

## Estudio de las propiedades termodinámicas del sistema semilla-atmósfera mediante modelos de equilibrio higroscópico

A. Socorro, M. Vega y S. Calderón

Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical “Alejandro de Humboldt”  
INIFAT; [asocorro@inifat.co.cu](mailto:asocorro@inifat.co.cu)

Recibido el 2/06/10. Aprobado en versión final el 09/09/10.

**Sumario.** Se ajustan los valores de humedad de equilibrio de semillas respecto a la humedad relativa de la atmósfera exterior para dos especies vegetales. Para ello se utilizaron 3 modelos de equilibrio higroscópico mediante los cuales se simulan las curvas isotérmicas para diferentes valores de temperatura por vía computarizada. A partir de estos datos se calcula la entalpía, la energía libre de Gibbs y la entropía, para analizar el comportamiento de estas magnitudes con las propiedades de adsorción de las semillas.

**Abstract.** Values of seed equilibrium moisture content regarding relative humidity from exterior atmosphere on two plant species were fitted. Three hygroscopic equilibrium models were used for the isothermic curves simulation for different temperatures. From these data, the enthalpy, Gibbs free energy and entropy were calculated to analyze the behaviour of these magnitudes with sorption properties of seeds.

**Palabras clave.** Humedad 92.60.Iq y \*92.60.jk, Propiedades termodinámicas de superficies e interfaces 05.70.Np, 68.35.Md, Sorción 68.43.-h, Termodinámica, 05.70.-a

### 1 Introducción

La aplicación de modelos matemáticos en la Agricultura constituye una herramienta para predecir determinados procesos investigativos o productivos. Para ello se han utilizado los resultados experimentales obtenidos en condiciones similares y/o creando nuevos programas computarizados adecuados para cada uno de los procesos relacionados con la producción agrícola<sup>1,2</sup>.

En el caso del manejo de semillas en el banco de germoplasma, los modelos generalmente se construyen a partir de las propiedades termodinámicas que conforman el sistema semilla-ambiente<sup>3</sup>. La posibilidad de modelar los procesos que inciden en la conservación de las semillas, garantiza predecir la longevidad de las mismas durante el mayor tiempo posible.

En dependencia del tiempo y de las características propias de cada especie<sup>4</sup>, las semillas guardadas pierden inevitablemente su poder germinativo en el tiempo<sup>5,6</sup>. Por tal razón, muchas investigaciones han sido encaminadas hacia la obtención de condiciones que resultan óptimas para el adecuado almacenamiento<sup>7</sup> como son: el estudio de la humedad de equilibrio de las semillas en la cámara refrigerada, la temperatura, el tipo de envase, etc. Entre los modelos higroscópicos que más se emplean está la ecuación de D’Arcy-Watt<sup>8</sup> (DAW), la cual a pesar de no estar relacionada con la temperatura de forma explícita, sí tiene en cuenta los sitios de adsorción donde predominan enlaces fuertes, débiles y multimoleculares, de las partículas de vapor de agua en equilibrio con las macromoléculas biológicas que forman los tejidos de la semilla.<sup>9</sup>

El modelo de Socorro<sup>10</sup> (SOC) contiene dos coeficientes que se relacionan respectivamente con el contenido de humedad de equilibrio a una humedad relativa del 50% y con el balance de los potenciales de agua entre la semilla y el medio exterior. En la ecuación de Henderson-Thomson<sup>11</sup> (HTH), aunque no existe una interpretación física de sus coeficientes, contiene a la temperatura de forma explícita. Esto resulta una ventaja, porque una vez obtenidos experimentalmente los valores correspondientes a los parámetros del modelo, estos serían válidos para todo el rango de temperatura desde 10 hasta 40 °C, a diferencia de los modelos DAW y SOC que necesitan cuantificar sus respectivos coeficientes para cada valor de temperatura.

En este trabajo se realiza un ajuste de las curvas isotérmicas de humedad de equilibrio en semillas de fríjol y soya, a través de tres modelos higroscópicos. De esta forma se establece una relación entre las propiedades adsorbentes de los tejidos que componen las semillas y algunas variables termodinámicas relacionadas con este proceso.

## 2 Equilibrio higroscópico

Durante el proceso de adsorción existe un intercambio de energía entre dos sistemas. El primero formado por las macromoléculas biológicas en los tejidos de la semilla y el agua presente en ellos y el segundo constituido por el vapor de agua proveniente de la atmósfera exterior, ejerciendo una determinada presión<sup>9</sup>.

El equilibrio higroscópico en las semillas se alcanza cuando entre ambos sistemas cesa el intercambio de energía y por tanto la diferencia de los potenciales de Gibbs entre ellos es nula. De esta forma el contenido de humedad de la semilla llega a un valor de equilibrio (C\*), para cada valor de presión relativa del vapor de agua que ejerce la atmósfera caracterizada por la humedad relativa (HR)<sup>10</sup>.

Cuando los valores de C\* y HR son obtenidos para un mismo valor de temperatura, la curva que resulta luego de graficar ambas magnitudes es la denominada "Curva isoterma de equilibrio" (Fig. 1). Todos los cambios de estado dentro de dicha curva representan transiciones isotérmicas, los cuales se reflejan por las vías A-B y C-D en la figura 1.

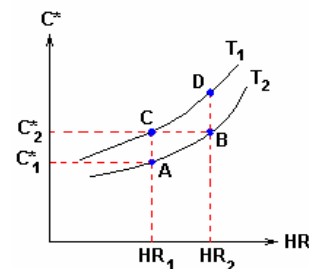
Si el proceso lo analizamos de modo que el contenido de humedad de equilibrio sea constante (vía C-B de la figura 1), obtenemos una expresión para la variación de entalpía por mol "ΔH" denominada "Ecuación Clausius-Clapeyron" aplicada a materiales biológicos adsorbentes:<sup>9,12</sup>

$$\Delta H = R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \left[ \frac{HR_1}{HR_2} \right] \quad (1)$$

Aquí R es la constante universal de los gases, mientras que (HR<sub>1</sub>;T<sub>1</sub>) y (HR<sub>2</sub>;T<sub>2</sub>) son la humedad relativa y temperatura absoluta en los respectivos estados termodinámicos 1 y 2. El esquema de la figura 1 es análogo a las curvas Volumen vs Presión que se utilizan usualmen-

te en la Termodinámica. Dada que la humedad del aire representa la presión relativa de los vapores, mientras que el contenido de humedad en equilibrio se relaciona con el volumen relativo de agua dentro de la semilla, podemos asumir analogías entre el proceso de transición C-B (Fig. 1) como vía isocórica y los procesos de transición A-C y B-D como isobáricos.

**Figura 1.** Esquema que muestra las curvas de contenido de humedad de equilibrio (C\*) respecto a la humedad relativa (HR) para las temperaturas T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>>T<sub>1</sub>) y algunos posibles cambios de estado. Vías isotérmicas: AB y CD, vía a C\* constante: CB, vías a humedad relativa constante: AC y BD.



Las curvas de C\* vs HR representan estados de equilibrio que se alcanzan a temperatura y presión constante, donde los potenciales de agua de la semilla (Ψ<sub>s</sub>) y de la atmósfera adyacente (Ψ<sub>E</sub>) a la interfase tejido-vapor de agua son iguales<sup>10</sup>:

$$\Psi_E = \Psi_s = \frac{1}{V_{PM}} \left( \frac{\partial G}{\partial n} \right)_{T,P} \quad (2)$$

V<sub>PM</sub> es el volumen parcial molar del agua, G la energía libre de Gibbs y n el número de moles. De (2) podemos obtener el valor de la energía libre de Gibbs por unidad de mol (G\*), que se alcanza en el equilibrio a un valor de temperatura constante, para cada valor de presión relativa de vapor de agua (humedad relativa)<sup>9,10,12</sup>:

$$G^* = RT \ln(HR) \quad (3)$$

Si el proceso es isobárico, la variación de la energía de Gibbs por unidad de mol se relaciona con la entropía por unidad de mol "S" de acuerdo con<sup>13</sup>:

$$S = - \frac{\Delta G^*}{\Delta T} \quad (4)$$

donde ΔG\* = G\*(T<sub>2</sub>) - G\*(T<sub>1</sub>), ΔT = T<sub>2</sub> - T<sub>1</sub>.

## 3 Materiales y métodos

**3.1. Trabajo experimental.** Se utilizaron semillas de fríjol (*Phaseolus vulgaris* L. cv: CubaC25-9negro) y soya (*Glycine max* Merrill(L). cv: Incasoy-24), las cuales se colocaron en campanas de cristal con soluciones salinas sobresaturadas<sup>14</sup> para obtener en cada una de ellas diferentes valores de humedad relativa desde 32 hasta 100%. Una vez alcanzado el equilibrio higroscópico se evaluó el contenido de humedad de las semillas dividiendo la masa de una muestra de semillas entre su respectiva masa seca "ms" (método de base seca)<sup>15</sup>. Para la evaluación de ms, las muestras se colocaron en una estufa a 130 °C durante dos horas<sup>16</sup>. Para cada evaluación de humedad, se utilizaron tres réplicas de más de 10 gramos de semillas cada una, cantidad suficiente para obtener en todos los casos un error relativo inferior al

5%.

Los valores de la temperatura en las campanas fueron de 26.50±0.16 °C para el caso del frijól y 27.5±0.5 °C para la soya, los cuales se obtuvieron a través de un termómetro digital "Oregon Scientific EM 913".

**3.2. Procesamiento de datos.** Se utilizaron las ecuaciones HTH, DAW y SOC. Henderson-Thomson (HTH)

$$C^* = \left[ \frac{\ln(1-HR)}{-D_1(T+D_2)} \right]^{1/d} \quad (5)$$

D'Arcy-Watt (DAW)

$$C^* = \frac{KK' \cdot HR}{1+K \cdot HR} + c \cdot HR + \frac{kk' \cdot HR}{1-k \cdot HR} \quad (6)$$

Socorro et al (SOC)

$$C^* = C_{50} - \frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{1}{HR} - 1 \right] \quad (7)$$

Donde D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, d, K, K', c, k, k', λ y C<sub>50</sub> son los respectivos coeficientes de los modelos.

Mediante el programa Curve-Expert Versión 1.3 se obtuvieron de forma computarizada los valores de estos coeficientes para cada especie de acuerdo al método de los mínimos cuadrados. Los datos fueron graficados utilizando el programa Microsoft-Excel 2003 y a partir de ellos se calculó el coeficiente de determinación de bondad de ajuste por medio de la ecuación<sup>17</sup>:

$$r^2 = 1 - \frac{S_E^2}{S_R^2} \quad (8)$$

donde S<sub>E</sub><sup>2</sup> es la varianza de los valores de las diferencias entre la curva y el valor de referencia, mientras que S<sub>R</sub><sup>2</sup> es la varianza de los datos de referencia. Estos valores de referencia pueden ser los datos experimentales o correspondientes a otra curva.

Utilizando los coeficientes del modelo HTH como referencia, se obtuvieron las curvas correspondientes a las temperaturas 20 y 35 °C y los respectivos coeficientes de los modelos DAW y SOC por medio de aproximación de las curvas a través del método de los mínimos cuadrados. Para el caso del parámetro "c" del modelo DAW, se obtuvieron los valores en función de la temperatura para un rango desde 10 hasta 40 °C.

Se procesaron los datos de las diferencias de entalpía por mol utilizando la ecuación (1), entre dos estados con diferente temperatura y humedad relativa, a valores de C\* constantes. De igual manera se obtuvieron los valores del potencial de Gibbs por mol en el equilibrio vía isotérmica, para dos valores de temperatura, así como la entropía de acuerdo a la ecuación (4) para valores de HR constantes (vía isobárica), a partir de los valores de G obtenidos previamente.

## 4 Resultados y discusión

Los valores de los coeficientes correspondientes a los tres modelos (ecuaciones 5, 6 y 7) en ambos cultivares, se muestran en la tabla I mientras que las respectivas curvas se representan en la figura 2.

El comportamiento de las mismas permite afirmar que para estos cultivos, cualquiera de los tres modelos es aplicable en el rango de valores de humedad relativa superior al 50%, donde en numerosas especies ocurre el proceso de adsorción. Los valores de r<sup>2</sup> en todos los casos estuvieron por encima de 0.95.

**Tabla I**

Valores de los coeficientes obtenidos para los tres modelos en las semillas de frijól cv: CubaC25-9negro y soya cv: Incasoy-24, con sus respectivos coeficientes de determinación de bondad de ajuste (Frijól T=26.5 °C, soya T=27.5 °C).

Modelo	Parámetro	Especie	
		Frijól	Soya
SOC	C <sub>50</sub>	0.115	0.077
	λ	18.94	25.80
	r <sup>2</sup>	<b>0.954</b>	<b>0.983</b>
DAW	K	118.0	118.0
	K'	0.037	0.041
	c	0.140	0.044
	k	0.940	0.950
	k'	0.013	0.013
	r <sup>2</sup>	<b>0.955</b>	<b>0.991</b>
HTH	D <sub>1</sub> (°C <sup>-1</sup> )	0.997	0.997
	D <sub>2</sub> (°C)	0.912	0.912
	d	1.708	1.419
	r <sup>2</sup>	<b>0.958</b>	<b>0.986</b>

**Tabla II**

Coefficientes de DAW y SOC obtenidos por el ajuste de los datos del modelo HTH para las temperaturas de 20 y 35 °C, en ambas especies.

		Frijól		Soya	
		20 °C	35 °C	20 °C	35 °C
SOC	C <sub>50</sub>	0.141	0.105	0.091	0.060
	λ	16.75	23.39	18.99	26.27
	r <sup>2</sup>	<b>0.997</b>	<b>0.997</b>	<b>0.991</b>	<b>0.989</b>
DAW	K	118.0	118.0	118.0	118.0
	K'	0.038	0.038	0.041	0.036
	c	0.180	0.099	0.088	0.028
	k	0.940	0.940	0.950	0.950
	k'	0.013	0.013	0.013	0.013
	r <sup>2</sup>	<b>0.995</b>	<b>0.996</b>	<b>0.966</b>	<b>0.969</b>

Los valores de los parámetros del modelo DAW muestran la posible existencia de diferencias en el número de sitios de adsorción con predominio de enlaces fuertes (parámetro K')<sup>9</sup>, mientras que no se observa diferencia en cuanto a la intensidad de dichos enlaces, entre las especies estudiadas (K). Tampoco se aprecia diferencia en cuanto a los sitios con enlaces multi-moleculares (k y k'), mientras que en el caso de los sitios de adsorción con predominio de enlaces débiles (c), sí se observa una marcada diferencia.

Para valores bajos de HR, donde tiene lugar el proceso de des-adsorción, las curvas se separan. Para estos

casos se ha comprobado la efectividad del ajuste de los modelos DAW y HTH, este último muy utilizado en el secado de granos<sup>18</sup>, mientras que el modelo SOC ha sido formulado a partir de considerar la existencia de una diferencia de potenciales de agua, que favorezca el proceso de adsorción<sup>10</sup>. En general, el ajuste de cualquiera de estos tres modelos se aproxima a los datos experimentales con un valor de  $r^2$  por encima de 0.95 en numerosas especies<sup>19</sup>.

En la tabla II se muestran los valores de los coeficientes DAW y SOC, ajustados por asociación respecto a la curva del modelo HTH para 20 y 35 °C. Se observa que los parámetros de DAW no experimentaron variación alguna respecto a la temperatura, a excepción de “c”, que mostró una relación inversamente proporcional. Para el caso de los parámetros del modelo SOC, los coeficientes  $C_{50}$  y  $\lambda$  resultaron ser inversa y directamente proporcional respectivamente, con relación a la temperatura.

Los datos de los coeficientes de DAW, obtenidos por el ajuste de Henderson, mostraron que ante variaciones de la temperatura, el número de sitios de adsorción con predominio de enlaces fuertes y multimoleculares (primer y tercer términos de la ecuación (6), respectivamente), no varían de forma significativa. En cambio los sitios donde predominan los enlaces débiles experimentan una clara disminución (exponencial decreciente). En la figura 3 se muestran los valores obtenidos por simulación a partir del ajuste con el modelo HTH desde 10 hasta 40 °C.

El hecho de que “c” sea más susceptible a variaciones respecto a T, con relación al resto de los parámetros del modelo DAW pudiera estar dado por el predominio de enlaces covalentes (débiles) en las macromoléculas que componen al tejido en la zona de la interfase semilla-atmósfera. La temperatura influye además en la movilidad de las moléculas de vapor de agua en esta interfase, por lo que el incremento de esta debe favorecer la cinética de adsorción o desorción<sup>10</sup> (parámetro  $\lambda$ ) y al mismo tiempo reducir el contenido de humedad para HR=0.5.

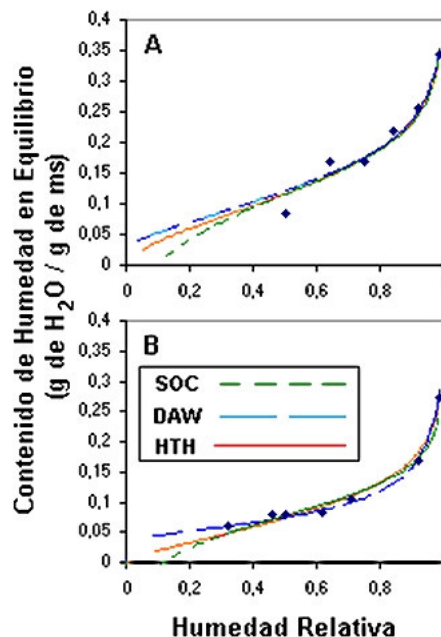
En todos los casos los coeficientes de determinación de la bondad de ajuste fueron suficientemente altos (por encima de 0.95), lo que valida la aproximación realizada para predecir el comportamiento de las curvas isotérmicas de equilibrio, en rangos de T no evaluados experimentalmente.

A raíz de la dependencia mostrada en la figura 3, para el frijol CubaC25-9negro y la soya IncaSoy-24, podemos expresar el parámetro c en función de T de acuerdo a la siguiente ecuación exponencial:

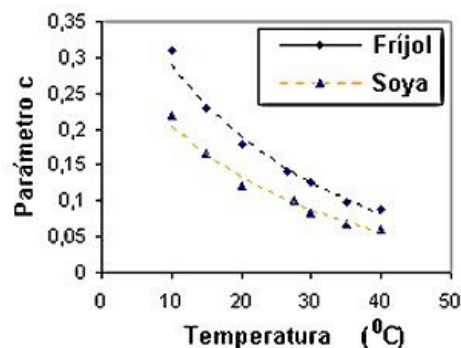
$$c = \sigma \cdot \text{Exp} \left[ -\frac{T}{T_c} \right] \quad (9)$$

Donde se obtuvo que  $\sigma=0.4397$ ;  $T_c=23.87$  °C para el frijol y  $\sigma=0.3145$ ;  $T_c=23.31$  °C para la soya. Con ello la ecuación de D’Arcy-Watt podría ser ajustada en función de la temperatura para estas especies, quedando la posibilidad de probar si esta dependencia se manifiesta pa-

ra otros cultivares. Los trabajos de Vertucci y Leopold (1987)<sup>9</sup> realizados en cotiledones y embriones de diferentes especies, muestran indistintamente un aumento o una disminución de c respecto a T en algunas especies, así como ciertas variaciones en los parámetros relacionados con el número de sitios de adsorción con enlaces fuertes y la intensidad de atracción de estos enlaces.



**Figura 2.** Curvas de equilibrio higroscópico correspondientes a los tres modelos y obtenidas para los dos cultivares A: Frijol CubaC25-9negro a 26.5 °C, B: Soya Incasoy-24 a 27.5°C. (C\* se expresa en g de agua por unidad de masa seca, mientras que HR es expresa en valores decimales entre 0 y 1).



**Figura 3.** Variación del parámetro DAW “c” (sitios de adsorción donde predominan enlaces débiles), respecto a la temperatura, para los dos cultivares. Los datos se obtuvieron a través del modelo HTH, con altos valores del coeficiente de determinación de bondad de ajuste.

Por esta razón esta dependencia de los sitios con enlaces débiles respecto a la temperatura, caracterizada por la expresión (9), no debe generalizarse a priori, como tampoco podemos asumir que respecto a T, el resto de los coeficientes de la ecuación de D’Arcy-Watt permanecerán sin variaciones significativas.

La figura 4 muestra los datos procesados por compu-

tadora de los valores de la entalpía. Una curva se corresponde con un incremento de T y otra refiere una disminución. En la soya se observa que estos valores de intercambio de energía son menores respecto al frijol, lo cual está muy relacionado con el hecho de que las isothermas correspondientes a esta especie poseen mayores valores de contenido de humedad de equilibrio con relación a la soya, para igual valor de humedad relativa. Esto pudiera estar relacionado con el contenido de grasa<sup>10,20</sup>, mayor en las semillas de soya. Los lípidos de acuerdo a sus propiedades hidrofóbicas, provocan una menor interacción entre la superficie del polímero y las moléculas de vapor de agua, lo cual está íntimamente relacionado con los valores de  $\Delta H$ <sup>9,12</sup>.

La aplicación de la ecuación de Clausius-Clapeyron para determinar la intensidad del proceso de adsorción de agua, tiene sus inconvenientes<sup>9</sup>. Fundamentalmente estos están dados por cierta incertidumbre del valor de  $C^*$ , que se presupone constante en el cálculo mediante (1), así como el hecho de que las curvas a diferentes temperaturas fueran obtenidas por simulación computarizada ajustando modelos higroscópicos diferentes. No obstante el método nos permite de manera aproximada comparar unas especies con otras en diferentes rangos de temperatura para cuantificar la interacción semilla-vapor.

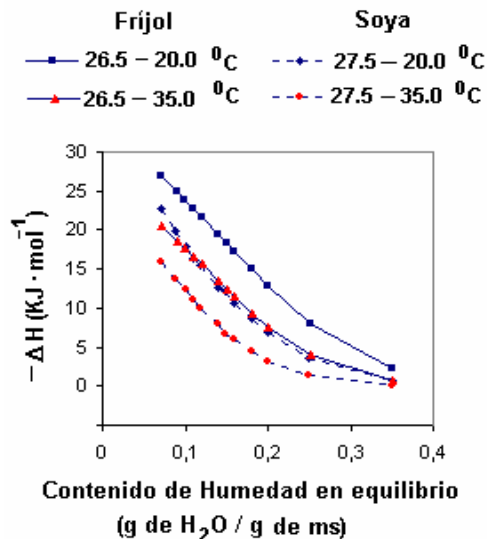
Las diferencias obtenidas en los valores de  $\Delta H$  a diferentes temperaturas sugieren que el proceso de hidratación puede implicar cambios conformacionales T-dependientes. Es decir, para altas temperaturas se podría producir un mayor desdoblamiento de los polímeros de la interfase de la semilla, mientras que para bajas temperaturas la tendencia sería a no existir doblamiento alguno de estas macromoléculas<sup>9</sup>. Esta relación se sustenta por el incremento del número de sitios de adsorción primarios (débiles) con la disminución de la temperatura (Fig. 3 y Eq. 9).

Igual comportamiento se observa para el valor de la energía libre por mol. Los datos provenientes del cómputo muestran rutas de menor potencial para el caso de la soya con respecto al frijol (Fig. 5). Todos los valores de  $G^*$  y S que se muestran representan los extremos de cada estado de equilibrio higroscópico que se alcanza en la semilla a determinado valor de  $C^*$ . Para  $C^* \rightarrow 0.35$  donde  $HR=1$  (máximo valor permisible), estos valores extremos de  $G^*$  y S tienden a 0. En el caso de la soya, debido a que alcanza valores de contenido de humedad en equilibrio mas bajos que el frijol para humedades relativas de 0.98-0.99, los valores extremos de S llegan a anularse a menores valores de  $C^*$  con respecto al frijol.

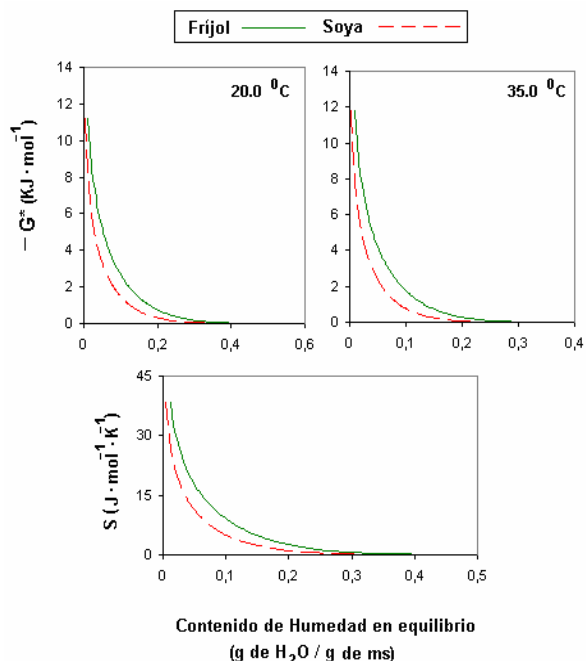
Comportamientos similares para estas magnitudes fueron obtenidos por Vertucci y Leopold (1987)<sup>9</sup> en cotiledones de soya a 15 °C. Mediante modelos de simulación computarizados estos datos pueden arrojar una información más precisa. Las magnitudes termodinámicas permiten caracterizar las propiedades adsorbentes de diferentes cultivares, pero sería imprescindible avanzar en el estudio de un mayor número de especies con caracte-

rísticas diferentes.

El conocimiento de las propiedades higroscópicas de las semillas ortodoxas resulta de gran valor para el adecuado almacenamiento de las mismas debido a que en el almacenamiento a largo plazo en los bancos de germoplasma, es la humedad el factor abiótico que más incide con respecto a la temperatura<sup>6</sup>.



**Figura 4.** Variación de la entalpía durante la transición para cada valor de contenido de humedad de equilibrio, utilizando la ecuación (1). Para el frijol de 26.5 a 20 °C y de 26.5 a 35 °C, mientras que para la soya de 27.5 a 20 °C y de 27.5 a 35 °C.



**Figura 5.** Comportamiento de la energía libre de Gibbs por mol para las dos especies a 20 y 35 °C, y de la entropía según las respectivas ecuaciones (3) y (4). Los datos de la entropía fueron computados tomando la diferencia de  $G^*$  para 20 y 35 °C y con respecto a los valores de contenido de humedad de equilibrio a 20 °C.

## 5 Conclusiones

Se comprobó que los tres modelos HTH, DAW y SOC resultan válidos para construir las curvas de equilibrio para los cultivares empleados. Ello puede ser utilizable por los manejadores de semillas en las cámaras de almacenamiento para predecir la longevidad de las mismas. Se pudo establecer una expresión matemática para el parámetro “c” (modelo DAW) relacionado con los sitios de adsorción donde predominan enlaces débiles, con respecto a la temperatura, aunque se debe comprobar esta dependencia de manera experimental para otras especies. Las magnitudes entalpía (vía isocórica), la energía libre de Gibbs (vía isotérmica) y la variación de entropía (vía isobárica) mostraron un comportamiento que refleja las propiedades higroscópicas de la semilla, lo cual puede constituir una herramienta de trabajo para caracterizar este tipo de proceso.

## Referencias

1. S.M. Welch, J.W. Jones, M.W. Brennan, G. Reeder, and B.M. Jacobson, PC-Yield: model-based decision support for soybean production, *Agricultural Systems*, Vol. 74, p. 79–98 (2002).
2. I. Maros and M.H. Khaliq, Advances in design and implementation of optimization software, *European Journal of Operational Research*, Vol. 140, p. 322–337 (2002).
3. Y. Liang, and W.Q. Sun, Rate of Dehydration and Cumulative Desiccation Stress Interacted to Modulate Desiccation Tolerance of Recalcitrant Cocoa and Ginkgo Embryonic Tissues, *Plant Physiology*, Vol. 128, Num. 3, p. 1323-1331 (2002).
4. E.J. Clercx, H. Blankestijn-De Vries, G.J. Ruys, S.P.C. Groot, and M. Koornneef, M, Characterization of green seed, an Enhancer of *abi3-1* in *Arabidopsis* That Affects Seed Longevity, *Plant Physiology*, Vol. 132, Num. 2, p. 1077-1084 (2003).
5. R.H. Ellis, and T.D. Hong., Temperature Sensitivity of the Low-moisture –content Limit to Negative Seed Longevity-Moisture Content Relationships in Hermetic Storage, *Annals of Botany*, Vol. 97, p. 785-791 (2006).
6. F. Pérez, M.E. González y C. Gómez, High viability recorded in ultra-dry seeds of 37 species of *Brassicaceae* after almost 40 years of storage, *Seed Science & Technology*, Vol. 35, p. 143-153 (2007).
7. S. Tang, D. M. TeKrony, D.B. Egli, and P.L. Cornelius, An alternative Model to Predict Corn Seed Deterioration during Storage, *Crop Science*, Vol. 40, p. 463-470 (2000).
8. F.R. Hay, A. Mead, K. Manger and J.F. Wilson, One-step analysis of seed storage data and the longevity of *Arabidopsis thaliana* seeds, *Journal of Experimental Botany* Vol. 54, Num. 384, p. 993-1011 (2003).
9. C. W. Vertucci and C. Leopold, Water Binding in Legume Seeds, *Plant Physiology*, Vol. 85, p. 224-231 (1987).
10. A. Socorro, E. Hernández, S. Calderón y H. Penichet, Modelo para curvas isotérmicas de humedad de equilibrio en semillas de interés agrícola, *Revista Cubana de Física*, Vol. 24, Núm. 2, p. 138-143 (2007).
11. A. Eslava, Toward a Mathematical Model Unification CHE/HRE of Sorption Equilibrium Curve for Rice Paddy, *Revista Brasileña de Almacenamiento*, Vol. 25, Núm. 1, p. 28-36. (2000).
12. M. Luscher-Mattli and M. Ruegg, Thermodynamic functions of biopolymer hydration. I. Their determination by vapor pressure studies, discussed in an analysis of the primary hydration process, *Biopolymers* Vol. 21, Num. 2, p. 403-418 (1982).
13. A.N. Matveev, in *Molecular Physics*, MIR Publishers, Moscú 448 pp (1985).
14. C.W. Hall, Drying and storage of Agricultural crops, in *The AVI Publishing Company*, Westport, Connecticut, 382 pp (1980).
15. R.H. Ellis, T.D. Hong and E.H. Roberts, in *Handbook of seed technology for genebanks*. International Board for Plant Genetic Resources. 1-Principles and Methodology. Rome, 667 pp (1985).
16. P. De Jesús, M.A. Bragay, S. Carneiro, Métodos para la determinación de contenido de humedad de semillas, *Revista Brasileña de Almacenamiento*, Vol. 33, Núm. 1, p. 1-8 (2008).
17. T. Yamane, in *Statistics. An introductory Análisis*, editado por Edición Revolucionaria (Instituto del Libro) 2nd Edición. La Habana. 919 pp. (1967).
18. M. Vega, Bases Científicas para el establecimiento de Tecnologías a la Medida para la Cosecha y Beneficio de la semilla de Soya, Tesis PhD Grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana, (2008).
19. A. Socorro, A., Modelación matemática del proceso de equilibrio higroscópico en semillas de hortalizas, *Agrotecnia de Cuba*, Vol. 32, Núm. 1, p. 87-94 (2008).
20. W. Walters and L.M. Hill, Water sorption isotherms of seeds from ultradry experiments, *Seed Science Research*, Vol. 8, Num. 1, p. 69-73 (1998).