

**Boffa, Guillermo ; Farías, Ana María ; Casiello, Francisco ; Galaretto, Oscar;**

*Secado industrial de granos de origen agrícola: estado del arte, herramientas de cálculo en la determinación de parámetros psicrométricos del aire de secado y aplicación de redes neuronales al control de procesos de secado*

Energeia, Año 10, N° 10, 2012

Este documento está disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina, repositorio institucional desarrollado por la Biblioteca Central "San Benito Abad". Su objetivo es difundir y preservar la producción intelectual de la Institución.

La Biblioteca posee la autorización del autor para su divulgación en línea.

Cómo citar el documento:

Boffa, G. et al. Secado industrial de granos de origen agrícola : estado del arte, herramientas de cálculo en la determinación de parámetros psicrométricos del aire de secado y aplicación de redes neuronales al control de procesos de secado [en línea]. *Energeia*, 10(10), 2012. Disponible en:  
<http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/secado-industrial-granos-agricola.pdf> [Fecha de consulta: .....]

## Secado industrial de granos de origen agrícola: Estado del arte, herramientas de cálculo en la determinación de parámetros psicrométricos del aire de secado y aplicación de redes neuronales al control de procesos de secado.

**Boffa, Guillermo; Farías, Ana María; Casiello, Francisco; Galaretto, Oscar**

**Resumen:** El proceso de secado de granos (y de cualquier sólido higroscópico) consiste en forzar la migración del agua desde el seno del material hacia el ambiente. El mismo tiene lugar en forma natural por la simple exposición del material al aire atmosférico por un tiempo suficientemente prolongado como para conseguir los niveles de humedad remanente pretendidos y en forma industrial sometándolo a la acción de aire caliente, a aire en condiciones normales pero calentando el material en forma indirecta o a ambos efectos en forma simultánea, que es lo más frecuente. En todos los casos el aire que es circulado a través del material por convección natural o forzada cambia sus condiciones psicrométricas y en base a la identificación de las variables que describen estos distintos estados es posible calcular las cantidades de energía y masa intercambiadas entre el aire y el material, además de otros datos de interés tales como la capacidad potencial de secado del aire en distintas etapas del proceso. En el presente trabajo se revisa el estado del conocimiento con relación a los modelos de secados de granos, se propone una herramienta para el desarrollo de polinomios que, en función de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo de las mezclas, permiten calcular entalpía, humedad absoluta y grado de saturación y se discute la aplicación de redes neuronales para el control de secadoras industriales.

**Palabras Claves:** Granos agrícolas - humedad de equilibrio - modelos de secado - psicrometría - control de procesos - aproximaciones polinómicas - redes neuronales

### 1. Introducción general al problema

#### 1.1 Definiciones básicas

Denominamos “procesos de poscosecha de granos de origen agrícola” a la cadena de actividades que se realizan entre la cosecha del grano hasta su procesamiento industrial, incluyendo almacenamiento temporario, transporte, secado y acondicionamiento y otras actividades del tipo que se llevan adelante antes del procesamiento del grano. Dicho procesamiento final puede involucrar desde procesos de extracción de aceite y/o harina, hasta procesamientos para la obtención de biodiesel.

#### 1.2 Aumentos en la producción de granos y cereales

El continuo aumento de la producción de granos y la conveniencia de realizar la cosecha anticipada de los mismos (separando al grano de la planta madre si bien ya formado pero con un alto contenido de humedad), exigencias del mercado, etc. hacen que día a día la práctica de secado acreciente su importancia. En efecto, la Tabla 1 ofrece información referida a la producción de oleaginosas por cultivo entre las campañas 2005-06 hasta 2009-2010. El caso de la soja es evidentemente el más notable.

Campaña	Producción (1)					
	Total	Girasol	Lino	Maní	Soja	Cártamo
	Miles de toneladas					
2005-06	44.715,9	3.759,7	53,8	347,3	40.537,3	17,8
2006-07	51.672,6	3.497,7	34,1	600,0	47.482,8	58,0
2007-08	51.556,9	4.650,4	9,6	625,3	46.238,1	33,5
2008-09	34.188,8	2.483,4	19,5	605,5	30.993,4	87,0
2009-10	55.604,3	2.220,7	52,1	611,0	52.676,6	43,9

(1) Se trata de los cultivos más importantes. El total no incluye a los cultivos restantes.

**Tabla 1 - Producción de cereales por cultivo. Total del país. Campañas 2005-06 a 2009-10**  
**Fuente:** Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Dirección de Información Agrícola y Forestal.

Por su parte la Tabla 2 ofrece información relativa al aumento de la producción de cereales desde las campañas 2005-06 hasta el 2009-10

Campaña	Producción (1)									
	Total	Alpiste	Arroz	Avena	Cebada cervecera	Centeno	Maíz	Mijo	Sorgo granífero	Trigo
	Miles de toneladas									
2005-06	31.646,7	14,7	1.193,5	226,9	796,2	33,1	14.445,5	15,5	2.327,9	12.593,4
2006-07	41.728,1	8,9	1.080,1	243,0	1.265,7	17,5	21.755,4	14,5	2.795,0	14.548,0
2007-08	44.595,3	9,1	1.245,8	472,4	1.474,5	77,2	22.016,9	14,8	2.936,8	16.347,7
2008-09	26.655,6	10,0	1.334,2	290,5	1.681,9	33,9	13.121,4	5,9	1.805,2	8.372,6
2009-10	37.879,1	9,8	1.240,6	182,0	1.355,8	25,1	22.676,9	9,1	3.629,0	8.750,9

(1) Se trata de los cultivos más importantes. El total no incluye a los cultivos restantes.

Tabla 2: Producción de cereales por cultivo. Total del país. Campañas 2005-06 a 2009-10.

Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Dirección de Información Agrícola y Forestal.

Desde siempre los productos vegetales han tenido que ser sometidos a técnicas de conservación para su consumo durante las épocas de no-producción o bien para su transporte hasta los centros de procesamiento/consumo.

El principio de conservación se basa en la eliminación del exceso de agua hasta niveles que aseguren la buena calidad del producto y su seguridad higiénica que les permitan ser aptos para el consumo por parte de animales así como de seres humanos. Los granos, como es bien conocido, no pueden conservarse almacenados si no están secos. La cuestión, entonces, es determinar cuándo un grano se considera "seco" y por lo tanto apto para ser almacenado.

Como término general, para los cereales, una humedad del 15% se considera el límite para estimarlo como "seco".<sup>1</sup> Pero este valor es relativo, pues depende de diversos factores. En efecto, en un país de clima frío, un cereal como el trigo puede conservarse a 15% de humedad, pero en un país de clima cálido, la humedad de conservación deberá ser de 12 - 13%. Por su parte, los granos oleaginosos, tienen que ser almacenados a humedades aún menores, 10 a 11%, y todavía más bajas, como en el caso de la colza. Por otro lado el mercado de granos el cual crece tanto en exigencias como en volumen, ve con claridad cuando se han mezclado humedades sin respetar los límites técnicos, cuando el grano ha sufrido desarrollo de hongos por no haberse secado a tiempo o bien cuando el grano ha sido sometido a secados violentos, es decir, cuando el grano ha perdido parte de su calidad<sup>2</sup>.

### 1.3 Secado de Granos - Desafíos

El secado artificial produce la principal transformación del grano en lo que llamamos la post-cosecha y a su vez es el procedimiento que más atención requiere para no afectar la calidad del mismo. Su objetivo fundamental es lograr que, durante el almacenamiento, el grano conserve sus características por el mayor tiempo posible.

Para ello, el proceso de secado de granos debe dar respuesta a cuatro requerimientos:

- 1) Disminuir el contenido de agua en los granos
- 2) Evitar la germinación de las semillas
- 3) Conservar la máxima calidad del grano
- 4) Alcanzar un grado de humedad que no permita el crecimiento de bacterias y hongos, y, que retarde considerablemente el desarrollo de ácaros e insectos

El mismo puede realizarse con aire natural o con aire caliente, sin embargo la temperatura que el grano adquiere durante el proceso de secado es fundamental para determinar si el mismo mantiene su calidad inicial. Todos los métodos utilizados para secar granos emplean la propiedad del aire de absorber humedad

<sup>1</sup> Craviotto, Roque Mario, *Humedad de la Semilla como Atributo de Calidad*, Grupo de Trabajo Tecn. de Semillas, EEA INTA Oliveros, <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/calidad/HumedadSemillaComoAtributoCalidad.asp>, Disponible sep. 2012.

<sup>2</sup> Ibidem.

de cuerpos que contienen agua. Una condición primordial para el secado de granos es la relación entre el contenido de humedad del producto y la humedad relativa del aire. La humedad del aire debe ser menor a la humedad final requerida. Otra condición importante es la temperatura del aire ya que como sabemos el aire caliente seca con más rapidez el grano que el aire frío.

Es casi imposible secar el grano por completo, debido a que la semilla retiene, en promedio, el 10% de la humedad. El grano puede almacenarse a salvo con esta cantidad de agua. En muchos casos, eliminar esta última cantidad de agua puede dañar el grano. Las secadoras de flujo continuo son las comercialmente más empleados en la actualidad. En ellas el grano se introduce y descarga en forma continua o intermitente, permaneciendo constantemente llenas las secciones de secado y enfriamiento. Las operaciones de secado y enfriamiento se efectúan en forma simultánea e ininterrumpida. El grano recorre las mismas desde arriba hacia abajo y pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de flujo.

a) Las secadoras de flujo mixto, también llamadas de "caballetes", tienen como elemento principal, en las zonas de secado y enfriamiento, un conjunto de conductos en forma de V invertida, por donde circula el aire caliente o frío.

b) Las de flujo cruzado, también llamadas "de columnas" poseen columnas o venas rectas por donde circula por gravedad el grano; las columnas están formadas por paredes de chapas perforadas, las que atraviesa el aire caliente (o frío) en forma cruzada o perpendicular al espesor de la columna.

Generalmente el secado del grano suele convertirse en un cuello de botella para la industria ya que además de ser costoso, es por lo dicho anteriormente, potencialmente peligroso para la calidad del grano. Es por ello que las instalaciones de secado representan inversiones importantes medidas en tonelada de grano procesado.

Cuando, para el resto de las prácticas de post-cosecha (manipuleo, control de plagas, aireación, etc) hablamos en términos de centavos por toneladas, en el proceso de secado llegamos a uno o más pesos/dólares por tonelada<sup>3</sup>.

No debemos perder de vista que del total de la energía utilizada en el proceso de producción de granos, el secado insume alrededor del 50%<sup>4</sup>. Por lo que tomando en cuenta estos dos factores, calidad y consumo de energía, se puede apreciar claramente la importancia que adquiere este proceso. Debemos tener en cuenta que el precio de la secadora representa alrededor del 45% del costo total de una instalación de secado<sup>5</sup>, ya que además debemos pensar en la noria elevadora, en el silo de grano húmedo, en la provisión de combustible, en los ciclones o elementos filtrantes para polvo (cada vez más importantes en términos del cuidado del medioambiente), plataformas de descarga, balanza, etc.

Los motivos mencionados junto al creciente impacto económico y ambiental derivado del uso de combustibles fósiles hacen del secado de granos una práctica de gran importancia Técnico-económica, por lo que la industria ha intensificado la búsqueda de soluciones para mejorar el rendimiento de las secadoras de granos.

El interés de este proyecto, sin embargo, se centra en la determinación del consumo energético durante el proceso de poscosecha y el diseño de acciones tendientes a la minimización de este consumo. A pesar de que el secado es uno de los procesos más empleados a nivel industrial, todavía se desconocen muchos aspectos relacionados con las etapas y los mecanismos aplicados en el mismo. Esto se debe en gran parte a la complejidad de la estructura de los materiales a secar.

## 1.4 Objetivos

El proyecto bajo estudio tiene como primer objetivo general obtener, en la fase de secado, correlaciones entre las variables de los procesos que interpreten los fenómenos involucrados y permitan obtener conclusiones dirigidos a optimizar el consumo de energía en estos procesos. A los efectos de cumplir con tal objetivo, el proyecto propone un abordaje sistemático al problema que permita acotar progresivamente la interpretación empírica.

Un primer objetivo específico del proyecto consiste en una revisión del estado del conocimiento sobre este problema, que permita posteriormente el desarrollo de estudios teóricos minuciosos sobre las soluciones posibles a las ecuaciones diferenciales que describen la evolución de las distintas variables en función del

---

<sup>3</sup> Dios, Carlos Alberto de, *Secado de granos y secadoras*, 2a ed., Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires, 2000

<sup>4</sup> Dios, Carlos Alberto de, *Secado de granos y secadoras*, ob. cit., Cap. XI: Costos de Secado, pp. 234 y ss.

<sup>5</sup> Ibidem.

tiempo (temperatura, humedad, etc.) para modelos de características fisicoquímicas y formas geométricas asimilables al material en estudio y evaluar su aplicabilidad.

Un segundo objetivo específico es el de medir el peso relativo de las decenas de variables que intervienen y, por análisis dimensional, obtener correlaciones que permitan vincular coeficientes globales de transferencia de calor y masa con variables de proceso. Para ello será necesario desarrollar una fase experimental a realizarse en equipos a escala piloto de contacto gas/sólido y líquido/sólido de alta versatilidad.

## 2. Revisión del estado del conocimiento

La modelación y la simulación computarizada del secado de granos son muy utilizadas actualmente en investigación. Se han propuesto muchos modelos para describir los procesos de transferencia de masa y calor en los tipos básicos de secaderos de granos por convección: *lecho fijo*, *flujo cruzado*, *flujo concurrente* y *flujo a contracorriente*.

Según S. Rafiee y otros<sup>6</sup>, las condiciones de secado afectan la calidad de las semillas de soja secas. Por tanto, se requiere una descripción precisa de la velocidad de secado. En este estudio se presentó la formulación de elemento finito y la solución de ecuación de transferencia de humedad por difusión para mejorar la simulación de secado de semillas de cuerpos asimétricos. Se resolvió el modelo de difusión de Fick. Para la etapa experimental se secaron semillas de soja, en capa delgada, a temperaturas del aire de 30, 40, 50, 60 y 70°C, por triplicado, a una velocidad fija de aire de secado igual a 1 m/s.

Para C.W.Cao y otros<sup>7</sup>, la Universidad Agrícola de China ha puesto el mayor énfasis de la investigación en secado de granos en el Modelado Matemático y la Simulación Computarizada del secado de granos. Desde 1988, se ha investigado sobre simulación de secaderos de granos de flujo cocurrente, a contracorriente cruzado y mezclado. Los softwares desarrollados se han utilizado en el análisis de la performance de los secaderos, el diseño y la optimización de nuevos secaderos de granos y la gestión de los existentes.

W.Jittanit<sup>8</sup> estudió el efecto del secado de las semillas de trigo, arroz y maíz en dos etapas, usando la germinabilidad como medida de calidad. La primer etapa se estudió para rango de temperatura del aire de 40-80°C, mientras que para la segunda etapa, la temperatura fue de 18-30°C y la humedad relativa del 60-70%. En este trabajo se desarrollaron modelos de capa delgada: el modelo modificado de Page, el modelo de dos compartimientos modificado.

J.P.Sitomp<sup>9</sup> y otros consideran el modelado heterogéneo de secaderos de grano de lecho profundo basados en modelos de dos fases, teniendo en cuenta tanto transferencia de masa como de calor dentro de los granos. También considera la dispersión axial de masa y calor en la fase del fluido. Las ecuaciones dinámicas de dos fases son resueltas numéricamente por diferencia finita con direcciones alternativas implícitas en el algoritmo del método, y luego aplicadas para simular perfiles de humedad y temperatura de gas de secado a través de los secaderos, junto a contenido de humedad y temperatura de los granos. Los resultados de la simulación muestran que la dinámica del secado de maíz dentro del lecho es bien predecible por el modelo de dos fases.

G. S. Mittal<sup>10</sup> y otro describen el desarrollo y la validación de un modelo para simular el secado de maíz bajo las condiciones de Ontario. Predicen perfiles de humedad del grano a diferentes profundidades. Para estudiar la performance del sistema se utilizaron registros horarios del tiempo de Toronto y de Londres, para el período 1965-1978.

Qiang Liu<sup>11</sup> y otro han desarrollado un procedimiento simplificado para calcular la capacidad de los secaderos de granos batch y de flujo cruzado, haciendo ciertas suposiciones simplificadoras en las ecuaciones de transferencia de masa y calor. Los cálculos requieren sólo una calculadora manual y una carta psicrométrica. Los datos de capacidad de secaderos computados con el nuevo procedimiento se encuentran dentro del  $\pm 10\%$  de los obtenidos experimentalmente o calculados por simulación con computadora. El método provee

<sup>6</sup> Rafiee S., Keyhani A. & Mohammadi A., *Soybean Seeds Mass Transfer Simulation during Drying Using Finite Element Method* - World Applied Sciences Journal 4 (2): 284-288, 2008

<sup>7</sup> Cao C.W., Yang D.Y., Liu and X.D., Liu Q., *Research on Modeling and Simulation of Mixed Flow Grain Dryer* - Proceedings of the 14th International Drying Symposium - São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. A, pp. 565-572

<sup>8</sup> Jittanit W., *Modelling of Seed Drying using a Two-Stage Drying Concept* - A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy - School of Chemical Sciences and Engineering - The University of New South Wales - July 2007

<sup>9</sup> Sitomp<sup>9</sup> J.P., Istadi and Widiasta I.N., *Modelling and Simulation of Deep-Bed Grain Dryers* - Drying Technology, 19(2), 269-280 (2001) - August 2001

<sup>10</sup> Mittal G.S. and Otten L., *Simulation of Low-Temperature Corn Drying* - Can. Agric. Eng. 24: 111-118, 1981.

<sup>11</sup> Liu Q. and Bakker-Arkema F. W., *Capacity Estimation of High-Temperature Grain Dryers - A Simplified Calculation Method* - Department of Agricultural Engineering - Michigan State University - East Lansing, MI 48824, USA

un procedimiento simple y rápido para predecir el efecto de la temperatura de secado y de la velocidad del flujo de aire en la capacidad del secador.

Según Francis Courtois<sup>12</sup>, en Francia, los secaderos de cereales han tenido importante progreso en la década del 70 debido al incremento del costo de la energía. Desde este período no se han realizado mejoras significativas. Surge claramente la necesidad de un software CAD especialmente desarrollado para secaderos de maíz de flujo mezclado franceses, incluyendo predicciones de calidad de molienda húmeda. Se propone un modelo de secado de maíz con mejoras significativas: predicción de la calidad final de molienda húmeda del maíz secado, potencialidades de estado no estacionario para tener en cuenta condiciones de secado variables, cualquier esquema de recirculación del aire, y para estrategias de pruebas de control (y compatibilidad con implementación en micro-computadoras). De hecho, los requisitos previos llevan a construir un conocimiento basado con un modelo dinámico que se sabe que raramente es compatible con la velocidad de cálculo de las microcomputadoras. Entonces se realizaron considerables esfuerzos en cuatro niveles: asociar modelos de calidad y de secado; suposiciones para simplificar la complejidad de las ecuaciones; enfoque compartimentado para limitar el número de ecuaciones; nuevo método de etapas flexibles para la integración numérica; nuevo método de integración específico para estado estacionario para tener en cuenta la recirculación del aire y optimización del contenido de humedad final. También se enfoca en la interfase humana: ventanas, menús, diálogos, mouse, etc. Las comparaciones entre las simulaciones y los resultados industriales han demostrado buena concordancia. Los constructores franceses más importantes de secadoras de cereales han comprado este software.

El principal propósito de Coonce<sup>13</sup> fue usar las técnicas disponibles de modelado de procesos para simular matemáticamente las condiciones y los cambios de calidad que ocurren durante el secado de la malta de forma que, con la ayuda de una computadora, puedan predecirse los cambios en la calidad debidos a la modificación de las condiciones de proceso. El uso de la simulación por computadora podría disminuir grandemente los costos y el tiempo involucrado en el desarrollo, el perfeccionamiento y el control del secado de la malta.

Parra<sup>14</sup> y otros implementaron en lenguaje de programación Microsoft Visual Basic 6.0, dos programas de simulación matemática para el secado de café pergamino, tomando como base los modelos de Thompson<sup>15</sup> y de la Universidad del Estado de Michigan (MSU)<sup>16</sup>, para lo cual se utilizaron los parámetros determinados en Cenicafé para la simulación matemática del secado de café pergamino. Los programas estiman el funcionamiento de cada uno de los secadores mecánicos de café existentes en Colombia. Se compararon los resultados obtenidos mediante simulación para cada uno de los secadores, con los resultados experimentales obtenidos en Cenicafé, concluyéndose que éstos predicen adecuadamente el secado del café pergamino. Con base en los buenos resultados de la evaluación de los programas, se implementó un único programa de simulación para el secado de café pergamino.

Entre los diferentes modelos hay, sin embargo, un número de diferencias que no han sido clarificadas en la literatura. Es necesario comprender las suposiciones básicas en los diferentes modelos publicados para, entonces, enumerar las limitaciones de uso de cada uno de ellos. La obtención de correlaciones entre las variables de los procesos involucrados en el secado de granos, permitirá optimizar el consumo de energía del mismo.

## 2.1 Conceptos básicos

Un trabajo que sistematiza el problema de la modelización y la simulación de procesos de transferencia de calor y de masa es el de Parry<sup>17</sup>, que contiene una revisión de publicaciones referentes a la modelación y simulación computarizada del secado de granos.

Si bien para el secado de materiales granulares se utilizan varios tipos de secadoras, en el secado de granos agrícolas se utiliza la circulación de aire, donde el principal mecanismo para la transferencia de calor y

---

<sup>12</sup> Courtois F., *Computer-Aided Design of Corn Dryers: A Dynamic Approach including Quality Prediction* - Journal of Drying Technology, 1995, 13(5-7) : 1153-1165

<sup>13</sup> Coonce V.M., *Dynamic Simulation of Drying and Quality Changes During Malt Kilning* - A THESIS submitted to Oregon State University for the degree of Master of Science - January 16, 1991 - Commencement June 1993.

<sup>14</sup> Parra-Coronado A., Roa-Mejía G. & Oliveros-Tascón C.E., *SECAFÉ Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino* - Rev. Brasileira de Eng. Agrícola e Ambiental, v.12, n.4, p.415-427, 2008.

<sup>15</sup> Thompson, T. L.; Peart, R. M.; Foster, G. H., *Mathematical simulation of corn drying - A new model*. ASAE, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

<sup>16</sup> Bakker-Arkema, F. W.; Lerew, L. E.; De Boer, S. F.; Roth, M. C., *Grain drying simulation*. Michigan: Research report from de Michigan State University East Lansing-MI. 1974. 80p.

<sup>17</sup> Parry, J. L., *Mathematical Modelling and Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: A Review*, Journal of Agricultural Engineering Research, v.32, p.1-29, 1985

humedad es la convección. El secado convectivo de granos puede realizarse en *secadoras batch*, y en *secadoras de flujo continuo*.

En las secadoras batch el grano constituye la fase estacionaria y se encuentra dispuesto en capas delgadas, de no más de 1 m de espesor; mientras que el aire caliente, es la fase móvil, lográndose con esta interacción distintos grados de secado.

Las secadoras de flujo continuo usualmente se clasifican de acuerdo a las direcciones de flujo relativas del grano y del aire: *flujo cruzado*, *flujo concurrente* y *flujo a contracorriente*.

La velocidad y la eficiencia del secado dependen de la temperatura y de la humedad del aire de secado. Los secaderos agrícolas frecuentemente se categorizan de acuerdo a si la temperatura del aire es:

- ~ Baja, hasta 5°C por encima de la temperatura ambiente,
- ~ Media, de 25 a 40 °C, o
- ~ Alta, hasta 100 °C

### Contenido de humedad de equilibrio (emc)

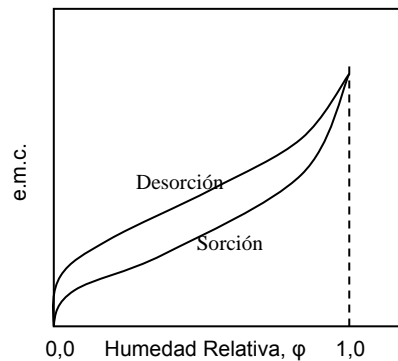
Un concepto básico en la teoría del secado es el *contenido de humedad de equilibrio*. Se puede definir como:

El contenido de humedad límite alcanzado por un material dejado en un medioambiente fijo (es decir, temperatura y humedad relativa del aire circundante fijas) durante un período de tiempo "suficientemente largo".

### Isotermas de sorción y desorción

El término **sorción** se refiere a los procesos combinados de adsorción y absorción.

Es bien conocido el fenómeno de *histéresis* que se produce al exponer un material a aire de distinto contenido de humedad a la misma temperatura. Las e.m.c. de equilibrio para la desorción son mayores que las de sorción. En el caso de los cereales estas diferencias son del orden del 1-2 %.



**Figura 1:** Histéresis entre las curvas de sorción y desorción

Se han propuesto muchas correlaciones para vincular la humedad relativa del ambiente y la humedad de equilibrio del material con mayores o menores justificaciones teóricas. Algunas de las más conocidas son:

- a. Henderson<sup>18</sup> sugirió una relación empírica de la siguiente forma:

$$1 - \phi = \exp(-aM_e^b)$$

donde:

*a* y *b* constantes del material determinadas a partir de datos experimentales.

*M<sub>e</sub>*: e.m.c. del grano, en base seca decimal

<sup>18</sup> Henderson, S. M. *A basic concept of equilibrium moisture*. Agric. Engng, 1952 – Vol. 33 - Pags. 20-32

$\varphi$ : Humedad relativa,  $0 \leq \varphi \leq 1,0$

Luego, con la intención de obtener una justificación teórica, arribó a una relación de la forma:

$$1 - \varphi = \exp(-cT_{abs}M_e^b)$$

donde  $c$  y  $b$  son constantes determinadas a partir de dos puntos de una isoterma experimental.

- b. Pichler<sup>19</sup> dedujo que los coeficiente  $c$  y  $b$  debían ser dependientes de la temperatura; y Day & Nelson<sup>20</sup>, obtuvieron una versión de cuatro parámetros, en los cuales:

$$a = P_1 T^{P_2}$$

y

$$b = P_3 T^{P_4}$$

donde  $P_i$  son constantes del material.

- c. Smith<sup>21</sup> diferenció una humedad de “enlace” referida al agua de constitución del grano y la simplemente adsorbida en la superficie. Para esto utilizó las isotermas de Langmuir y la ecuación de BET para proponer la siguiente correlación:

$$M_e = M_b - a \ln(1 - \varphi)$$

donde  $M_b$  es la humedad de “enlace” máxima. Se encontró que este modelo es aplicable al trigo a 25°C y 50°C, sobre un rango de  $\varphi$  entre  $0,5 < \varphi < 0,95$ .

- d. Nellist<sup>22</sup> obtuvo una versión modificada, introduciendo un término dependiente de la temperatura, para dar una ecuación de e.m.c. de la forma:

$$M_e = a - b \ln(1 - \varphi) - c \ln T$$

## 2.2 Secado en capas delgadas

En los experimentos en capa delgada, se hace pasar aire, a humedad, temperatura y velocidad de flujo constantes, a través de una capa delgada de material húmedo. Entonces, se observa durante un período de tiempo el comportamiento del secado del material bajo estas condiciones constantes.

Se ha observado que el secado tiene lugar en dos o más períodos diferentes. Primero, en materiales muy húmedos, hay un período durante el cual la evaporación tiene lugar a velocidad constante, casi como la de una superficie líquida libre. Esto es seguido por uno o más períodos en los cuales la velocidad de evaporación cae continuamente. Estos períodos diferentes están separados por un “contenido de humedad crítico” en el cual puede ocurrir una clara discontinuidad.

Estos puntos de discontinuidad en la desorción se asocian a distintos grados de ligazón entre el agua y el grano. El primer período se asocia al agua simplemente adsorbida en la superficie del material y éste sucede a velocidad constante.

Después de que se ha alcanzado el primer punto de discontinuidad, la velocidad de secado comienza a caer. Inicialmente esta velocidad es proporcional al área remanente de la superficie humedecida normalmente. Cuando toda esta humedad libre ha sido removida, se alcanza el “límite higroscópico” (Chen y Johnson<sup>23</sup> lo llaman “contenido de humedad terciario”). En este punto, la teoría de la capilaridad dice que, en cuerpos capilarmente porosos, el efecto de disminución de la presión de vapor se torna significativo y comienza un

<sup>19</sup> Pichler, H. J. *Sorption isotherms for grain and rape*. Landtech. Forsch., 1956 6 (2) 47-52.

<sup>20</sup> Day, D. L.; Nelson, G. L. *Desorption isotherms for wheat*. Trans. Am. Soc. agric. Engrs, 1965 8 (2) 293-297

<sup>21</sup> Smith, S. E. *The sorption of water vapour by high polymers*. J. Amer. Chem. Soc., 1947 69 64665 1

<sup>22</sup> Nellist, M. E. *The drying of ryegrass seeds in deep layers*. PhD Thesis, University of Newcastle-upon-Tyne, 1974

<sup>23</sup> Chen, C. S.; Johnson, W. H. *Kinetics of moisture movement in hygroscopic materials*. Trans. Amer. Soc. agric. Engrs, 1969 12 (1) 109-113; 12 (4) 478-481



segundo período de velocidad en disminución. En este período, y en los subsiguientes, la velocidad de secado depende de la velocidad a la cual se transporta la humedad (difusión), en ambas formas, líquida y vapor, desde el interior a la superficie del grano, fenómeno muy complejo y que en el actual estado del conocimiento no se encuentra cabalmente comprendido.

En el primer período el fenómeno responde a una ecuación diferencial del tipo<sup>24</sup>:

$$dM/dt = \left( \frac{h}{h_{fg}} \right) (T_{\infty} - T_{wb})$$

Donde  $h$  representa un coeficiente de transferencia de calor (volumétrico),  $h_{fg}$  es el calor de vaporización del agua libre,  $T$  es la temperatura de la corriente de vapor libre, y  $T_{wb}$  es la temperatura de bulbo húmedo del aire.

### Modelos de ecuaciones de difusión

Para las etapas siguientes, controladas por la difusión dentro del grano, se han propuesto ecuaciones de la forma<sup>25</sup>:

$$MR(t) = \frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)}$$

donde  $M = \bar{a}(t)$  y el contenido de humedad inicial,  $M_0$ , se supone constante a través del grano. En el caso de geometría esférica, por ejemplo, el contenido de humedad promedio,  $M$ , generalmente se define por:

$$M(t) = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi a^3} \int_0^a 4\pi r^2 a(r,t) dt$$

donde  $a$  es el radio de la esfera (equivalente al radio del grano).

Lewis<sup>26</sup> sugirió una ecuación, análoga a la de la Ley de Newton par enfriamiento, de la forma:

$$dM/dt = -k(M - M_e)$$

Ec. 1

donde  $k$  es una constante, para describir la velocidad de secado. Esta ecuación se basa en la suposición que la resistencia a la difusión ocurre principalmente en una capa delgada exterior del cuerpo. Integrando la ecuación anterior se obtiene:

$$MR(t) = \exp(-kt)$$

que es una curva típica de Newton.

Chen y Johnson<sup>27</sup> supusieron tres períodos de secado distintos, y propusieron una forma modificada de la Ec. 1:

$$dM/dt = -k(M - M_e)^a$$

donde  $k$  y  $a$  son constantes empíricas dependientes del período de secado y  $M_e$  es la e.m.c. al final de cada período.

<sup>24</sup> Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Hall, C. W. *Drying Cereal Grains*. The AVI Publ. Co. Inc., 1974 - 185

<sup>25</sup> Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford: Oxford University Press, 1975

<sup>26</sup> Lewis, W. K. *The rate of drying of solid materials*. Industr. Engng Chem., 1921 13 427

<sup>27</sup> Chen, C. S.; Johnson, W. H. *Kinetics of moisture movement in hygroscopic materials*. Trans. Amer. Sot. agric. Engrs, 1969 12 (1) 109-113; 12 (4) 478-481

### 2.3 Modelos de lecho profundo

En secaderos de granos convectivos, la humedad molar y el transporte de calor por difusión, generalmente, se consideran despreciables al compararlos con los debidos a la convección.

Los modelos que describen los procesos de transporte para granos individuales y para lechos profundos pueden derivarse de las mismas leyes físicas de balance de masa, momento y energía. Sin embargo, al ser diferentes las suposiciones concernientes al mecanismo de transporte dominante en cada caso, los sistemas de ecuaciones resultantes son nítidamente diferentes en su naturaleza.

Los modelos de lecho profundo se dividen en tres tipos denominados:

- Logarítmico,
- Balance de calor y masa, y
- modelos de resolución de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales (p.d.e.)

los dos primeros modelos se tratan por su interés histórico y para ubicarlos en el contexto de un modelo más general, el modelo p.d.e.

#### Modelos Logarítmicos

Las suposiciones principales para la elaboración de estos modelos consisten en considerar que la velocidad de secado a una dada profundidad  $x$ , después del tiempo  $t$ , es proporcional al gradiente de temperaturas en la misma dirección  $x$ .

Hukill<sup>28</sup> propuso una ecuación simplificada de la forma:

$$G_a c_a \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_p h_{fg} \frac{\partial M}{\partial t}$$

donde:

$T$  : temperatura del aire de secado

$c_a$  : calor específico del aire seco

$G_a$  : flujo másico del aire seco

$\rho_p$  : densidad del producto (grano)

$h_{fg}$  : calor de vaporización del agua libre

$M$  : contenido de humedad del producto, base seca decimal

Esto es equivalente a suponer que el calor sensible perdido por el aire se consume únicamente como calor latente en la vaporización y desprecia el calentamiento del grano.

Los modelos logarítmicos son útiles debido a su simplicidad y a la economía de cálculos de computación, pero son solo útiles a bajas temperaturas y a bajas velocidades de flujo de aire.

#### Modelos de balance de calor y de masa

Estos modelos están basados en considerar que la transferencia de calor y masa tiene lugar en las capas límites de flujo laminar del aire próximo a la superficie del grano donde los mecanismos de transferencia están gobernados por la difusión.

Estos modelos han demostrado alguna utilidad en diferentes tipos de secaderos, sin embargo, sus predicciones han presentado divergencia con los resultados experimentales debido a las simplificaciones

<sup>28</sup> Hukill, W. V. Grain drying. In *Storage of Cereal Grains and their Products* (ed. Anderson, J. A. and Alcock, A. W.). Amer. Ass. Cereal Chem., St. Paul, Minn., 1954

hechas en su formulación, sobre todo en las predicciones de los tiempos de secado que resultan generalmente mucho mayores a los reales, tal como lo explicita Boyce<sup>29</sup>.

Modelos de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales (p.d.e.)

Laws & Parry<sup>30</sup> desarrollaron modelos del tipo:

$$\frac{\partial \underline{\mu}}{\partial t} + A \frac{\partial \underline{\mu}}{\partial x} + B \frac{\partial \underline{\mu}}{\partial y} = \underline{b} \quad \boxed{\text{Ec. 2}}$$

útil para secaderos de flujo cruzado, donde se supone que el flujo del aire es en la dirección  $x$  y el flujo del grano es en la dirección  $y$ . El vector  $\underline{\mu}$  está dado por  $\underline{\mu} = [H, M, T, \theta]$ , y la matriz  $A$  es función de la velocidad del aire y la matriz  $B$  es función de la velocidad del producto. Las componentes del vector  $\underline{b}$  están dadas por:

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m/\varepsilon \rho_a \\ -m/\rho_p \\ \{-\psi - mE_v(T)\}/\{\varepsilon \rho_a (c_a + c_v H)\} \\ \{\psi + mE_w(\theta)\}/\{\rho_p (c_p + c_w M)\} \end{bmatrix}$$

donde:

$$E_v(T) = e_v + c_v T$$

y

$$E_w(\theta) = e_w + c_w \theta$$

representan las energías internas de vapor en el aire y de agua en el grano, respectivamente.

- $V_a$  : velocidad del aire húmedo,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $V_p$  : velocidad del producto,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $m$  : densidad neta del vapor formado por unidad de tiempo,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$
- $\varepsilon$  : vacío promedio,  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$
- $\rho_a$  : densidad del aire seco,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- $\rho_p$  : densidad del producto (grano)
- $\psi$  : velocidad neta de energía transferida del grano al aire por unidad de volumen,  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$
- $T$  : temperatura del aire de secado, °C
- $c$  : calor específico,  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
- $H$  : humedad específica del aire de secado,  $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
- $\theta$  : temperatura del grano, °C
- $M$  : contenido de humedad del producto, base seca decimal
- $a$  : aire seco

<sup>29</sup> Boyce, D. S. *Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying*. J.agric. Engng Res., 1965 10 (4) 333-341

<sup>30</sup> Laws, N.; Parry, J. L. *Mathematical modelling of heat and mass transfer in agricultural grain drying*. Proc. R. Sot. Lond. A. 1983 385 169-187

- $v$  : vapor de aire en el agua
- $w$  : agua en el grano
- $\rho$  : grano (producto)

Aquí, la energía de base ( $e_v$  y  $e_w$ ) y los calores específicos ( $c_v$  y  $c_w$ ) se suponen constantes. Los términos  $m$  y  $\psi$  para los cuales deben obtenerse ecuaciones constitutivas apropiadas, representan, respectivamente, la velocidad neta de transferencia de masa, es decir, la velocidad neta de evaporación del agua del grano, y la velocidad neta de energía transferida desde el grano al aire. Se supone que, en general,  $m$  y  $\psi$  son funciones de las variables de estado  $H, M, T$  y  $\theta$ , y de las velocidades  $V_a$  y  $V_p$  del aire y del grano respectivamente.

En el caso del lecho fijo, con  $V_p = 0$ , el sistema se reduce a:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + A \frac{\partial \mu}{\partial x} = \underline{b}$$

Para secaderos de flujo concurrente o a contracorriente, la Ec. 2 se transforma en:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + C \frac{\partial \mu}{\partial x} = \underline{b}$$

donde la matriz  $C$  está dada por la suma de las matrices  $A$  y  $B$  para flujo concurrente, y por  $B - A$  para flujo en contracorriente.

### 3) Balances de masa y energía en el secado de granos: herramientas de cálculo

Como hemos visto en los acápites precedentes, el proceso de secado de granos (y de cualquier sólido higroscópico) consiste en forzar la migración del agua desde el seno del material hacia el ambiente. En forma natural el mismo tiene lugar por la simple exposición del material al aire atmosférico por un tiempo suficientemente prolongado como para conseguir los niveles de humedad remanente pretendidos y en forma industrial sometiénolo a la acción de aire caliente, a aire en condiciones normales pero calentando el material en forma indirecta o a ambos efectos en forma simultánea, que es lo más frecuente.

En todos los casos el aire que es circulado a través del material por convección natural o forzada cambia sus condiciones psicrométricas y en base a la identificación de las variables que describen estos distintos estados es posible calcular las cantidades de energía y masa intercambias entre el aire y el material, además de otros datos de interés tales como la capacidad potencial de secado del aire en distintas etapas del proceso

#### 3.1 Datos de equilibrio del agua pura

Una información con que es necesario contar inmediatamente, es la referida a los datos de equilibrio del agua pura a distintas temperaturas

Es sabido que las tablas de vapor de agua proveen la información ordenada de la forma:

$T$	$P_v$	$V_f$	$V_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_{fg}$	$s_g$

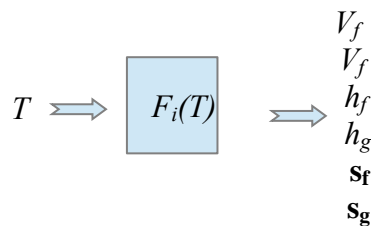
Donde:

- $T$ : Temperatura del agua
- $P_v$ : Presión de vapor de equilibrio
- $V_f$ : Volumen específico del líquido saturado
- $V_g$ : Volumen específico del vapor saturado
- $h_f$ : Entalpía del líquido saturado

- hfg*: Calor de vaporización
- hg*: Entalpía del vapor saturado
- sf*: Entropía del líquido saturado
- sfg*: Variación de entropía de vaporización
- sg*: Entropía del vapor saturado

Entonces, dada una temperatura, la determinación de los demás parámetros de equilibrio utilizando las tablas significa interpolar en el 99% de los casos y si los cálculos son reiterativos resulta que nos encontramos con una enorme dificultad de trabajo.

Además, si se piensa en un abordaje de la problemática que implique disponer de estos datos en el estudio y modelización de sistemas dinámicos, es claro que es necesario contar con algoritmos que proporcionen los valores de los demás parámetros en tiempo real ingresando la temperatura como dato



Estas correlaciones se han conseguido mediante aproximaciones polinómicas a la función real en cada caso, con resultados que difieren de los valores de las tablas utilizadas como referencia del orden del 0.2%.

Los polinomios resueltos son del tipo

$$F_i(T) = a_i + b_i T + c_i T^2 + d_i T^3 + e_i T^4 + f_i T^5 + g_i T^6$$

donde los coeficientes de los polinomios se obtuvieron por resolución de sistemas de ecuaciones lineales, y en algunos casos, como el de la entropía del gas, con condiciones referidas al rango de temperatura utilizado.

El sector de una hoja de cálculo donde se resumen los resultados producto de la utilización de los referidos polinomios se muestra a continuación:

*PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AGUA (De 0,01 a 100°C)*

Temperatura °C	35	<<Ingresar
Presión (bar)	0,05628665	
<i>v'</i> (m <sup>3</sup> /kg)	0,00100604	
<i>v''</i> (m <sup>3</sup> /kg)	25,2169983	
<i>h'</i> (kJ/kg)	146,627935	
$\Delta h$	2417,9602	
<i>h''</i> (kJ/kg)	2564,58813	
<i>s'</i> (kJ/kgK)	0,50513382	
$\Delta s$	7,84658606	
<i>s''</i> (kJ/kgK)	8,35171987	

También, y para ser utilizada en el cálculo de puntos de rocío de mezclas aire – agua, se obtuvo una correlación adicional que permite calcular la temperatura de equilibrio dada la presión de vapor como dato

$$T = F_T(P) = a_T + b_T P + c_T P^2 + d_T P^3 + e_T P^4 + f_T P^5 + g_T P^6$$

### 3.2) Obtención de los parámetros psicrométricos del aire húmedo

El paso siguiente consiste en utilizar los datos de equilibrio del agua pura en la determinación de los parámetros psicrométricos del aire de secado en sus diferentes estados.

Las variables de proceso que se determinan normalmente por medición directa son las temperaturas de bulbo seco y húmedo, y en función de estos datos se obtienen los demás parámetros para cada estado.

Para un proceso elemental de secado donde se cuenta con los datos:



Mediante la utilización de planillas de cálculo corrientes se calculan todos los parámetros de la mezcla en cada caso mediante:

- 1.- Determinación de la Presión de Vapor de equilibrio del agua pura a la Temperatura de Bulbo Húmedo:

$$P_v = F_p(T)$$

Donde  $F_p(T)$  es el polinomio de aproximación a la función real correspondiente a la presión de vapor.

- 2.- Cálculo de la Humedad Absoluta a la Temperatura de Bulbo Húmedo

$$X_{bh} = PM_{H_2O} / PM_a [P_v / (1 - P_v)]$$

- 3.- Cálculo de la Entalpía a la Temperatura de Bulbo Húmedo

$$h = C_{p(a)} t_{bh} + (C_{p(H_2O)} t_{bh} + \lambda) X_{bh}$$

- 4.- Obtención de la Humedad Absoluta de la mezcla teniendo en cuenta que su entalpía es igual a la calculada para  $t_{bh}$

$$X = [h - C_{p(a)} t_{bs}] / [C_{p(H_2O)} t_{bs} + \lambda]$$

- 5.- Determinación de la Presión de Vapor de equilibrio del agua pura a la Temperatura de la mezcla (Presión de saturación)

$$P_s = F_p(T)$$

Donde  $F_p(T)$  es el polinomio de aproximación correspondiente a la presión de vapor y T la temperatura de la mezcla.

- 6.- Obtención de la Humedad Absoluta de Saturación a la temperatura de la mezcla

$$X_s = PM_{H_2O} / PM_a [P_s / (1 - P_s)]$$

- 7.- Cálculo del Grado de Saturación de la mezcla

$$\phi = X / X_s$$

- 8.- Cálculo de la Presión de Saturación correspondiente al Punto de Rocío teniendo en cuenta que la Humedad Absoluta a esta temperatura es la misma que la de la mezcla.

$$P_s = 1 / [1 / (X P_a / PM_{H_2O}) + 1]$$

- 9.- Obtención de la Temperatura de Rocío utilizando el polinomio de aproximación a la función real

$$T_R = F_T(P_s)$$

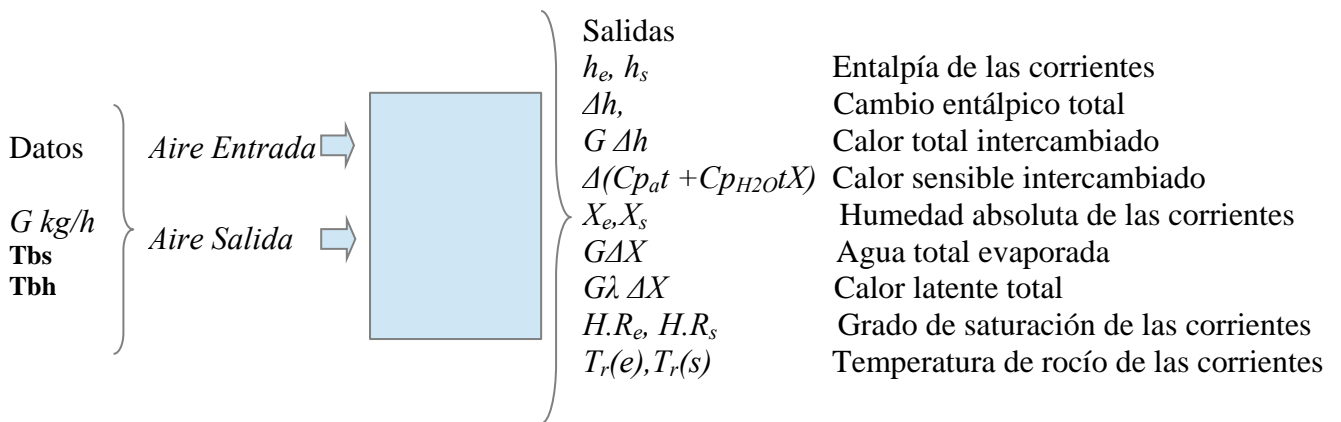
El sector de una hoja de cálculo donde se resumen los resultados producto de los cálculos indicados se muestra a continuación:

Facultad de Química e Ingeniería de Rosario - UCA  
 Dpto.de Investigación  
 Grupo de Estudio de los Procesos de Poscosecha de Granos de Origen Agrícola

**PARÁMETROS PSICROMÉTRICOS DEL AIRE DE SECADO**

Tbulbo seco °C	33
Tbulbo húmedo °C	25
<b>h (a <math>t_{bh}</math>) (kJ/kg)</b>	<b>75,92919945</b>
<b>X (kg/kg)</b>	<b>0,017234203</b>
<b>H.R (%)</b>	<b>53,09949139</b>
<b>Tde rocío °C</b>	

En resumen, la utilización de esta herramienta de cálculo permite realizar balances de masa y energía en los procesos de secado de granos e incluso formar parte de lazos de control computarizados donde se puede utilizar cualquier grupo de los parámetros de salida para modificar condiciones de proceso tales como caudal de aire y/o alimentación de producto, caudal de vapor de calentamiento de aire o indirecto, etc.



**4. Conclusiones**

En el presente trabajo hemos presentado los elementos básicos con los que es posible modelar los procesos de secado de granos, destacando también la importancia del este problema en los tiempos presentes y en el entorno de la ciudad de Rosario. Se revisaron los modelos de capas delgadas y los de lecho profundo, como dos grandes paradigmas para la representación de estos procesos. Ya familiarizados con el tema, se describieron las herramientas de cálculo para los balances y masa y energía en el secado de granos, orientadas a la determinación de las condiciones psicrométricas del aire de secado en base a la identificación de las variables que describen estos distintos estados, de modo de calcular las cantidades de energía y masa intercambias entre el aire y el material, además de otros datos de interés tales como la capacidad potencial de secado del aire en distintas etapas del proceso. Todos estos elementos han contribuido a posicionar al presente proyecto en un estado en el que es posible avanzar hacia la segunda fase: las experiencias de laboratorio y de campo.