 | 543.645 | 551.836 | 559.914 | 567.884 | 575.750 | 583.517 |
| 17 | 512.778 | 521.507 | 530.102 | 538.568 | 546.910 | 555.135 | 563.247 | 571.250 | 579.149 | 586.948 |
| 18 | 515.946 | 524.712 | 533.343 | 541.844 | 550.222 | 558.481 | 566.627 | 574.663 | 582.595 | 590.426 |
| 19 | 519.160 | 527.963 | 536.630 | 545.167 | 553.580 | 561.874 | 570.054 | 578.124 | 586.090 | 593.954 |
| 20 | 522.419 | 531.260 | 539.964 | 548.538 | 556.986 | 565.316 | 573.530 | 581.635 | 589.634 | 597.531 |
| 21 | 525.727 | 534.605 | 543.347 | 551.957 | 560.442 | 568.807 | 577.056 | 585.196 | 593.229 | 601.160 |
| 22 | 529.083 | 538.000 | 546.779 | 555.426 | 563.948 | 572.349 | 580.634 | 588.808 | 596.876 | 604.841 |
| 23 | 532.489 | 541.444 | 550.262 | 558.947 | 567.505 | 575.942 | 584.264 | 592.473 | 600.576 | 608.576 |
| 24 | 535.945 | 544.940 | 553.796 | 562.519 | 571.115 | 579.589 | 587.947 | 596.193 | 604.331 | 612.365 |
| 25 | 539.454 | 548.489 | 557.384 | 566.145 | 574.779 | 583.291 | 591.685 | 599.967 | 608.141 | 616.211 |
| 26 | 543.016 | 552.091 | 561.026 | 569.826 | 578.498 | 587.048 | 595.480 | 603.798 | 612.008 | 620.114 |
| 27 | 546.633 | 555.749 | 564.723 | 573.563 | 582.274 | 590.862 | 599.331 | 607.687 | 615.934 | 624.076 |
| 28 | 550.306 | 559.463 | 568.478 | 577.358 | 586.108 | 594.735 | 603.242 | 611.636 | 619.920 | 628.098 |
| 29 | 554.036 | 563.235 | 572.291 | 581.211 | 590.002 | 598.667 | 607.214 | 615.645 | 623.967 | 632.182 |
| 30 | 557.825 | 567.066 | 576.164 | 585.125 | 593.956 | 602.661 | 611.247 | 619.717 | 628.077 | 636.330 |
| 31 | 561.675 | 570.959 | 580.099 | 589.101 | 597.973 | 606.718 | 615.343 | 623.853 | 632.251 | 640.542 |
| 32 | 565.587 | 574.914 | 584.096 | 593.141 | 602.053 | 610.840 | 619.505 | 628.054 | 636.491 | 644.821 |
| 33 | 569.562 | 578.933 | 588.158 | 597.245 | 606.200 | 615.027 | 623.733 | 632.322 | 640.799 | 649.168 |
| 34 | 573.602 | 583.017 | 592.287 | 601.417 | 610.414 | 619.283 | 628.030 | 636.660 | 645.177 | 653.585 |
| 35 | 577.709 | 587.169 | 596.483 | 605.657 | 614.697 | 623.608 | 632.397 | 641.068 | 649.626 | 658.074 |
| 36 | 581.885 | 591.391 | 600.749 | 609.967 | 619.051 | 628.005 | 636.836 | 645.549 | 654.148 | 662.637 |
| 37 | 586.121 | 595.683 | 605.087 | 614.350 | 623.478 | 632.476 | 641.350 | 650.105 | 658.745 | 667.275 |
| 38 | 590.450 | 600.049 | 609.499 | 618.807 | 627.979 | 637.021 | 645.939 | 654.737 | 663.419 | 671.991 |
| 39 | 594.843 | 604.489 | 613.986 | 623.340 | 632.558 | 641.645 | 650.606 | 659.447 | 668.173 | 676.787 |
| 40 | 599.312 | 609.007 | 618.551 | 627.952 | 637.215 | 646.348 | 655.354 | 664.239 | 673.008 | 681.665 |

TEMP : Temperatura em graus Celsius
 PO : Potencial osmótico em bar

Concentração em gramas de PEG-6000 por quilograma de água

REFERÊNCIAS

- BEWLEY, D.; BLACK, M. **Seeds; physiology of development and germination.** New York: Plenum, 1985. 367p.
- BRADFORD, K.J. Manipulation of seed water relations via osmotic priming to improve germination under stress conditions. **HortScience**, Alexandria, v.21, n.5, p.1105-1112, 1986.
- HEYDECKER, W.; HIGGINS, J.; TURNER, Y.J. Invigoration of seeds? **Seed Science and Technology**, Zurich, v.3, p.881-888, 1975. **Technology**, Zurich, v.3, p.881-888, 1975.
- LABOURIAU, L.G. **A germinação das sementes.** Washington: OEA, 1983. 174p.
- LEE, J.F.; SEARS, F.W. **Termodinâmica.** Rio de Janeiro: Livro Técnico, 1969. 667p.
- MICHEL, B.E.; KAUFMANN, M.R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. **Plant physiology**, Rockville, v.51, p.914-916, 1973.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445p.