

MODELADO DEL SECADO DE GRANOS EN LECHO  
FIJO A BAJAS TEMPERATURAS DE AIRE

Tesis de Doctorado

Mag. Ing. MIRIAM ALEJANDRA MARTINELLO

Presentada ante la Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Nacional de La Plata  
como requisito para la obtención del grado académico de

DOCTOR EN INGENIERIA

Dirección de tesis: Dr. Sergio Adrián Giner

Jurado de tesis: Dra. Victoria Vampa, Dr. Leonardo Molisani, Dr.  
Miguel Schmalko Radichowski

Fecha de la defensa oral y pública: 4 de Junio de 2015

## Resumen

Se estudió el proceso de secado de maíz a bajas temperaturas para proponer un método más ecológico y que conduzca a granos de mayor calidad y valor. Se abordó el modelado matemático de la transferencia de calor y materia y su implementación numérica. Los balances de masa y de energía se propusieron tanto para el aire intergranular como para los granos. Se consideraron variantes de modelización: equilibrio térmico y másico y no equilibrio; inclusión de términos de acumulación en el aire (no estacionario) y modelo sin términos de acumulación en el aire (pseudostacionario). Además, se estudiaron tres métodos numéricos para la resolución: diferencias finitas explícito, diferencias finitas implícito y método de las líneas. Las comparaciones entre modelos se basó en la respuesta característica del sistema (condiciones constantes del aire) y en la influencia de las condiciones meteorológicas en parámetros de desempeño como tiempo de secado, consumo específico de energía y pérdida de materia seca. Siempre se consideraron los efectos del caudal volumétrico específico de aire, temperatura del aire, humedad relativa del aire, humedad inicial de los granos y espesor del lecho. Para la comparación de los métodos numéricos se tuvo en cuenta el tiempo de cómputo y la influencia de los intervalos de tiempo y espacio en el tiempo de secado, consumo de energía y humedad final promedio en el lecho. Aplicando el simulador obtenido, se evaluó la influencia del calentamiento del aire al pasar por el ventilador. Se concluye que el modelo no estacionario de no equilibrio representa mejor el proceso, siendo el método de las líneas el esquema numérico mas apropiado para su resolución. El uso de ventilador por soplado precalienta y baja la humedad relativa del aire, conduciendo a menores tiempos de secado y reducciones en el consumo de energía.

# Índice

---

## Capítulo 1. Introducción

- 1.1 La importancia del Maíz en Argentina
- 1.2 Secado de granos
- 1.3 Secado a baja temperatura
  - 1.3.1 Características
  - 1.3.2 Ventajas y desventajas
  - 1.3.3 Equipamiento
  - 1.3.4 Variables que inciden en el SBT
  - 1.3.5. Deterioro del grano
  - 1.3.6 Consumo de energía y eficiencia térmica en el SBT
  - 1.3.7 Incremento de la temperatura de aire por efecto del ventilador
  - 1.3.8 Criterios para considerar finalizado el secado
  - 1.3.9 Estrategias de control
- 1.4 Modelado y simulación de secaderos
- 1.5 Justificación del trabajo y objetivos
- 1.6 Contenido del trabajo

## Capítulo 2. Modelado del secado de granos en lecho fijo

- 2.1 Modelo Matemático
  - 2.1.1 Balance de masa o ecuación de continuidad
  - 2.1.2 Balance de agua en el sólido
  - 2.1.3 Balance de agua en el aire
  - 2.1.4 Balance de energía
  - 2.1.5 Balance de energía para el sólido
  - 2.1.6 Balance de energía para el aire
  - 2.1.7 Balance total de energía en el lecho (agua +aire)
  - 2.1.8 Modelo no estacionario de no equilibrio
  - 2.1.9 Modelo pseudoestacionario de no equilibrio
  - 2.1.10 Modelo pseudoestacionario de equilibrio térmico y no equilibrio másico
  - 2.1.11 Modelo pseudoestacionario de equilibrio térmico y másico

- 2.2 Parámetros del modelo
- 2.3 Isotermas de sorción
- 2.4 Cinética de secado
- 2.5 Calor de sorción
- 2.6 Consumo específico de energía
- 2.7 Criterio de finalización de secado

## Capítulo 3. Estudio comparativo de los modelos pseudoestacionarios, de equilibrio y no equilibrio

### 3.1 Introducción

3.2 Resolución numérica de los modelos PsEst-EQ y PEst-NEQ por el método de diferencias finitas explícito

### 3.3 Comparación de los modelos para condiciones del aire constantes

3.3.1 Análisis de los tamaños de paso en  $z$  ( $\Delta z$ ) y en  $t$  ( $\Delta t$ ) apropiados para los dos modelos

3.3.2 Comparación de resultados obtenidos aplicando los dos modelos para distintas condiciones operativas: caudal, temperatura y humedad relativa del aire

### 3.4 Comparación de los modelos para condiciones del aire variables

3.4.1 Comparación de los modelos para condiciones del aire variables. Junín y Río Cuarto. Mes de febrero

3.4.2 Comparación de los modelos para condiciones del aire variables. Junín y Río Cuarto. Meses marzo a junio

3.4.3 Comparación de los modelos para condiciones del aire variables. Junin Mayo. Datos del aire de un año y datos del aire promedio 7 años

### 3.5 Comparación con datos experimentales

### 3.6 Conclusiones

## Capítulo 4. Influencia del método numérico en la resolución del modelo del secadero

### 4.1 Introducción

### 4.2 Formulación numérica del modelo PsEst-NEQ

#### 4.2.1 Consideraciones generales

- 4.2.2 Resolución numérica del modelo PEst-NEQ por el método de diferencias finitas implícito
- 4.2.3 Resolución numérica del modelo PEst-NEQ por el método de las líneas
- 4.3 Comparación de métodos numéricos. Condiciones del aire constantes
- 4.4 Comparación de métodos numéricos. Condiciones del aire variables
- 4.5 Conclusiones

## Capítulo 5. Estudio comparativo de los modelos pseudoestacionario y no estacionario

- 5.1. Introducción
- 5.2 Resolución numérica del modelo NEst-NEQ por el método de las líneas
- 5.3 Comparación de modelos PsEst-NEQ y NEst-NEQ. Condiciones del aire constantes
  - 5.3.1 Influencia del algoritmo de cálculo
  - 5.3.2 Influencia del tamaño de paso espacial
  - 5.3.3 Influencia de las condiciones iniciales para el modelo NEst-NEQ
  - 5.3.4 Influencia de las condiciones de entrada del aire
- 5.4 Comparación de métodos numéricos. Condiciones del aire variables
- 5.5 Conclusiones

## Capítulo 6. Aplicación del modelo seleccionado para el estudio de aspectos relevantes del secado natural de maíz

- 6.1. Introducción
- 6.2 Efecto del calentamiento del aire al pasar por el ventilador
  - 6.2.1 Introducción
  - 6.2.2 Cálculo del incremento de temperatura del que se produce en el ventilador
  - 6.2.3 Influencia del calentamiento del aire. Condiciones de secado constantes
  - 6.2.4 Influencia del calentamiento del aire. Condiciones de secado variables
- 6.3 Pérdida de materia seca
  - 6.3.1 Introducción
  - 6.3.2 Cálculo de la pérdida de materia seca
- 6.4 Conclusiones

## Capítulo 7. Conclusiones

### ANEXOS

ANEXO I: Métodos numéricos aplicados en el trabajo.

ANEXO II: Diagramas de bloques modelos PsEst-EQ y PsEst-NEQ. Metodo DFE.

ANEXO III: Humedad relativa y temperatura del aire ambiente. Promedios horarios de 7 años (2000 a 2006). Meses febrero a Junio. Junín y Río Cuarto.

ANEXO IV : Comparación de modelos pseudoestacionarios de equilibrio (PsEst-EQ) y no equilibrio (PsEst-NEQ) en condiciones meteorológicas.

ANEXO V: Diagramas de bloques método diferencias finitas implícito (DFI) y método de las Líneas (MDL). Modelo PsEst-NEQ

ANEXO VI: Comparación de métodos numéricos: método de diferencias finitas explícito (DFE) y método de las líneas (MDL) en condiciones meteorológicas.

ANEXO VII: Diagramas de bloques método de las Líneas (MDL). Modelo NEst-NEQ.

ANEXO VIII: Comparación de modelos pseudoestacionario (PsEst) y no estacionario (NEst) en condiciones meteorológicas.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Importancia del Maíz en Argentina

Argentina es el sexto país productor mundial de maíz (Figura 1.1) y se encuentra en el cuarto puesto como país exportador, después de EE.UU. y a nivel similar al de Brasil y Ucrania (Figuras 1.2 y 1.3).

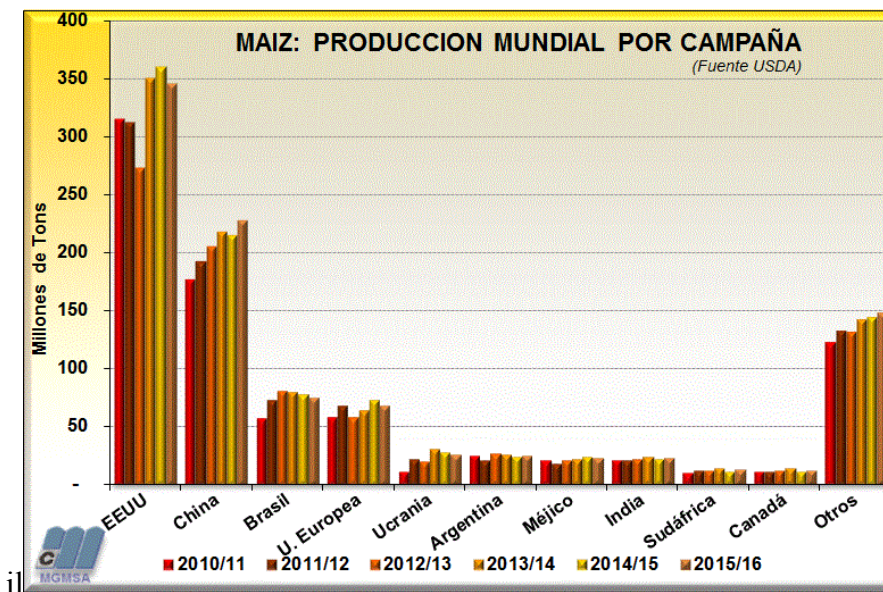


Figura 1.1. Producción de maíz por país y por campaña (<http://www.maizar.org.ar/estadisticas.php> , acceso 19/05/2015).

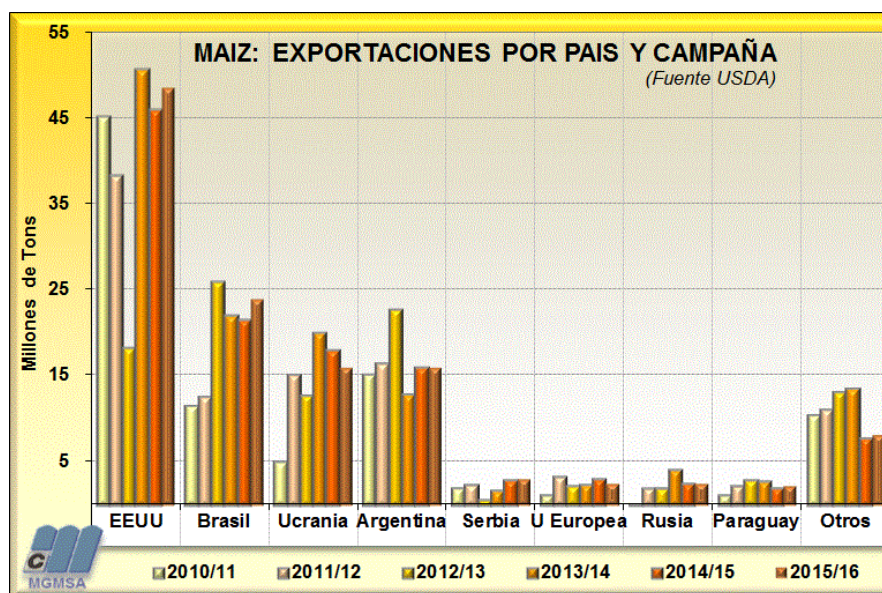


Figura 1.2. Exportación de maíz por país y por campaña (<http://www.maizar.org.ar/estadisticas.php> , acceso 19/05/2015).

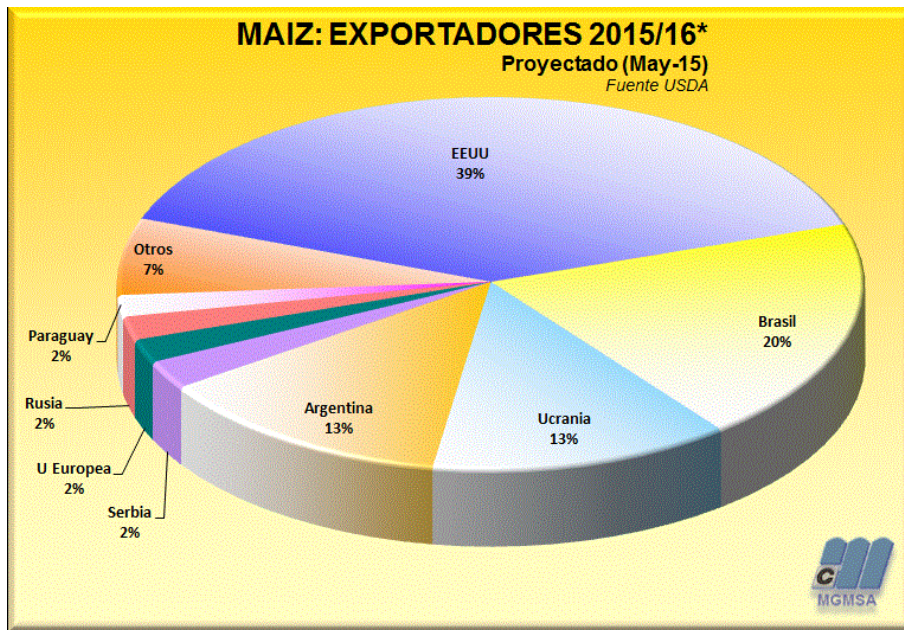


Figura 1.3. Exportación de maíz por país campaña 2015/2016 (<http://www.maizar.org.ar/estadisticas.php>, acceso 19/05/2015).

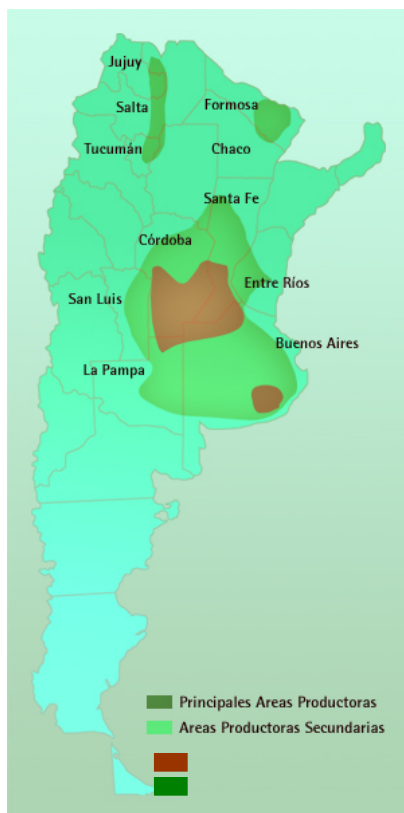


Figura 1.4. Mapa de cultivo de maíz en Argentina (<http://www.agroceres.com.ar/mapacultivos.asp?cultivo=maiz> acceso: 14/02/2013).

El maíz se cultiva principalmente en las provincias de Córdoba, Santa Fé y Buenos Aires (Figura 1.4). Por ejemplo en la campaña 2010/11, las provincias de Buenos Aires (35,8%), Córdoba (24,9%) y Santa Fe (15,4%) fueron las que concentraron la mayor producción, sumando en conjunto el 76% (Lezcano, 2012).

Como cultivo, el maíz tiene un lugar importante en nuestra agricultura. A pesar de que se siembran menos hectáreas que para otros cultivos, las mejoras en el manejo y la genética ofrecen excelentes rendimientos (en varias zonas superan las 10 t /ha).



En la campaña 1970/71 se sembraron casi 5 millones de hectáreas de maíz. En la campaña 2002/2003, apenas 2,8 millones. En tres décadas la superficie se redujo en un 40% aunque la productividad aumentó un 170%. Fueron años de importantísimas transformaciones para el campo, que permitieron ir armando un paquete tecnológico y de manejo, que sumado a los desarrollos en genética y biotecnología, los avances en las sembradoras de precisión, la incorporación de la siembra directa, el riego, la fertilización y un control integrado de plagas, le otorgan al productor un conjunto de herramientas gracias a los cuales los rendimientos son cada vez mayores (Figura 1.5) (Informe MAIZAR, 2006).

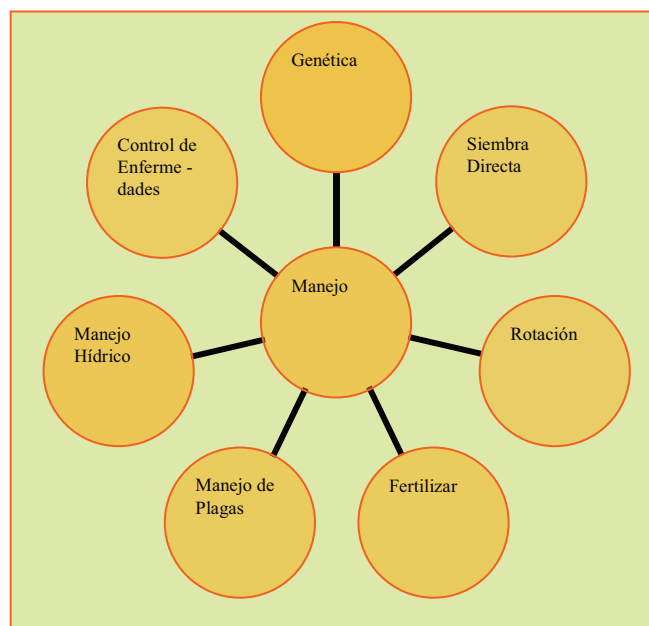


Figura 1.5. Avances tecnológicos en la producción de maíz en Argentina.

Existen cinco clases generales de maíz basadas en las características del grano, principalmente su dureza:

- maíz dentado ó “dent corn”
- maíz colorado duro, liso ó “flint”
- maíz pisingallo ó “popcorn” (reventador, palomero, pororó, pochoclo)
- maíz harinoso ó “flour corn”
- maíz dulce ó “sweetcorn”

El maíz pertenece a la familia de las gramíneas. Su nombre científico es *zea mays*. En general, el grano maduro o cariósido de maíz, está formado por cuatro partes

principales (Figura 1.6): pericarpio, endospermo, germen y pedicelo. El pericarpio es una capa de células fibrosas (5% del peso del grano). El endospermo (segundo tejido de reserva) representa poco más del 80% del peso del grano y tiene un alto contenido de almidón. El germen (aproximadamente un 11% del peso del grano), con alto contenido en lípidos y proteínas, es considerado el primer tejido de reserva puesto que contiene una gran cantidad de nutrientes utilizados durante la germinación donde se origina el tallo (plúmula) y las raíces (radícula). El pedicelo o capa terminal, es la continuación del pericarpio y permite la unión de grano en la mazorca.

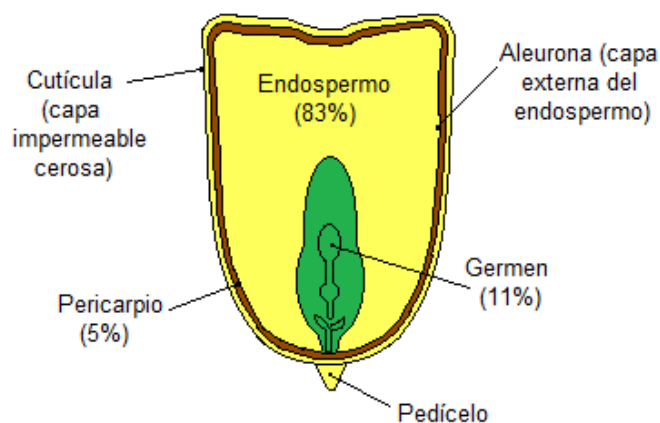


Figura 1.6. Estructura del grano de maíz (Satorre y col., 2003).

El maíz se utiliza en tres tipos diferentes de aplicaciones:

- i. Como alimento balanceado para la alimentación de aves, de porcinos y de vacunos.
- ii. Como materia prima de la molienda seca en la producción de alimentos para consumo humano y otras materias primas intermedias usadas por la industria alimentaria.
- iii. Como materia prima de la molienda húmeda, destinada a obtener una variedad de productos alimenticios e insumos empleados por industrias diferentes a la alimentaria.

Además, en ambos tipos de molienda se separa el germen de maíz que es utilizado en la extracción del aceite.

Por otra parte, en los últimos años, la transformación del maíz en etanol, ya en el ámbito de los biocombustibles, demuestra la gran variedad de usos y aplicaciones de este cereal.

Las diferentes clases de maíz tienen aplicaciones específicas. El maíz colorado duro es requerido principalmente para la molienda seca. Tradicionalmente usado para la obtención de polenta, sus usos se han multiplicado progresivamente: se lo emplea para la fabricación de cereales para desayuno o como alimento para animales. El maíz pisingallo es otra especialidad que tuvo un desarrollo acelerado en Argentina. Por su parte, los maíces dentados son muy usados en la molienda húmeda para la obtención de alcohol, almidones y fructosa, entre otros ingredientes empleados en la industria alimentaria. El maíz harinoso se utiliza para el consumo fresco (choclo) y para la elaboración de comidas tradicionales basadas en harina de maíz (Informe INTA, 2010).

Con respecto a las proporciones empleadas en cada una de las aplicaciones, en el año 2011 se destinaron a industrialización 4.125.244 toneladas de maíz. El 64% se empleó para la elaboración de balanceado, el 30,4% ingresó al proceso de molienda húmeda y el 5,5% restante se sometió a las operaciones que comprende la molienda seca.

En 2011, el incremento en el volumen total industrializado, respecto a 2010, fue del 13,5% (491.000 toneladas más de maíz). Las mismas se repartieron de la siguiente manera:

- 311.000 para alimento balanceado
- 118.000 a molienda húmeda
- 62.000 a molienda seca

Cabe mencionar, que aunque la industrialización por molienda seca captó el menor volumen interanual de toneladas incrementales, esta forma de industrialización fue la que más creció en 2011 (+ 37,7%). A su vez, el maíz para balanceado aumentó el 13,3% y la molienda húmeda incrementó el volumen procesado en un 10,4%.

Entre los años 2005 y 2011 las tres formas de industrialización del maíz mostraron un crecimiento (Tabla 1.1). La industria de la molienda húmeda registró su mayor volumen de maíz procesado en el año 2009, transitando fluctuaciones a lo largo del período bajo análisis. En 2011 se observa que el sector recibió un 5,9% más que en aquel año récord.

El conjunto de establecimientos dedicados a la molienda seca del maíz ostentaba al año 2008 como el de mayor volumen molturado de cereal. Sin embargo, en 2011 el mismo fue superado en un 6,2% (Lezcano, 2012).

Tabla 1.1. Industrialización del maíz período 2005-2011.

Período	Maíz a industrialización (Miles Ton)		
	Balanceado	Mol. Húmeda	Mol. Seca
2005	1.068,4	999,9	147,9
2006	1.328,7	1.057,5	155,8
2007	1.396,8	1.064,7	166,4
2008	1.528,9	1.068,3	214,1
2009	1.936,5	1.184,5	159,4
2010	2.332,4	1.136,4	165,2
2011	2.643,7	1.254,1	227,5
<b>Variación 2011-'10</b>	<b>13,3%</b>	<b>10,4%</b>	<b>37,7%</b>
<b>Acum. Ene- Feb 2011</b>	<b>374,1</b>	<b>189,0</b>	<b>39,2</b>
<b>Acum. Ene- Feb 2012</b>	<b>425,0</b>	<b>202,4</b>	<b>36,1</b>
<b>Variación acum. E- Feb 2012-'11</b>	<b>13,6%</b>	<b>7,1%</b>	<b>-7,8%</b>

Fuente: Dir. Promoción Calidad Prod. Agrícolas y Forestales con datos Dir. Nal. Mercados- ex ONCCA

Las especificaciones para la comercialización del maíz están establecidas por norma (Res. Ex SAGyP N°1075/94), en la que se contemplan dos tipos de maíz (duro y dentado) y tres colores (colorado, amarillo y blanco). Para los tipos y colores precedentes se establece un estándar integrado por tres grados con las correspondientes especificaciones (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Especificaciones para la comercialización de maíz.

GRADO	P.H. (kg/hl)	Granos Dañados %	Granos Quebrados %	Materias Extrañas %
1	75	3,00	2,00	1,00
2	72	5,00	3,00	1,50
3	69	8,00	5,00	2,00

La mercadería que exceda las tolerancias del Grado TRES (3) o que exceda las siguientes especificaciones será considerada fuera de estándar:

- Humedad: CATORCE COMA CINCO POR CIENTO (14,5%).
- Picados: TRES POR CIENTO (3%).
- Insectos y/o arácnidos vivos: Libre.
- Color: CINCO POR CIENTO (5%) de un color dentro de otro (amarillo, colorado, blanco).
- Tipo: Los maíces duros y dentados admitirán recíprocamente una tolerancia del CINCO POR CIENTO (5%) de un tipo de color dentro del otro.
- Chamico (Datura ferox): DOS (2) semillas cada CIEN (100) gramos.
- Asimismo, aquel maíz que presente olores comercialmente objetables, granos amohosados, aquel tratado con productos que alteren su condición natural, o que por cualquier otra causa sea de calidad inferior, también será considerado fuera de estándar.

La palabra “calidad” aplicada al maíz es una propiedad multifacética y está afectada por diversos factores, algunos de los cuales pueden ser modificados: el cultivar, las prácticas culturales, el manejo poscosecha y el transporte. Actualmente se observa una tendencia hacia la producción de maíces con características de calidad diferenciada para satisfacer los variados aspectos de la demanda. Estas características están directamente asociadas con el uso final del producto y justifican su comercialización con identidad preservada en contraposición al grueso de la producción que lo hace como “commodity”. Los progresos en la utilización del maíz dependerán de la nueva información que se produzca, como resultado de investigaciones, sobre las interrelaciones de las propiedades físicas, químicas y biológicas del grano de maíz con el genotipo, el ambiente de cultivo y el manejo pre y poscosecha (Informe INTA, 2010).

La calidad del maíz está determinada principalmente por la estructura y a composición del grano. Las diferencias en estructura y composición dependen del cultivar así como de las prácticas de manejo, el clima, el suelo y los métodos de cosecha y poscosecha. Algunas características del grano vinculadas a su estructura y composición son:

- *Dureza Endospermica*: contribuye a otorgarle al maíz resistencia mecánica, propiedad deseable para mantener la integridad del grano durante las operaciones de cosecha y poscosecha. Asimismo, la industria de la molienda seca requiere materia prima de grano duro para obtener fracciones de los tamaños adecuados a las distintas aplicaciones de los productos de esta molienda.

- *Almidón*: Las aplicaciones del almidón son múltiples. La modificación (ya sea por tratamientos químicos o por mejoramiento genético) para alterar sus propiedades funcionales amplían aún más el campo de aplicación.

- *Aceite*: es un componente menor del grano de maíz, siendo su concentración de alrededor del 5%. Por selección se consiguió aumentar esa concentración hasta más del 20%.

- *Tocoferoles*: La cantidad y tipo de tocoferoles presentes en el grano de maíz pueden considerarse un factor de calidad ya que ellos poseen actividad provitamínica E y a su vez protegen de la oxidación a las dobles ligaduras de los ácidos grasos insaturados

- *Carotenoides*: son constituyentes del grano de maíz que determinan aspectos de calidad. Estos son precursores de la vitamina A y las xantófilas imparten un color

deseable a la yema del huevo y a la piel de los pollos parrilleros que lo consumen. Los carotenoides funcionan también como antioxidantes (Robutti, 2000).

Según la aplicación del maíz, estos atributos de calidad cobran distinta importancia. Para los alimentos balanceados la calidad requerida varía según el tipo de alimento a elaborar. Los fabricantes de alimentos avícolas requieren maíz de tipo colorado por su alto contenido de pigmentos lo cual evita o reduce el agregado de pigmentos sintéticos. En el caso de la molienda húmeda, la calidad requerida no se orienta hacia ningún tipo en particular (“flint”, dentado o semidentado). La exigencia de esta industria se refiere principalmente a la homogeneidad de las partidas en cuanto a textura y a la ausencia de contaminación por micotoxinas.

Con respecto a la molienda seca, se prefiere el maíz colorado duro por los mayores rendimientos en trozos (“grits”) de tamaño adecuado a diferentes aplicaciones (cervecería, snack, extrusión, etc.) y por la coloración anaranjada, preferida para los “grits” destinados a la preparación de polenta (Robutti, 2000).

Para posibilitar la oferta de granos de alta calidad, dirigida a los mercados mencionados, y teniendo en cuenta que en general los cereales son cosechados con humedades que exceden las requeridas para un correcto almacenamiento, resulta necesario incluir el secado en el tratamiento poscosecha del grano. Este proceso de secado (artificial) debe realizarse de manera tal que se minimicen los daños en la calidad de los granos. Para el caso específico de los copos de maíz (“corn flanes”) obtenidos por molienda seca se requieren pedazos grandes (“flaking grits”), lo que no admite la polifisuración del grano previa a la molienda, por ello las condiciones de secado deben ser tales que se eviten las fisuras de los granos.

## **1.2 Secado de granos**

El secado de granos se define como la operación unitaria responsable de la reducción de su contenido de humedad, generalmente por evaporación en una corriente de aire, hasta un nivel considerado seguro para el almacenamiento. Se entiende que un nivel de humedad es seguro cuando reduce la actividad respiratoria de los granos y se dificulta el desarrollo de hongos e insectos. Ese nivel depende del tipo de grano, pero en general está en el rango 10 - 14% de humedad en base húmeda (b.h.) (Informe FAO, 2010). En el caso de maíz las normas establecen un valor de 14,5% b.h. (Tabla 2). El desarrollo de insectos requiere, asimismo, un control estricto de la temperatura, que no debe superar los 18°C en promedio.

Los granos se cosechan húmedos por varias razones: al llegar a la madurez fisiológica, los productos agrícolas y en especial los granos presentan, en la mayor parte de los casos, un contenido máximo de materia seca, pero también un elevado porcentaje de agua. Esto último acarrea algunas dificultades, pues los granos muy blandos dificultan la cosecha mecánica. Es preciso entonces que la cosecha se realice lo antes posible, siempre que los granos la soporten. Esto presenta algunas ventajas, tales como un mayor porcentaje de materia seca, menor contaminación del producto en el campo, menores pérdidas por volteo de plantas, menor pérdida por ataque de depredadores y mayor porcentaje de germinación (Informe FAO, 2010). Además, puede ser conveniente por el precio de los granos (que a veces es mayor justo antes de la nueva cosecha), por la necesidad de liberar antes la tierra para otros fines, por la conveniencia de ampliar el periodo de cosecha (mayor aprovechamiento del trabajo de los cosechadores) y por razones climáticas tales como lluvias frecuentes en verano tardío otoño temprano, que es la parte del año en la que se realiza la cosecha (Jayas y White, 2003).

El secado artificial de los granos (en secaderos con aire forzado) es un proceso que se lleva a cabo a nivel masivo en secaderos continuos de aire caliente, y demanda un elevado consumo de energía. Un sistema de secado y almacenamiento exige costos de inversión relativamente altos. La adquisición de tal sistema requiere además la capacitación técnica del operador para que se puedan aprovechar los beneficios que esa tecnología ofrece, dado que las ventajas del sistema implementado dependen del buen manejo. Debido a los costos iniciales mencionados, para que el uso de las técnicas de secado y almacenamiento sean económicamente viables, la producción debe superar un cierto umbral. Con todo, es un error suponer que el secado y almacenamiento es recomendable sólo para grandes producciones; la variedad de sistemas existentes permiten extender su utilización a un rango amplio de niveles de producción. En los métodos de secado más modernos, los intercambios de calor y masa entre granos y ambiente se producen principalmente por convección forzada del aire. Por tal motivo, los secadores de granos están provistos de ventiladores como agente de movimiento del aire. La falta de energía eléctrica para impulsar estos ventiladores en algunos países y zonas es una de los mayores impedimentos para la popularización del sistema de secado y almacenamiento en chacra (Informe FAO, 2010).

Los procesos usados para secar los granos pueden dividirse en dos grandes categorías: secado a baja temperatura (SBT), en el que se emplea aire a temperatura

ambiente o, como máximo, a temperatura ambiente + 5°C, y secado a alta temperatura (SAT) en el que el aire se utiliza a temperaturas mayores de 50°C (Brooker y col., 1992). Por otra parte, el secado puede ser realizado en silos (“in bin-drying”), comúnmente usados para el almacenamiento y el SBT, o en secaderos continuos de mayor capacidad de producción, en los que se emplea normalmente SAT.

En el secado en silo el sólido está estacionario, conformando un lecho profundo (“deep bed”) ó lecho fijo (“fixed bed”) de partículas, y el aire circula a través de los huecos intergranulares desde el fondo hasta el tope del lecho, impulsado por un ventilador. No obstante, el intercambio de humedad desde el grano hacia el aire, tiene lugar en una zona de espesor relativamente estrecho, denominada zona de secado, cuyo límite superior es una línea conocida como frente de secado. La zona de secado está en el fondo del lecho al comienzo y va moviéndose lentamente hacia arriba al progresar el proceso. A medida que transcurre el tiempo, el lecho de granos tiende al equilibrio con el aire, siendo la parte inferior la que primero lo alcanza. Dado que esta zona de secado es estrecha, no es posible secar los granos en silos de lecho alto y esto determina el espesor (0,15-0,40 m) de las columnas de las secadoras de granos (Brooker y col., 1992).

El SAT, por otra parte, es un método práctico y flexible para secar maíz destinado a la alimentación animal, aunque deshidrata excesivamente la periferia del grano y causa tensiones mecánicas que pueden ocasionar granos fisurados y, luego de cierto manejo mecánico, granos partidos (Gunasekaran y Paulsen, 1985; Montross y col., 1999; Davidson y col., 2000; Kim y col., 2002; Zhu y col., 2004). Además este proceso es el que mayor cantidad de energía consume en el proceso de producción de granos (Hansen y col., 2008).

El SBT permite obtener mejor calidad de granos y ahorrar energía si se implementa de forma apropiada.

### **1.3 Secado a baja temperatura**

#### **1.3.1 Características**

El SBT, que recibe otras denominaciones equivalentes, además de secado a baja temperatura (“low temperature drying”), como secado natural (“natural air drying”), secado casi ambiente ó (“near ambient drying”) ó simplemente secado “con aire”, es un método de secado que se lleva a cabo en silos de almacenamiento ó celdas especialmente acondicionadas usando aire ambiente. Se caracteriza por usar sólo la



energía eléctrica para el ventilador que mueve el aire, ya que el aire aporta la energía térmica necesaria para evaporar la humedad y conducirla hacia el exterior del sistema. En algunos casos, sin embargo, se adiciona un calefactor para aumentar algunos grados la temperatura del aire.

La transferencia de masa en este proceso está sujeta a considerables perturbaciones procedentes de las fluctuaciones de la humedad y temperatura ambiente (Ryniecki y col., 2007).

En el SBT se produce una competencia entre dos procesos: el progreso del secado y el deterioro biológico del grano. Los granos que están debajo de la zona de secado están en general suficientemente secos como para evitar el deterioro, mientras que los granos que están encima permanecen húmedos (aproximadamente a su contenido inicial de humedad) hasta que llega el frente de secado (Figura 1.7). El flujo de aire en el SBT suele ser ascendente para que la capa húmeda esté arriba y sea más fácil de inspeccionar (Wilcke y Morey, 1997). El espesor de la zona de secado es de 0,3 a 0,6 m en el SBT de maíz (Wilcke y col., 1993).

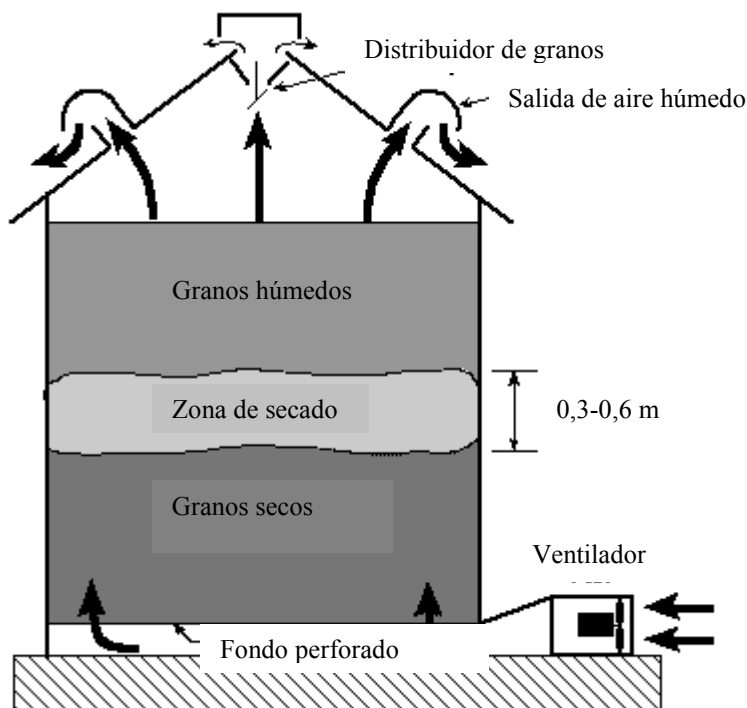


Figura 1.7. Zonas de secado en el lecho de un secadero a bajas temperaturas (adaptado de Wilcke y Morey, 1997).

Las características típicas del SBT son las siguientes (Hansen y col., 2008):

- El proceso de secado es lento, generalmente requiere de 3 a 4 semanas

- La humedad inicial normalmente está limitada, aproximadamente a no más de 22% a 24% p/p
- El secado se produce mediante la circulación de aire en condiciones ambientales a flujos de 1-2 pie<sup>3</sup>/bushel. Siendo el bushel de volumen equivalente a 0,03524 m<sup>3</sup>, la conversión al sistema SI conduce al rango de 0,013 a 0,026 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> s
- El secado y el almacenamiento pueden realizarse en el mismo silo, minimizando la manipulación de grano
- El silo está equipado con un fondo ó tubo perforado, uno o más ventiladores de alta capacidad, un distribuidor de granos y escaleras
- Se usa equipo de limpieza para remover los granos rotos y los finos

Trabajos preliminares realizados en Inglaterra han despertado la atención hacia el secado natural, proponiendo el uso de aire levemente calentado para ventilar lechos delgados de granos. Se estableció el mecanismo del proceso de secado natural: la existencia de una zona de secado que se mueve a través del lecho. Se usó luego aire con la temperatura incrementada en 5°C usando el calor del ventilador. Se comenzaron a usar sensores de humedad relativa del aire para encender el calefactor cuando ésta excedía un valor admisible. Ante la dificultad práctica que se encontró al secar lechos de cierta profundidad, se recomendó limitar la altura en el caso de granos muy húmedos.

Este método comenzó a utilizarse inicialmente en forma artesanal, controlándose en forma manual y según la experiencia del operador (Smith y Bailey, 1983). En Inglaterra se cosechan granos finos en verano, cuando las temperaturas mínimas son de aproximadamente 10-14°C y las máximas, 19-24°C. Es un rango ideal para realizar el SBT porque suficientemente altas como para deshidratar el grano (teniendo en cuenta que la humedad relativa puede bajar a menos de 60% en las horas de la tarde), aunque no tanto como para promover un desarrollo microbiano considerable.

### **1.3.2 Ventajas y desventajas del SBT**

Las fuentes de energía convencionales que se utilizan para el calentamiento del aire en los distintos sistemas de secado, tales como gas natural, gas licuado de petróleo (GLP, principalmente propano), combustibles líquidos (gasoil ó kerosene), son no renovables. La electricidad puede ser renovable ó no, dependiendo de cómo sea producida. Aún cuando se trate de electricidad procedente de la energía solar fotovoltaica y la eólica (renovables), existe el problema del almacenamiento de esa

energía, siendo ideales las tecnologías que conducen a sistemas interconectados inteligentes, donde la energía eléctrica fluye del punto de generación a la red cuando sobra y en sentido contrario cuando falta. Sería deseable que el desarrollo tuviera ese fin, dado que hay países muy avanzados que ya lo están aplicando (Schoenau y col., 1995).

Actualmente hay una gran preocupación acerca de la dependencia de los combustibles fósiles y su efecto negativo en el ambiente. El suministro limitado junto al costo creciente de los combustibles tiene cada vez más impacto en los costos de la producción agrícola. No obstante, los precios de los cereales y oleaginosas se han incrementado mucho en los últimos 10 años, amortiguando el efecto mencionado. Aunque una alternativa es el uso de fuentes renovables de energía, cualquier oportunidad disponible para conservar energía o evitar su uso debe explorarse (Hansen y col., 2008). En una publicación relativamente reciente (Zimmerman, 2006) se establece que “ambos aspectos de la conservación de energía tienen que ser considerados: la eficiencia y la elección deliberada de no usarla si puede evitarse. Este debería ser el nuevo símbolo de status de la sociedad, para el bien de las actuales y futuras generaciones”.

El uso de SBT ofrece una oportunidad inusual para participar de esos nuevos valores culturales y reducir el uso de combustibles fósiles. La energía que se usa para el secado de granos puede ser la oportunidad primaria para reducir la energía total empleada en la producción de maíz. Existen algunos estudios comparativos entre SAT y SBT, que han arrojado resultados dispares, según la situación analizada. Así, Hansen y col. (2008) encontró que para la remoción de 10 puntos de humedad mediante SBT se requiere un tercio de la energía requerida por SAT, en las condiciones estudiadas para el secado de maíz en Ohio, EE UU. La energía eléctrica requerida para el SBT depende de la humedad inicial del grano, el clima, el flujo de aire y la eficiencia del ventilador. Si se usan calefactores eléctricos para el aire, el consumo puede llegar a duplicarse (Wilcke y Morey, 1997). Wilke y col. (1993) estudiaron, usando un simulador y datos meteorológicos de 36 años de Miniápolis (Minnesota), distintas estrategias para ahorrar energía en el SBT de maíz, analizando la probabilidad de éxito (% de años en los que se logra el 15,5% de humedad y menos de 0,5% de pérdida de materia seca) y el consumo de energía. Concluyen que para las condiciones consideradas la mayor parte de las estrategias analizadas permiten ahorrar el costo de la energía, en el orden de un 40 % con el uso controlado de electricidad, evitando los horarios pico de mayor costo,

(aunque los ventiladores deben ser de mayor tamaño) y reduciendo la altura del lecho. Y del orden del 15% disminuyendo el flujo de aire (esto implica aceptar un riesgo mayor de deterioro biológico) y usando variedades de maíz resistentes a los hongos o inhibidores de hongos (al posibilitar el aumento del tiempo de almacenamiento). El cambio de la fecha de cosecha no influyó en el consumo de energía.

Además del costo de la energía, deben considerarse también otros costos asociados al secado, tales como la mano de obra, equipamiento (secadero y auxiliar), reparaciones, mantenimiento, impuestos y seguros. Si el grano va ser almacenado en el campo, para el SBT se requiere sólo algunos equipos extra. En lo que respecta a mano de obra la demanda es alta en el SAT durante el secado pero no tanto en el almacenamiento, para el SBT es alta para el secado. En definitiva, el método más económico depende de los costos relativos de todos los ítems involucrados en el lugar y de la meteorología local, por lo cual se requiere evaluar cuidadosamente cada situación particular (Wilcke y Morey, 1997).

Es posible tomar ciertas medidas para reducir los costos del SBT, tales como usar silos de mayor diámetro y más bajos (lo que reduce la pérdida de carga y por lo tanto requiere menor energía para el ventilador), usar los menores caudales de aire posibles, y elegir la época de siembra de modo que la cosecha se realice con el tiempo más cálido (Wilcke y Morey, 1997).

Una ventaja muy importante del SBT es la calidad final del grano, ya que produce muy baja proporción de granos fisurados y baja variabilidad en la humedad intragranular. Estos son parámetros de calidad muy requeridos para ciertos tipos de granos, como maíz pisingallo, maíz blanco y maíces destinados a molienda seca (Bartosik, 2006). Los procesadores de maíz tienen requerimientos estrictos de calidad para su materia prima, incluyendo menos del 20% de granos rotos. La alta demanda de maíz de alta calidad crea la oportunidad para los productores de granos de conseguir mejores precios por su producto, si utilizan SBT (Bartosik y Maier, 2004).

Las dinámicas industrias de los cereales de desayuno, y de alimentos de copetín (“snack”) requieren, en muchos casos, granos de maíz que presenten una alta integridad estructural. En el caso de maíz, la aplicación más importante desde este punto de vista es la fabricación de copos de maíz (“corn flakes”) (Pantanelli, 2006).

Para el caso del maíz pisingallo el factor de calidad más importante es el volumen de expansión, el cual depende principalmente de la humedad de cosecha y la temperatura de secado. Cuando la humedad de cosecha aumenta y la temperatura de

secado es mayor, se observa una sustancial disminución en el volumen de expansión, debido a la fisuración del pericarpio, ya que la presión del vapor debe subir para que reviente.

Por estos motivos, el SBT ha sido el principal método de secado empleado por los productores y procesadores de maíz pisingallo en EE.UU. (Informe 33 INTA, 2008). El SBT es atractivo también para la producción de semillas, puesto que con este sistema se puede mantener la calidad del producto cosechado mejor que con el uso de SAT (Informe FAO, 2010).

En lo que respecta a la producción de bioetanol a base de maíz, el SBT ofrece ventajas ya que si el grano es sometido a temperaturas excesivas el rendimiento de etanol es menor (Hansen y col. 2008).

El secado de granos a bajas temperaturas presenta buenas perspectivas en otro aspecto: la necesidad de ampliar la capacidad de almacenamiento de los campos, para lo cual esta tecnología reviste especial interés económico.

Una limitante del secado a baja temperatura es el relativamente largo período de secado, ya que para secar maíz de 20 a 15% con un caudal de  $1 \text{ m}^3/(\text{min t})$  ó  $0,013 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$  se requieren entre 3 y 7 semanas, según las condiciones climáticas del lugar. Esto implica que los granos de la capa superior del lecho van a permanecer húmedos (aprox. a la humedad a la que fueron cosechados) durante un largo periodo de tiempo. Esto conforma una zona de riesgo con posibles pérdidas de materia seca y calidad de grano y es especialmente crítico en zonas de alta temperatura ambiente (Bartosik, 2006).

El mayor desafío para el almacenamiento y manejo de los granos es la medida y monitoreo de su humedad, desde que se cosecha hasta que se vende. Si permanece mucho tiempo húmedo sufrirá deterioro biológico y si está demasiado seco significa que se malgastó energía y se perdió masa por sobresecado, con las consiguientes pérdidas comerciales (Hansen y col., 2008).

Las ventajas y desventajas del SBT, en comparación con el SAT usando gas como combustible, pueden resumirse en los siguientes listados (Wilcke y Morey, 1997):

Ventajas:

- Se requiere menos equipamiento
- Requiere menos mano de obra en la cosecha: sólo llenar el silo y encender el ventilador (siempre que se trate de situaciones en las que el equipo está en el campo mismo)

- No se demora la cosecha, al secarse durante el almacenamiento. Una vez alcanzada la humedad de cosecha recomendada, los silos se pueden llenar a medida que se coseche (siempre que el secado se lleve a cabo en el silo mismo de almacenamiento)
- Se obtiene mejor calidad de granos
- Se usan menos unidades de energía por unidad de agua removida, aunque es energía eléctrica, que es más cara que el gas

Desventajas:

- A veces el secado no puede completarse en invierno, no es problema con el deterioro si las temperaturas son bajas pero no se puede comercializar el grano
- En años de inviernos cálidos parte del grano de la capa superior deber ser removido para evitar el deterioro
- Si bien el tiempo de secado y el consumo de energía pueden estimarse, dependerán fuertemente de las condiciones climáticas
- La humedad del maíz debe ser inferior al 23% para el secado seguro completo en el silo
- Los granos de las capas inferiores se sobresecan (humedad menor al valor especificado en años secos)
- Como es un proceso lento existe riesgo de deterioro biológico
- Aumenta la demanda eléctrica. El SBT consume aproximadamente 1 kWh cada 35 m<sup>3</sup> de lecho.

### **1.3.3 Equipamiento**

El equipamiento básico necesario para el SBT consiste en un silo con fondo perforado o provisto de caños perforados de distribución de aire, un ventilador y un sistema de distribución de aire y venteo y, como equipos adicionales, agitadores de granos e intercambiadores para calentar el aire. El calentamiento del aire (recomendado en no más de 2-3°C) puede ser necesario dependiendo de las condiciones climáticas, pero hay que tener en cuenta que aumenta el costo y puede producir sobresecado en las capas inferiores del lecho (Wilcke y Morey, 1997). Las instalaciones de almacenamiento existentes en los campos pueden ser convertidas para el SBT; básicamente se requiere instalar ventiladores, una unidad de calentamiento de aire, un sistema de control y un sistema de distribución de aire y venteo, considerando un silo con piso perforado y un sistema de carga de granos (Hansen y col., 2008).

Es esencial lograr una distribución uniforme del aire en la sección transversal del lecho. El silo con fondo plano lleno hasta el borde superior y provisto de un piso completamente perforado sobre el plenum es el que permite la mayor uniformidad en la distribución del aire. Se pueden usar otras configuraciones, tanto para silos de fondos planos (Figura 1.8) como para silos de fondos cónicos (Figura 1.9). Si bien lo más común es la circulación ascendente del aire, también hay sistemas con circulación descendente y horizontal (Figura 1.10) (Jayas y White, 2003).

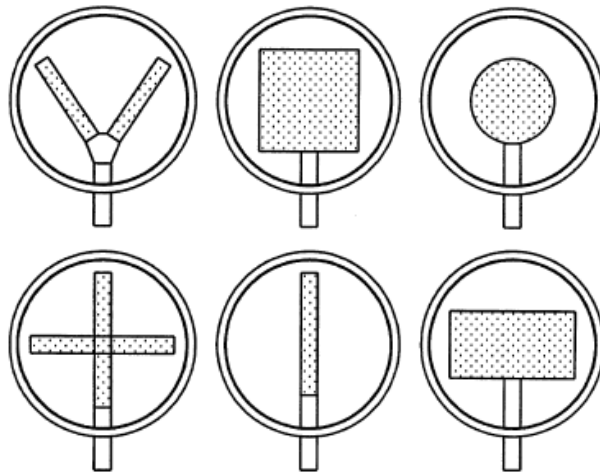


Figura 1.8. Configuración de tubos de distribución perforados para el ingreso de aire en silos de fondo plano (Jayas y White, 2003).

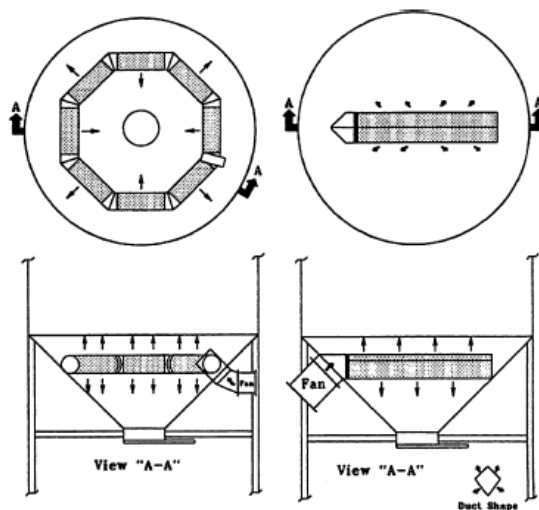


Figura 1.9. Configuración de tubos perforados de distribución de aire para el ingreso de aire en silos de fondo cónico (Jayas y White, 2003).

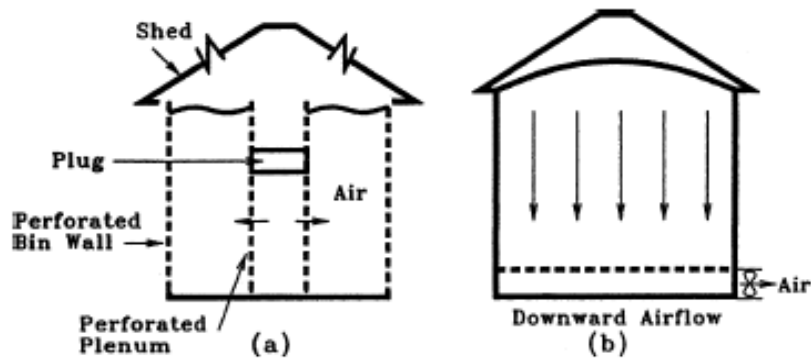


Figura 1.10. Configuraciones alternativas para la circulación del aire. (a) flujo horizontal (b) flujo descendente (Jayas y White ,2003).

### 1.3.4 Variables que inciden en el SBT

El tiempo que lleva el SBT de los granos es función de la velocidad de secado, la que, a su vez depende principalmente de:

- i. las condiciones ambientales : humedad y temperatura del aire de entrada
- ii. el contenido de humedad inicial del grano
- iii. el flujo de aire que provee el ventilador
- iv. la altura del lecho en la dirección del aire

Siendo importante la interrelación entre estas variables. Wilcke y Morey (1997) presentan las combinaciones de humedad inicial (22-25%) y flujos de aire (0,01-0,04  $m^3/(m^3 s)$ ) recomendadas para evitar el deterioro biológico en el SBT de maíz en regiones del norte de EEUU. Asimismo presentan una estimación del tiempo que un grano puede permanecer a humedades (18-26%) y temperatura (-7 a 21°C) dadas sin sufrir deterioro, lo que debe ser tenido en cuenta para limitar el tiempo de secado.

Si las *condiciones ambientales* no son favorables, el aire puede ser precalentado antes de pasar por el lecho para aumentar la velocidad de secado y evitar el deterioro del producto aunque esto ocasiona un aumento en los costos operativos y de capital y un potencial deterioro de la calidad de los granos por sobresecado.

El *contenido de humedad inicial* depende de la humedad de cosecha, el mínimo daño por cosecha se produce entre el 19 y 24% (Hansen y col., 2008).

Los límites para la *profundidad del lecho* y el *flujo de aire* se fijan al instalar el secadero: la profundidad máxima depende del costo de capital de espacio vertical versus horizontal y del método de llenado mientras que el flujo de aire depende del costo del ventilador y del costo y disponibilidad de energía. Dependiendo de las configuración del



sistema, el operador puede tener algún grado de control sobre la profundidad y el flujo de aire (Sharp, 1984).

Para lechos muy altos, la potencia requerida para operar el ventilador se torna muy grande y por lo tanto, es económicamente inviable (Schoenau y col., 1995).

La elección de un *flujo de aire* adecuado tiene vital importancia para el éxito de los sistemas de secado a bajas temperaturas. Si el flujo de aire es inferior al valor adecuado, hay demora en el secado y se puede comprometer la calidad del producto. Si el flujo de aire es superior al valor adecuado, si bien disminuye el tiempo de secado, aumenta el consumo de energía para accionar el ventilador y aumenta, por tanto, el costo operativo del sistema, además de exigir una mayor inversión inicial.

Los flujos de aire recomendados para el secado, que también se conocen como flujos mínimos de aire, se refieren normalmente a la unidad de volumen del lecho. El flujo mínimo de aire depende de varios factores: tipo de producto, clima de la región, contenido de humedad inicial. La dependencia del tipo de grano está ligada a la susceptibilidad al deterioro que los granos debido a su composición química y a la facilidad que tienen los hongos para penetrar en su interior en busca de alimento. Así, las necesidades de aire para secar el arroz son diferentes de las del maíz. La influencia del clima de la región determina el potencial de secado: en regiones en las que hay grandes probabilidades de que ocurran períodos prolongados de elevada humedad relativa durante la época de secado, se necesita un flujo de aire mayor o bien calentamiento suplementario, o ambas cosas, por el mayor riesgo de deterioro. El contenido de humedad inicial también es un factor que determina el flujo mínimo, pues está directamente relacionado con la susceptibilidad del producto al ataque de hongos. Los granos que tienen un alto contenido de humedad proveen un mejor ecosistema para el desarrollo de hongos, por lo que están más expuestos al deterioro. Así, los productos cuyo contenido de humedad inicial es alto necesitan un flujo de aire más intenso. El flujo de aire requerido para el secado natural puede ser hasta 100 veces mayor que el utilizado para enfriar y uniformar la temperatura del lecho (Tabla 1.3). Cabe aclarar que este flujo se basa en el riesgo de deterioro, para determinar el flujo adecuado debe tenerse en cuenta también el consumo de energía.

El flujo de aire es crítico para la velocidad de secado. Los resultados experimentales suelen diferir de los simulados por este motivo, y los errores se deben al uso de modelos no realistas del ventilador, las fugas y la distribución no uniforme que se dan en la práctica (Sharp, 1982).

Tabla 1.3: Requerimiento de flujo de aire para distintos objetivos (Informe INTA, 2008).

Objetivo	Flujo de aire (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> s)
Enfriar y uniformar temperaturas de grano seco	0,0007 a 0,002
Mantener frío grano húmedo	0,006
Secado y enfriado en seca-aireación (grano caliente con 1-2% de exceso de humedad respecto del valor de comercialización)	0,01 a 0,017
Secado con aire natural	0,03 a 0,1

Para el caso estudiado por Bartosik (2006) basado en resultados de simulaciones, el caudal de aire óptimo se encuentra entre 1 y 1,5 m<sup>3</sup>/ (min t) (0,013 y 0,019 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> s), lo que es de 10 a 15 veces mayor que el caudal requerido para aireación de mantenimiento de granos almacenados en silos.

Biondi y col. (1988) determinaron la factibilidad del secado de maíz a bajas temperaturas en tres ambientes climáticos de Italia (Milán, Bologna y Perugia), calculando el flujo mínimo de aire para obtener un valor máximo de humedad promedio del lecho del 14%, y una pérdida de materia seca menor al 0,5% en la capa superior, teniendo en cuenta la fecha de cosecha, la humedad inicial del grano y distintas estrategias operacionales. Para 25% de humedad inicial obtuvieron valores de caudales de aire en el rango de 340-700 m<sup>3</sup>/ (h t) (0,07-0,14 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> s) sin calentamiento del aire y en el rango 220-350 m<sup>3</sup>/ (h t) (0,04-0,07 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> s) con un calentamiento del aire de modo de elevar su temperatura en 2°C.

Gunasekaran y Shovet (1986) consideraron el flujo de aire en el rango de 0,02 a 0,07 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> s) como una función del tiempo de secado y con variación periódica, de modo de obtener el mínimo flujo diario de aire para el secado en un tiempo especificado. Este tiempo debe ser suficiente para lograr la humedad final promedio deseada (14,5% b.h), lo cual se determina simulando la operación del secadero y comparando con el máximo tolerable por los granos para evitar el deterioro biológico.

### 1.3.5 Consumo específico de energía en el SBT

El consumo de energía en un secadero no se debe medir solamente en unidades de combustible usadas en el proceso. Es importante que se relacione este consumo con la cantidad correspondiente de agua evaporada, de ahí la necesidad de definir un elemento

que sirva de término de comparación entre diferentes estrategias e incluso entre diferentes secaderos. Ese término, bien aceptado ya en la comunidad científica, es el que se suele denominar eficiencia térmica de secado y se define como: "relación entre la energía que requiere la evaporación del agua en el proceso y la energía incorporada desde fuentes externas". Otra forma de evaluar el consumo de energía en relación a la usada para evaporar el agua es el consumo específico de energía, definida como: "la energía consumida por unidad de masa de agua evaporada". El consumo específico de energía varía con diversos parámetros, siendo los más importantes la velocidad de secado, las condiciones ambientales y el tipo de secadero empleado.

Para el SBT, en principio la energía requerida para remover la humedad del grano puede ser menor que el calor latente medio de desorción del agua (2,5 MJ/kg), dado que se usa el potencial natural del aire para evaporar humedad del producto; por lo tanto, el sistema puede ser muy eficiente. En cambio, para el SAT la energía requerida es principalmente en forma de calor directo, el sistema se opera bajo condiciones estables de aire y del grano, de modo que es posible reducir el uso de energía mediante recirculación de aire (que se calienta con combustible), pudiéndose llegar a consumos específicos del orden de 3,4 MJ/kg de agua evaporada, lo cual implica una eficiencia térmica de hasta 75% ( $2,5/3,4 = 75\%$ ) en algunos casos. Sin embargo, el calor latente no puede recuperarse.

Para el SBT se usa energía eléctrica (más cara que el combustible) y además se enfrenta la dificultad de lograr una operación eficiente con condiciones variables del aire de entrada. Se ha encontrado un consumo de energía promedio para el SBT de 2,9 MJ/kg de agua evaporada, siendo la mitad (1,5 MJ/kg) si el clima es favorable y el doble (5,8 MJ/kg) si no lo es (Sharp, 1982). Obsérvese que si el consumo específico de SBT es menor de 2,5 MJ/kg no tiene sentido usar la eficiencia térmica, que daría mayor a 100%. En tal caso se observa que es la capacidad natural de secado del aire la que aporta un calor que no interviene en el cálculo de la eficiencia. De todas maneras el uso del consumo específico sí tiene sentido porque relaciona la energía consumida (que resulta de multiplicar la potencia consumida en promedio por el ventilador por el tiempo neto de encendido) y la masa de agua evaporada.

Sun y col. (1995) realizaron un estudio mediante simulación de tres estrategias de control para SBT de cebada, utilizando datos meteorológicos de cuatro años para el mes de septiembre en una localidad de Inglaterra y encontraron consumos de energía en el

rango de 3-6 MJ/kg, siendo mayores en los casos en que se incluyó el intercambiador para adicionar calor al aire.

Por tanto, para que el SBT resulte energéticamente eficiente se requiere controlar la energía que consume el ventilador y el posible uso de calor suplementario, además de considerar el manejo del llenado del secadero, el tiempo de cosecha y el efecto del clima.

### **1.3.6 Criterios para considerar finalizado el secado**

El secado se considera finalizado cuando se alcanza el valor deseado de humedad de los granos, pero en el caso de SBT debido a que la humedad generalmente decrece del tope a la base se requiere decidir que humedad se considera. En general los autores establecen como criterio de finalización que la humedad en la capa superior (es decir la más húmeda) corresponda al valor de almacenamiento seguro y en algunos casos también se establece la humedad promedio en el lecho.

Para el SBT de maíz, pueden citarse algunos ejemplos de criterios de finalización de secado: Sharp (1984) considera la humedad promedio del lecho de 15,5% (condiciones para Inglaterra) y la capa mas húmeda inferior al 16% mientras Biondi y col. (1988) establecen la humedad promedio en el lecho de 14% , Bartosik y Maier (2004) y Bartosik (2006) fijan una humedad final promedio menor que 15% y una humedad final máxima menor que 16% mientras Wilcke y Morey (1997) establecen que el frente de secado debe llegar a la parte superior del lecho, es decir que la humedad en la última capa alcance el valor deseado (14-15%).

A los efectos prácticos, para verificar estos criterios se requiere medir la humedad del grano, lo cual puede ser dificultoso. Ryniecki y col. (2007) desarrollaron un método para la determinación automática del punto final de secado (momento en el cual la capa superior alcanza la humedad segura de almacenamiento) para SBT de cebada, basado en una correlación (isoterma de equilibrio modificada por una constante determinada empíricamente) para inferir el contenido de humedad del grano a partir de la humedad relativa y la temperatura del aire de salida. Resultaría así como una isoterma cuya constante de “no equilibrio” dependerá de cada sistema en particular.

## **1.4 Modelado y simulación de secaderos**

En los secaderos de lecho profundo, la forma de transferencia de energía que prevalece es la convección y existen “perfiles” de temperatura y humedad, es decir,

curvas de esas variables en función de la coordenada en la profundidad de lecho. Estas, a su vez varían con el tiempo. Los modelos de capa delgada no describen los procesos de transferencia que ocurren en los lechos profundos, debido a que no hay perfiles de temperatura ni de humedad en la capa delgada. Por lo tanto ninguna de las ecuaciones que describen los procesos en capas delgadas pueden caracterizar a los sistemas de secado en lecho profundo (Srivastava, 2002). En el SBT, resulta fundamental la predicción de las curvas de secado e historias térmicas del producto en distintas condiciones operativas, a efectos de conocer en detalle el desarrollo del proceso para pronosticar la exposición de los granos a condiciones de alta temperatura y alta humedad que puedan promover el deterioro biológico (Sauer, 1992). Asimismo, desde el punto de vista de la producción, el cálculo del tiempo total de secado representa un aporte primario y fundamental del modelo matemático. Por estas razones, es importante contar con un modelo matemático de secado en lecho fijo, que sea capaz de predecir la transferencia de calor y materia aire-grano a distintos flujos de aire. La disponibilidad de un modelo adecuado para el secadero permite mejorar tanto el diseño del equipo como la optimización de su operación (Sun y col., 1995).

La simulación del SAT, que suele realizarse en condiciones operativas constantes de aire de entrada, permite determinar con mayor facilidad la cantidad de humedad que el secadero puede remover por hora, los contenidos de humedad inicial y final del grano, el consumo de energía, la producción del secadero y el costo del secado. En cambio, en el SBT la simulación presenta una incertidumbre mayor, y es más compleja: deben considerarse algunos factores que influyen en el proceso, tales como las condiciones meteorológicas, la profundidad del lecho y el flujo de aire, así como estimar la evolución de la calidad del grano. Además, es necesario establecer estrategias de operación. Para que los modelos resulten útiles para el diseño del equipo y la optimización de las estrategias operacionales, el tiempo de computadora insumido debe ser adecuadamente breve. Así, resulta necesario tener en cuenta el compromiso entre el desarrollo de modelos muy complejos que pueden dar resultados potencialmente más exactos pero con altos tiempos de cómputo y modelos más simples de menor tiempo de cómputo pero que omitan la consideración de factores que pueden resultar relevantes. El modelo debe ser flexible, robusto y capaz de tener en cuenta un amplio rango de condiciones del aire y del grano (Sharp, 1982).

El diseño y la operación del SBT mediante pruebas experimentales a escala resultan costosos, y no es siempre práctico llevarlas a cabo en toda la variedad de

condiciones climáticas y en todo el rango de estrategias de manejo. Por lo tanto el modelado matemático del SBT es una herramienta invaluable para tener en cuenta estas interacciones y para realizar comparaciones entre distintas estrategias de operación (Sun y col., 1995).

Como el comportamiento de un secadero de granos a baja temperatura depende fuertemente de las condiciones ambientales, cuestiones tales como la selección del ventilador, la profundidad del lecho y el manejo del secadero no podrán resolverse exitosamente si no se tienen en cuenta las condiciones climáticas, que dependen del lugar geográfico (Sharp, 1984). Las técnicas de simulación que incluyen el modelo matemático del proceso de secado y los datos meteorológicos proveen un método apropiado para el estudio de los factores de diseño y control de estos secaderos, lo que sería prácticamente imposible de realizar en forma experimental. La investigación experimental en SBT está limitada no sólo por la irrepetibilidad de las condiciones climáticas, sino también por la gran cantidad de granos requerida y los largos tiempos de secado (Sharp, 1984).

La mayor ventaja de los modelos validados para simulación es su habilidad para responder preguntas del tipo, Qué pasa si? y permiten obtener resultados para distintos lugares, usando los datos meteorológicos locales (Jayas y White, 2003).

Básicamente los modelos de secado de granos, tanto de alta como de baja temperatura, pueden clasificarse como *modelos de parámetros concentrados* ó *agrupados* y *modelos de parámetros distribuidos*. Los modelos de parámetros concentrados relacionan la humedad de salida del secadero con la humedad de entrada y el tiempo de secado. Los demás factores (temperatura y flujo del aire, dimensiones del secadero) se agrupan en uno o más coeficientes que deben ser determinados (generalmente por aplicación del modelo a datos experimentales o predicciones de modelos de simulación ya validados). Estos modelos son simples pero tienen varias limitaciones, entre las que pueden mencionarse la necesidad de determinar los parámetros y la falta de predicción de la distribución espacial de humedad en el secadero debido a su simplificación. Los modelos de parámetros distribuidos son más completos y proveen información detallada del proceso, tal como el perfil de humedad del grano en el secadero a distintos tiempos. Por tanto, los modelos de parámetros distribuidos son superiores como modelos de proceso y, si bien requieren mayor tiempo de cómputo, teniendo en cuenta que actualmente los costos computacionales se han

reducido considerablemente, esto ya no constituye una desventaja importante desde el punto de vista de la simulación (Lufty y col., 2008).

Uno de los modelos de parámetros distribuidos más comúnmente empleado es el modelo de ecuaciones diferenciales que se basa en las ecuaciones de conservación de masa y energía, para el grano y para el aire, que conduce a un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales parciales no lineales (modelo EDP). Otra clasificación distingue a los modelos de equilibrio (EQ) de los de no equilibrio (NEQ). En el primer caso se considera que la humedad del sólido alcanza el valor de equilibrio con el aire con el que está en contacto en cada capa, con lo cual sólo es necesario disponer de la ecuación de equilibrio para el grano, mientras que en el segundo caso no se asume que se llega al equilibrio y por lo tanto se requiere una ecuación cinética que represente la velocidad de secado (Brooker y col., 1992).

Hay distintas versiones de los modelos EDP: modelos complejos que tienen en cuenta muchos factores y modelos que surgen de la consideración de hipótesis simplificativas. Así pueden encontrarse casos en los que se desprecian los términos de acumulación del vapor o la energía en aire, obteniéndose lo que se suele denominar como modelo pseudo estacionario, en este trabajo se lo denominará EDP-PsEst, para distinguir del modelo completo ó totalmente no estacionario (EDP-NEst) (Brooker y col., 1992). Hay evidencias en trabajos publicados acerca de la inexactitud de los resultados predichos por modelos que desprecian los términos de acumulación en el aire en ciertas condiciones (relación altura lecho/velocidad del aire  $< 0,2$  s;  $T_a \leq 30^\circ\text{C}$  y  $h_{ra} \geq 50\%$ ) (Wang, 1993; Aregba y Nadeau, 2007).

Srivastava y John (2002), para el secado de maíz a alta temperatura, usaron un modelo EDP-NEst-NEQ con una ecuación semiempírica de capa delgada para calcular la velocidad de secado, a efectos de predecir los perfiles de humedades y temperaturas en el lecho así como estudiar la influencia de la velocidad del aire y la porosidad del lecho. El sistema de ecuaciones resultantes queda integrado en este caso particular por tres ecuaciones diferenciales parciales y una ecuación diferencial ordinaria (para el balance de humedad en el grano) y, para resolverlo usan un esquema numérico de diferencias finitas implícito y el método de Runge Kutta.

Sun y col. (1995) propusieron un modelo secado de granos en lecho fijo en el que incluyeron los efectos de condensación y rehumedecimiento, conservando los términos de acumulación.

Por su parte, Giner (1999) y Giner y Bruce (1998) desarrollaron un modelo EDP-PsEst-NEQ, despreciando los términos de acumulación de la humedad y temperatura del aire frente a los respectivos aportes convectivos para resolver numéricamente con el método de Runge Kutta de 4° orden combinado con el método mejorado de Euler dos sistemas de dos ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas (humedad y temperatura del aire y de los granos), que resultó adecuado para predecir resultados de secado de trigo con aire caliente.

El modelado del secado de arroz en lecho fijo ha sido estudiado en investigaciones recientes. Zare y Chen (2009) desarrollaron un modelo EDP-PsEst con ecuación cinética empírica que fue resuelto mediante el método de diferencias finitas, el simulador obtenido, validado con datos experimentales, fue utilizado para la optimización del secadero en aspectos tales como el consumo de energía, la eficiencia y la remoción de humedad. Naghavi y col. (2010) encontraron que el modelo EDP-NEst, que incluye los términos de acumulación en el aire y es resuelto con el método implícito, predice resultados más exactos.

Para el SBT se han aplicado distintos modelos para distintos tipos de granos. Sharp (1982) presenta una interesante revisión de los modelos de simulación para secado a bajas temperaturas desarrollados para distintos granos, mencionando sus ventajas y desventajas, en particular en lo relacionado a su utilización práctica en la implementación de estrategias operacionales. Aparte de mencionar los modelos empíricos o semiempíricos usados en un comienzo, centra su análisis en los modelos de EDP-EQ y los modelos EDP-NEQ. Los modelos EDP-NEQ, presentan como principal desventaja el alto tiempo de cálculo, que aunque son útiles para simulaciones de una sola corrida, no lo son para la aplicación de estrategias de control en las que el simulador forma parte de un lazo. Fueron desarrollados para SAT y algunos se han validado para lecho profundo, bajas temperaturas y bajos flujos de aire (largos tiempos de secado). Los modelos de EDP-EQ, que en principio son una simplificación de los modelos EDP-NEQ mediante consideraciones que pueden ser apropiadas para el bajo flujo de aire que normalmente se utiliza en el SBT, no son válidos para flujos altos, lecho no profundos y situaciones climáticas variables, aunque presentan la ventaja de su rápido tiempo de cómputo, lo que los hace adecuados para investigar estrategias operacionales. Concluye que los modelos de equilibrio son los más adecuados para el estudio de estrategias operacionales, siempre que se apliquen en su rango validez.



El modelo de equilibrio ha sido aplicado por autores como Thompson (1972), Morey y col. (1979), Sharp (1984) y Biondi y col. (1988). Estos modelos predicen las curvas de temperatura y humedad de granos y aire, pero su precisión aumenta cuando el secado es más lento, es decir, en condiciones de flujos muy bajos, baja temperatura del aire, elevada altura de lecho, ó una combinación de éstas que conduzcan a una baja velocidad promedio de secado. Biondi y col. (1988), aplicaron el modelo de EQ para flujos de aire menores a  $100 \text{ m}^3/(\text{h t})$  (que equivale a  $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ , considerando una densidad del lecho de  $750 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) y el modelo de NEQ para valores mayores.

No obstante, cuando las condiciones operativas no permitan el empleo de un modelo de EQ, resultará importante contar con un modelo de transferencia de calor y materia de no-equilibrio, que incorpore las ecuaciones de cinética de transferencia de materia durante el secado.

Sun y col. (1995) desarrollaron un modelo EDP-PsEst-NEQ para el secado de cebada usando una ecuación empírica para la cinética de secado e incluyendo una ecuación para predecir el deterioro del grano. Compararon dos métodos numéricos para resolver el sistema de ecuaciones resultantes: diferencias finitas hacia atrás y colocación ortogonal en elementos finitos. En ambos casos se discretizaron solamente las derivadas espaciales (método de las líneas) de modo que se obtuvo un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que puede resolverse usando funciones preprogramadas que implementan algoritmos numéricos con ajuste automático del tamaño de paso y elevado orden de integración para mantener bajo el error de truncación. Ambos métodos dan resultados prácticamente iguales pero el método de elementos finitos resulto 80 veces más rápido. El modelo fue validado con datos experimentales y presentó tres características novedosas: la predicción de la condensación, el uso de un método de simulación eficiente y la facilidad con la que se pueden implementar estrategias heurísticas de control.

Bowden y col. (1983) estudiaron varios modelos (de equilibrio y de no equilibrio), incluyendo el cálculo de crecimiento de hongos y pérdida de viabilidad. Compararon los resultados con datos experimentales para el SBT de cebada en Inglaterra, encontrando que un modelo EDP-PsEst-EQ conocido como modelo de Ingram con cinética difusiva, es el que mejor representa los datos experimentales, aunque insume un mayor tiempo de cálculo. Los modelos más simples (de menor tiempo de cálculo) dan resultados aceptables sólo para secado lento: temperatura y flujos de aire bajos.

Hossain y col. (2003) desarrollaron un modelo para simular el secado de lechos de mazorcas de maíz con circulación horizontal del aire (viento), sin uso de ventilador. Plantean el balance de masa y el balance de energía para el sistema granos+aire, considerando equilibrio térmico. Las dos ecuaciones diferenciales parciales obtenidas más una ecuación empírica simple (ec. de Lewis) para la cinética de secado se resolvieron por diferencias finitas para cada capa del lecho, en forma progresiva con el tiempo hasta finalizar el secado (humedad relativa del aire del 98%). No encontraron diferencias considerables entre las temperaturas y humedades promedio predichas por el modelo y las obtenidas experimentalmente.

### **1.5 Justificación del trabajo y objetivos**

A pesar del notable esfuerzo realizado en la investigación de SBT, especialmente en EE.UU., Canadá, Inglaterra y Brasil, éste método en general no ha sido ampliamente adoptado por los productores de maíz. Se lo aplicó exitosamente por muchos años en estaciones experimentales (nivel investigación) y por productores de maíz en EE.UU. Este proceso funciona mejor en climas frescos (temperaturas de 4 a 15°C) y de humedad relativa moderada (humedades relativas de 55 a 75%) (Wilcke y Morey, 1997). En Canadá más del 70% de los granos son almacenados a campo (“on farm”) y el secado con aire natural (sin calentamiento) es relativamente económico. Para el caso de canola se puede reducir el contenido de humedad un 2% en dos meses después de la cosecha (Jayas y White, 2003). Hansen y col. (2008) presentan la situación del SBT de maíz en Ohio (EE.UU.), aunque sólo el 2,2% del maíz se seca mediante SBT, considera que en la medida esta tecnología sea conocida y probada su uso se intensificará dadas sus ventajas.

El SBT no es popular en Argentina, todavía, donde la mayor parte de la capacidad de secado instalada corresponde a equipos con método SAT. La falta de información técnica y ejemplos exitosos del SBT atentan contra su uso (de la Torre, 2008). No obstante, en los últimos años ha comenzado a distribuirse información. Existe una fábrica con probados antecedentes en la fabricación de ventiladores industriales que recomienda el secado de baja temperatura (Cirigliano, Junín).

Casi el 80% del maíz producido en nuestro país se cosecha con un contenido de humedad superior a la de almacenamiento. La soja y el maíz son granos que se secan en mayor proporción usando secado artificial, no sólo en nuestro país sino también en todos los países productores de grano. Esto ocurre porque son granos que finalizan su

maduración en otoño, estación fresca y húmeda que impide el secado natural en la planta antes de la cosecha.

La tendencia, todavía algo incipiente de realización de contratos entre productores e industria procesadora para la venta de granos de alta calidad puede favorecer la expansión de la técnica de SBT. Así, esta tecnología debe ser estudiada en mayor profundidad analizando los factores relevantes que afectan el comportamiento del secado en más lugares, con distintas meteorologías. Al mismo tiempo, de llegarse a resultados favorables, se deberá contribuir a difundir los resultados.

Si bien hay trabajos realizados para el secado a baja temperatura de maíz, en distintos lugares del mundo, las diferencias climáticas hacen que las conclusiones de los mismos no puedan aplicarse a lugares diferentes. En este sentido, resultan de interés las zonas de producción de maíz en Argentina. Las condiciones de secado de granos a baja temperatura en Argentina son, por un lado, más benignas que las de Canadá y EE.UU. por la mayor temperatura del otoño argentino, época en la que se seca el maíz. Esto implicará mayores velocidades de secado que pueden requerir el uso de modelos de lecho fijo de no equilibrio. Sin embargo, por otro lado, la mayor temperatura podría causar exposición simultánea a condiciones inadecuadas de temperatura y humedad que promuevan una tasa respiratoria demasiado alta (deterioro biológico del grano), de manera que este aspecto será calculado en paralelo a la resolución de la transferencia de calor y materia durante el secado, para determinar, utilizando un determinado umbral máximo de consumo de materia seca por respiración, el “éxito” o “fracaso” del secado realizado en las condiciones dadas.

El objetivo general de este trabajo es contribuir al conocimiento del diseño de procesos de secado de maíz a bajas temperaturas, particularmente para condiciones argentinas, para lo cual se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Obtener modelos de transferencia de calor y materia para el secado a baja temperatura de maíz en lechos fijos altos
- Analizar distintos métodos numéricos para la implementación en computadora y obtener así un simulador apropiado.
- Aplicar el simulador para el estudio de aspectos relevantes del proceso

## **1.6 Contenido del trabajo**

En el Capítulo 2 se presenta la deducción del modelo matemático mediante balances de masa y energía, para obtener las ecuaciones de variación de humedad y temperatura del aire así como de humedad y temperatura del grano, con la posición y el tiempo en el lecho. Se obtiene así el modelo general, que luego se simplifica para obtener las distintas versiones a aplicar en este trabajo:

- Modelo pseudoestacionario de equilibrio (PsEst-EQ): se desprecian los términos de acumulación del aire y se considera que las transferencias de masa y calor se realizan hasta lograr sendos equilibrios.
- Modelo pseudoestacionario de no equilibrio másico (PsEst-NEQ): se desprecian los términos de acumulación del aire respecto de los aportes convectivos y se considera cinética de transferencia de masa a través de una ecuación de capa delgada.
- Modelo no estacionario de no equilibrio (NEst-NEQ): la diferencia con el anterior estriba en retener los términos de acumulación de humedad y energía.

En el Capítulo 3 se realiza un estudio comparativo de los modelos pseudoestacionarios, de equilibrio y no equilibrio, resueltos por el método explícito de diferencias finitas con el objetivo de determinar las condiciones de validez de cada uno.

En el Capítulo 4 se aplican distintos métodos numéricos para resolver el modelo pseudoestacionario de no equilibrio: método explícito, método implícito y método de las líneas.

En el Capítulo 5 se comparan los modelos de no equilibrio, pseudoestacionario y no estacionario en distintas condiciones operativas para determinar la existencia de condiciones que determinen la utilización del más complejo.

En el Capítulo 6 se utiliza el programa validado resuelto por el método numérico apropiado para analizar varios aspectos relativos al SBT del maíz: el efecto del calentamiento del aire al pasar por el ventilador y la pérdida de materia seca.

En todos los casos las comparaciones entre modelos se basan en:

- La respuesta característica del sistema (condiciones constantes del aire)
- Efecto del caudal específico de aire, de la temperatura del aire, de la humedad relativa del aire, de la humedad inicial del grano y del espesor del lecho
- Influencia de las condiciones meteorológicas en el tiempo de secado y en el consumo de energía.

Para la comparación de los métodos numéricos se tiene en cuenta:

- Tiempo de cómputo

- Diferencias en los resultados predichos de tiempo de secado, consumo de energía, humedad final promedio en el lecho
- Influencia de los tamaños de paso en tiempo y espacio

## Capítulo 2

---

### Modelado matemático del secado de granos en lecho fijo

#### 2.1 Modelo Matemático

El secado de sólidos en un lecho fijo, con circulación de un medio de secado gaseoso es un proceso complejo, en estado no estacionario y en el que los fenómenos de transferencia de calor y de masa ocurren simultáneamente.

En el modelo de secado en lecho fijo que se propone, se asumen las siguientes consideraciones:

i. El aire se desplaza a través del sólido en flujo pistón y la distribución de velocidad es uniforme en la sección transversal del lecho.

ii. El secadero es adiabático, es decir no hay intercambio de energía con el exterior. Esta suposición es particularmente adecuada para secado con aire natural, donde las diferencias de temperatura entre lecho y el exterior son muy bajas.

iii. Debido al estrecho rango de contenidos de humedad en el que tiene lugar el secado con aire natural, se desprecia el pequeño encogimiento del lecho, de modo que el volumen del lecho y su porosidad son constantes e iguales a los valores iniciales. Asimismo, se considera despreciable la contracción volumétrica de los granos individuales.

iv. La evaporación de humedad tiene lugar a la temperatura del sólido, el agua que se evapora ingresa a la corriente de aire a la temperatura del grano, y luego es calentada hasta la temperatura del aire.

v. Los granos se consideran como esferas efectivas, es decir esferas de igual relación área de partícula/volumen de partícula ( $a_p$ ) que el grano real.

Hay cuatro incógnitas que deben ser determinadas mediante el modelo de secado de granos en un lecho profundo, en función de la altura del lecho y del tiempo:

$$X = X(z, t)$$

$$T_s = T_s(z, t)$$

$$Y = Y(z, t)$$

$$T_a = T_a(z, t)$$

En este proceso no estacionario las temperaturas del sólido ( $T_s$ ) y del aire ( $T_a$ ), así como el contenido de humedad medio de las partículas sólidas ( $X$ ) y la humedad absoluta del aire ( $Y$ ), varían con la posición,  $z$  (coordenada en la dirección de la altura del lecho), y con el tiempo durante el secado,  $t$ .

El modelo propuesto consta de los balances de materia (agua) para el sólido (granos) y para el medio de secado (aire), y de los balances de energía para el sólido y el aire.

El sólido pierde humedad, lo que es el objetivo central del proceso. El aire, con el que se pone en contacto el sólido, cumple dos funciones esenciales: acarrear la humedad que proviene del sólido y llevarla hacia fuera del sistema así como aportar la energía necesaria para el secado.

Considerando un volumen diferencial (Fig. 2.1) a lo largo de la altura del lecho, pero integral en la sección de flujo de aire ( $S \Delta z$ ) ubicado en una posición arbitraria del lecho, se escriben los balances de masa y energía en ese volumen de control.

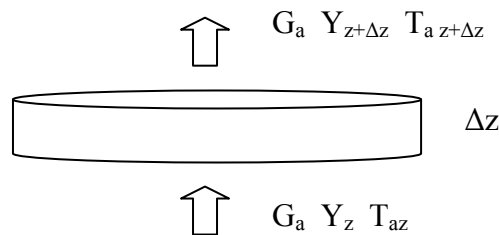


Figura 2.1. Volumen de control

### 2.1.1 Balance de masa o ecuación de continuidad

El balance de masa total se basa en el principio de conservación de la materia:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de materia} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{entrada} \\ \text{de materia} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{salida} \\ \text{de materia} \end{array} \right\} \quad [2-1]$$

Cuando se plantea para un componente del sistema (componente A), aparece un término adicional que tiene en cuenta la aparición o desaparición de masa en el volumen de control (en este caso por la evaporación del agua debido al secado):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{acumulación} \\ \text{de masa del} \\ \text{componente A} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{entrada} \\ \text{de masa del} \\ \text{componente A} \\ \text{por transporte} \\ \text{convectivo} \\ \text{(asociado al flujo de aire)} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{salida} \\ \text{de masa del} \\ \text{componente A} \\ \text{por transporte} \\ \text{convectivo} \\ \text{(asociado al flujo de aire)} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad neta} \\ \text{de entrada} \\ \text{de masa del} \\ \text{componente A por} \\ \text{los límites de las} \\ \text{partículas} \\ \text{debida al secado} \end{array} \right\} \quad [2-2]$$

### 2.1.2 Balance de agua en el sólido

El cambio en el contenido de agua en el sólido con el tiempo que ocurre en el volumen de control (término de acumulación) está asociado a la transferencia de agua desde el sólido al aire, que es inherente al proceso de secado.

La velocidad de acumulación de humedad del sólido en el volumen de control (kg/s) es:

$$\rho_L S \Delta z \frac{\partial X}{\partial t} \quad [2-3]$$

$\rho_L$  es la relación entre la masa de sólido seco y el volumen de lecho.

La transferencia de agua desde el sólido al aire en el volumen de control se expresa en términos de la velocidad de secado por unidad de área superficial de granos,  $n_w$  (kg/m<sup>2</sup> s):

$$-n_w a S \Delta z \quad [2.4]$$

Donde  $a$  es el área interfacial de las partículas (área de transferencia de materia) por unidad de volumen de lecho.

Combinando las ecs. (2-3) y (2-4), según lo expresado en (2-2):

$$\rho_L S \Delta z \frac{\partial X}{\partial t} = -n_w a S \Delta z \quad [2-5]$$

Simplificando esta expresión se obtiene el balance diferencial de agua para el sólido:

$$\rho_L \frac{\partial X}{\partial t} = -n_w a \quad [2-6]$$

Esta ecuación expresa que la disminución de la humedad del sólido con el tiempo (término de la izquierda), se debe al agua que pierde al secarse (término de la derecha).

Despejando la derivada con respecto al tiempo:

$$\boxed{\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{n_w a}{\rho_L}} \quad [2-7]$$

### 2.1.3 Balance de agua en el aire

El cambio de la humedad absoluta del aire con el tiempo en los espacios huecos (sin sólido) del lecho, se debe a la entrada de vapor de agua asociada al aire que ingresa al volumen de control menos la que sale, y al vapor proveniente de la humedad que reciben de los granos.

El vapor de agua que ingresa con el aire al volumen de control, a través de la sección de flujo, se expresa mediante:



$$G_a S Y|_z \quad [2-8]$$

El vapor de agua que egresa con el aire del volumen de control, es:

$$G_a S Y|_{z+\Delta z} \quad [2-9]$$

Y es la humedad absoluta del aire y  $G_a$  ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ) es el flujo másico superficial de la parte seca del aire, que es constante a través del lecho.

La velocidad de acumulación de agua ( $\text{kg}/\text{s}$ ) en los espacios huecos del volumen de control es:

$$S \Delta z \varepsilon_0 \rho_a \frac{\partial Y}{\partial t} \quad [2-10]$$

$\rho_a$  es la densidad del aire seco, porque la humedad Y está expresada por masa de aire seco, y  $\varepsilon_0$  es la porosidad del lecho en las condiciones iniciales, considerada constante.

La transferencia de agua del sólido al aire en el volumen de control, se expresa en términos de la velocidad de secado,  $n_w$ , que es igual en magnitud a la ec. (2-4) pero de signo opuesto:

$$S \Delta z n_w a \quad [2-11]$$

Combinado las ecs. (2-8), (2-9), (2-10) y (2-11), de acuerdo a lo expresado en (2-2) y en el párrafo inicial:

$$S \Delta z \varepsilon_0 \rho_a \frac{\partial Y}{\partial t} = G_a S Y|_z - G_a S Y|_{z+\Delta z} + S \Delta z n_w a \quad [2-12]$$

Dividiendo esta expresión por  $S \Delta z$ , tomando límite cuando  $\Delta z \rightarrow 0$  y aplicando la definición de derivada, se obtiene el balance diferencial para la variación de la humedad absoluta del aire:

$$\varepsilon_0 \rho_a \frac{\partial Y}{\partial t} = - G_a \frac{\partial Y}{\partial z} + n_w a \quad [2-13]$$

Esta ecuación expresa que la variación de la humedad del aire con el tiempo (término de la izquierda), para un punto del lecho se debe a la variación de la humedad del aire con la altura del lecho (primer término de la derecha) y al aporte de agua proveniente del sólido, debido al proceso de secado (segundo término de la derecha).

Despejando la derivada con respecto al tiempo:

$$\boxed{\frac{\partial Y}{\partial t} = - \frac{G_a}{\varepsilon_0 \rho_a} \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{n_w a}{\varepsilon_0 \rho_a}} \quad [2-14]$$

### 2.1.4 Balance de energía

El balance de energía se basa en la ley de conservación de energía, a su vez fundada en el Primer Principio de la Termodinámica clásica, el que expresado para un sistema abierto establece (Bird, 2008):

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{acumulación} \\ \text{de energía} \\ \text{cinética e interna} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{entrada} \\ \text{de energía} \\ \text{mecánica e interna} \\ \text{por convección} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{salida} \\ \text{de energía} \\ \text{mecánica e interna} \\ \text{por convección} \end{array} \right\} \\
 + & \left. \begin{array}{l} \text{velocidad neta} \\ \text{de adición de calor} \\ \text{por conducción} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{velocidad neta} \\ \text{de trabajo realizado} \\ \text{sobre el sistema} \\ \text{por fuerza externas} \end{array} \right\} \qquad [2-15]
 \end{aligned}$$

En este caso sólo se considera la energía interna (los cambios de energía cinética se consideran despreciables frente a los cambios de energía interna) y no se incluye el término de trabajo (no hay trabajo contra partes móviles y la contribución de la fuerza de gravedad es pequeña en comparación con los demás aportes al balance de energía). La conducción inter partícula se desprecia frente a la convección.

El cambio de energía interna (U) se reemplaza por el de entalpía (H) (se desprecia el cambio de pV, producto de presión por volumen específico, frente al cambio de H):

$U = H - p\hat{V}$ . En esta expresión no se incluyen las fuentes de energía, que deberán adicionarse en el caso que nos ocupa, de modo de tener en cuenta la energía asociada al proceso de secado (evaporación del agua) que tiene lugar en el sólido y que se intercambia entre el sólido y el aire.

Se considera que la transferencia de energía está controlada por el transporte externo, lo que implica que en el interior de la partícula no hay resistencia a la transferencia de calor y consecuentemente el perfil de temperatura es plano. Estas consideración está avalada por las conclusiones obtenidas en un trabajo reciente (Giner y col., 2010) en el cual se demuestra, a través de la definición de un Biot de transferencia de calor modificado para el secado, que éste es muy bajo y tiende a cero a medida que progresa el secado. Se asume también que el mecanismo de transporte externo es convectivo, es decir se desprecia la conducción de calor entre partículas.

### 2.1.5 Balance de energía para el sólido

El cambio en la entalpía del sólido con el tiempo, que ocurre en el volumen de control (término de acumulación) es igual a la energía procedente de la transferencia de energía convectiva desde el aire hacia el sólido menos la energía requerida para la evaporación del agua asociada a los granos.

Velocidad de acumulación de energía en el interior del volumen de control:

$$S \Delta z \rho_L \frac{\partial H_s}{\partial t} \quad [2-16]$$

$H_s$  es la entalpía del sólido húmedo por unidad de masa de sólido seco.

La velocidad de transferencia convectiva de energía desde el aire al sólido a través del límite entre los dos volúmenes de control se expresa en términos de la ley de enfriamiento de Newton:  $h_v (T_a - T_s)$ , siendo  $h_v$  el coeficiente de transferencia de calor basado en el área superficial de los granos.

$$S \Delta z a h_v (T_a - T_s) \quad [2-17]$$

La velocidad de utilización de energía debida a la desorción del agua desde la superficie del grano, se expresa en función de la velocidad de secado,  $n_w$  y la entalpía del vapor a la temperatura del grano,  $H_v$ :

$$S \Delta z a n_w H_v \quad [2-18]$$

Combinando (2-16), (2-17) y (2-18), de acuerdo a lo expresado precedentemente:

$$S \Delta z \rho_L \frac{\partial H_s}{\partial t} = S \Delta z a h_v (T_a - T_s) - S \Delta z a n_w H_v \quad [2-19]$$

Dividiendo esta expresión por  $S \Delta z$  se obtiene el balance diferencial de entalpía para el sólido:

$$\frac{\partial H_s}{\partial t} = \frac{a}{\rho_L} ( h_v (T_a - T_s) - n_w H_v ) \quad [2-20]$$

Esta ecuación expresa que el término de acumulación se iguala a la suma de los términos de transferencia de calor desde el aire al sólido (primer término de la derecha) y de la energía involucrada en la evaporación del agua (segundo término de la derecha).

### **Balance de energía para el sólido en términos de la temperatura**

En esta etapa se requiere establecer el estado de referencia, para expresar la entalpía en términos de la temperatura, para lo cual se establece: agua en estado líquido a 0°C, aire en estado gaseoso a 0°C y granos en estado sólido a 0°C.

La entalpía del sólido es el producto de su temperatura por el calor específico. El calor específico depende de la temperatura y del contenido de humedad. Se desprecia la influencia de la temperatura, con lo cual el calor específico del sólido por unidad de masa de sólido seco,  $C_{ps}$ , depende sólo del contenido de humedad, de modo que la entalpía se expresa como:

$$H_s = T_s C_{ps} \quad [2-21]$$

Donde  $C_{ps}$  es el calor específico del sólido, que en función de su contenido de humedad queda:

$$C_{ps} = (C_{pss} + X C_{pw}) \quad [2-22]$$

Siendo  $C_{pss}$  el calor específico del sólido seco y  $C_{pw}$  el calor específico del agua líquida.

Derivando la ecuación (2-21), teniendo en cuenta (2-22), con respecto a la temperatura y humedad:

$$dH_s = C_{ps} dT_s + T_s dC_{ps} = C_{ps} dT_s + T_s C_{pw} dX \quad [2-23]$$

Reemplazando (2-22) en (2-20), se obtiene la ecuación de energía del sólido en términos de la temperatura:

$$C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} + T_s C_{pw} \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{a}{\rho_L} (h_v (T_a - T_s) - n_w H_v) \quad [2-24]$$

En esta expresión se puede apreciar que la energía transferida por convección desde el aire a las partículas del lecho es igual a la suma de las energías requeridas para calentar los granos y para evaporar el agua de los granos.

El término:

$$\rho_L T_s C_{pw} \frac{\partial X}{\partial t} \quad [2-25]$$

Aparece como consecuencia de haber tenido en cuenta en la derivación de  $H_s$  la variación del calor específico del sólido con la humedad:

Despejando la derivada con respecto al tiempo de la ec. (2-24):

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{a}{\rho_L C_{ps}} (h_v (T_a - T_s) - n_w H_v) - \frac{T_s C_{pw}}{C_{ps}} \frac{\partial X}{\partial t} \quad [2-26]$$

Una forma alternativa de esta ecuación se obtiene reemplazando la derivada de la humedad en función del tiempo a su igual según el balance de masa (ec. (2-7)):

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{a}{\rho_L C_{ps}} \left( h_v (T_a - T_s) - n_w H_v \right) - \frac{T_s C_{pw}}{C_{ps}} \left( -\frac{n_w a}{\rho_L} \right) \quad [2-27]$$

Teniendo en cuenta que  $H_v$  es la entalpía del vapor producido a la temperatura del sólido y el producto  $T_s C_{pw}$  es la entalpía del agua líquida adsorbida a la misma temperatura, la diferencia entre ambos es el calor latente de sorción,  $L_g$ .

$$H_v - T_s C_{pw} = L_g \quad [2-28]$$

Reacomodando la ec. (2-27) y teniendo en cuenta (2-28), se obtiene una forma más compacta del balance de energía para el sólido.

$$\boxed{\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{a}{\rho_L C_{ps}} \left( h_v (T_a - T_s) - n_w L_g \right)} \quad [2-29]$$

### 2.1.6 Balance de energía para el aire

La velocidad de acumulación de la energía térmica del aire en los huecos del lecho se debe a la velocidad neta de entrada de energía asociada al flujo de aire, la velocidad de transferencia de calor convectiva hacia los granos y la velocidad de variación de energía térmica debida al ingreso de vapor proveniente de los granos.

Escribiendo cada uno de estos términos para el volumen de control  $S\Delta z$ , se obtienen las expresiones matemáticas requeridas para obtener el balance de energía para el aire.

Término de acumulación:

$$S\Delta z \rho_a \varepsilon_0 \frac{\partial H_a}{\partial t} \quad [2-30]$$

$H_a$  es la entalpía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco.

Velocidad de entrada de energía por aporte convectivo asociado al aire que ingresa al volumen de control:

$$S G_a H_a \Big|_z \quad [2-31]$$

Velocidad de salida de energía convectiva del volumen de control:

$$S G_a H_a \Big|_{z+\Delta z} \quad [2-32]$$

Velocidad de transferencia de calor desde el aire al sólido en el volumen de control:

$$S\Delta z a h_v (T_a - T_s) \quad [2-33]$$

Energía que ingresa al aire con el vapor procedente del sólido:

$$S \Delta z a n_w H_v \quad [2-34]$$

Sumando las ecs. (2-30) a (2-34), con los signos que corresponden, se obtiene el balance de energía para el aire en el volumen de control:

$$S \Delta z \rho_a \varepsilon_0 \frac{\partial H_a}{\partial t} = S G_a H_a \Big|_z - S G_a H_a \Big|_{z+\Delta z} - S \Delta z a h_v (T_a - T_s) + S \Delta z a n_w H_v \quad [2-35]$$

Dividiendo esta expresión por  $S \Delta z$ , tomando límite cuando  $\Delta z \rightarrow 0$  y aplicando la definición de derivada, se obtiene el balance diferencial de energía para el aire.

$$\rho_a \varepsilon_0 \frac{\partial H_a}{\partial t} = -G_a \frac{\partial H_a}{\partial z} - h_v a (T_a - T_s) + n_w a H_v \quad [2-36]$$

En esta ecuación el término de la izquierda representa la acumulación, mientras que el primer término de la derecha representa la energía térmica asociada al flujo de vapor, el segundo la transferencia de energía entre el vapor y el sólido y el tercero la energía térmica debido al ingreso de vapor proveniente del sólido.

### **Balances de energía para el aire en términos de la temperatura**

La entalpía del aire en función de su temperatura y humedad absoluta, para el estado de referencia y la consideración de calor específico dependiente sólo de la humedad, descrito en el ítem 1.2.1.1, es:

$$H_a = C_{pa} T_a + L_{w0} Y \quad [2-37]$$

En esta ecuación  $C_{pa}$  es el calor específico del aire, que en función de su humedad absoluta es:

$$C_{pa} = (C_{pas} + C_{pv} Y) \quad [2-38]$$

Donde  $C_{pas}$  es el calor específico del aire seco y  $C_{pv}$  es el calor específico del vapor de agua.

Derivando la ec. (2-37), teniendo en cuenta (2-38), con respecto a la temperatura y humedad:

$$dH_a = C_{pa} dT_a + T_a C_{pv} dY + L_{w0} dY \quad [2-39]$$

Reemplazando (2-39) en (2-36), se obtiene la ecuación de balance de energía del aire en términos de la temperatura:

$$\rho_a \varepsilon_0 \left( C_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial t} + T_a C_{pv} \frac{\partial Y}{\partial t} + L_{w0} \frac{\partial Y}{\partial t} \right) = -G_a \left( C_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial z} + T_a C_{pv} \frac{\partial Y}{\partial z} + L_{w0} \frac{\partial Y}{\partial z} \right) [2-40]$$

$$- h_v a (T_a - T_s) + n_w a H_v$$

Reacomodando esta expresión, de modo de despejar la derivada de la temperatura con respecto al tiempo:

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = - \frac{h_v a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} (T_a - T_s)$$

$$- \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} \left( C_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial z} + T_a C_{pv} \frac{\partial Y}{\partial z} + L_{w0} \frac{\partial Y}{\partial z} \right) [2-41]$$

$$+ \frac{n_w a H_v}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} - \frac{1}{C_{pa}} \left( T_a C_{pv} \frac{\partial Y}{\partial t} + L_{w0} \frac{\partial Y}{\partial t} \right)$$

Reemplazando en la ec. (2-41) la derivada de la humedad en función del tiempo, obtenida del balance de masa (ec. 2-14), se obtiene una forma equivalente del balance de energía para el aire:

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = - \frac{h_v a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} (T_a - T_s)$$

$$- \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} \left( C_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial z} + T_a C_{pv} \frac{\partial Y}{\partial z} + L_{w0} \frac{\partial Y}{\partial z} \right) [2-42]$$

$$+ \frac{n_w a H_v}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} - \frac{1}{C_{pa}} \left( T_a C_{pv} \left( - \frac{G_a}{\varepsilon \rho_a} \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{n_w a}{\varepsilon \rho_a} \right) + L_{w0} \left( - \frac{G_a}{\varepsilon \rho_a} \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{n_w a}{\varepsilon \rho_a} \right) \right)$$

Reacomodando, agrupando y simplificando términos comunes la ec. (2-42) queda:

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = - \frac{h_v a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} (T_a - T_s) - \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon_0} \left( \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) [2-43]$$

$$+ \frac{1}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} \left[ n_w a H_v - n_w a (T_a C_{pv} + L_{w0}) \right]$$

Siendo  $H_v$  la entalpía del vapor a la temperatura del sólido, que en función de la temperatura queda:

$$H_v = L_{w0} + C_{pv} T_s [2-44]$$

Mientras que la expresión  $L_{w0} + C_{pv} T_a$  es la entalpía del vapor a la temperatura del aire,  $H_{va}$ .

$$H_{va} = L_{w0} + C_{pv} T_a [2-45]$$

Reescribiendo la ec. 2-43 usando esta última expresión:

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -\frac{h_v a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} (T_a - T_s) - \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon_0} \left( \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} [n_w a (H_v - H_{va})]$$
[2-46]

### 2.1.7 Balance total de energía en el lecho (agua +aire)

Sumando miembro a miembro las ecs. (2-29) y (2-46) y suprimiendo los términos iguales, se obtiene la ecuación de balance de energía total (aire +sólido) que resulta de utilidad para los modelos de equilibrio térmico que se considerarán en este trabajo.

$$\left( \rho_L C_{ps} \right) \frac{\partial T_s}{\partial t} + \left( \rho_a \varepsilon_0 C_{pa} \right) \frac{\partial T_a}{\partial t} = - n_w a L_g - G_a \left( C_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) + n_w a (H_v - H_{va})$$
[2-47]

Teniendo en cuenta la relación entre las entalpías  $H_v$  y  $H_{va}$  y las temperaturas (ecs. 2-44 y 2-45), el último término de esta ecuación puede reescribirse en función de las temperaturas:

$$\left( \rho_L C_{ps} \right) \frac{\partial T_s}{\partial t} + \left( \rho_a \varepsilon_0 C_{pa} \right) \frac{\partial T_a}{\partial t} = - n_w a L_g - G_a \left( C_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) + n_w a C_{pv} (T_s - T_a)$$
[2-48]

### 2.1.8 Modelo no estacionario de no-equilibrio

El modelo completo, queda formado por las ecs. (2-7) (2-14) (2-29) y (2-46) más la ecuación constitutiva para la cinética de secado,  $n_w$  o “ecuación de capa delgada” y una correlación para el coeficiente de transferencia de calor,  $h_v$ .

Para la integración sistema de ecuaciones se aplican las siguientes condiciones iniciales y de borde:



$$\begin{aligned}
t = 0 & \quad X = X_0 & \quad T_s = T_{s0} & \quad 0 \leq z \leq Z_{\max} \\
t = 0 & \quad Y = Y_0 & \quad T_a = T_{a0} & \quad 0 \leq z \leq Z_{\max} \\
z = 0 & \quad Y = Y_{\text{en}} & \quad T_a = T_{a\text{en}} & \quad t > 0
\end{aligned}
\tag{2-49}$$

$X_0$  es el contenido de humedad inicial del sólido,  $Y_0$  es la humedad absoluta inicial del aire intergranular, mientras que  $T_{s0}$  y  $T_{a0}$  son las temperaturas iniciales del sólido y del aire, respectivamente.

$Y_{\text{en}}$  es la humedad absoluta del aire a la entrada del lecho y  $T_{a\text{en}}$  es la temperatura de entrada del aire, las que pueden cambiar con el tiempo, cuando se trata del secado en condiciones ambientales.

Si la simulación comienza con un lecho en equilibrio,  $T_{a0}$  será igual a  $T_{s0}$ , mientras que  $Y_0$  se puede calcular sobre la base de la humedad relativa de equilibrio del aire con la humedad del sólido a la temperatura de éste.

### 2.1.9 Modelo pseudoestacionario de no equilibrio

Se realiza una simplificación adicional: los términos de acumulación de humedad y temperatura del aire (variación con el tiempo) son despreciables, comparados con las contribuciones convectivas (los términos de variación de dichas variables con la posición a lo largo del lecho) (Brooker y col. (1992)). De este modo las ecuaciones de balance de masa y de energía para el sólido no cambian (ecs. (2-7) y (2-28)), y sí lo hacen los respectivos balances para el aire.

Igualando a cero el término de acumulación en la ec. (2-14):

$$\boxed{0 = -G_a \frac{\partial Y}{\partial z} + n_w a}
\tag{2-50}$$

Haciendo lo propio en el balance de energía, ec. (2.46):

$$\boxed{
\begin{aligned}
0 = & -\frac{h_v a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{\text{pah}}} (T_a - T_s) - \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon_0} \left( \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) \\
& + \frac{1}{\rho_a \varepsilon_0 C_{\text{pah}}} [n_w a (H_v - H_{va})]
\end{aligned}
}
\tag{2-51}$$

El nombre de pseudoestacionario se aplica para la fase aire, en la cual no aparecen derivadas temporales; sin embargo, dado que la fase granos mantiene sus derivadas

temporales y cambia su condición en el tiempo, la fase aire no mantiene un perfil inalterado de temperaturas y humedades en función de  $z$ , sino que ese perfil termina dependiendo del tiempo también, por eso el carácter “pseudo” estacionario.

El modelo pseudoestacionario de no equilibrio queda, pues, conformado por las ecs. (2-7), (2-29) (2-50) y (2-51) más la ecuación constitutiva para la velocidad de secado,  $n_w$ .

Para este caso se aplican las siguientes condiciones iniciales y de borde:

$$\begin{aligned} t = 0 \quad X = X_0 \quad T_s = T_{s0} \quad 0 \leq z \leq Z_{\max} \\ z = 0 \quad Y = Y_{en} \quad T_a = T_{aen} \quad t > 0 \end{aligned} \quad [2-52]$$

### 2.1.10 Modelo pseudoestacionario de no equilibrio másico y equilibrio térmico

Se considera equilibrio térmico, es decir que la temperatura del aire que sale de una capa es igual a la temperatura del grano en esa capa, para cada tiempo. Se justifica considerar este modelo para el proceso lento de secado a baja temperatura, donde la velocidad de transferencia de energía resultaría mucho mayor que la de masa, teniendo en cuenta que se simplifica el sistema a resolver.

Aplicando el balance de energía total para el secadero (ec. 2-48) en la cual se simplifica el término de acumulación del aire y el último término de la derecha, relacionado con la diferencia de temperaturas entre el sólido y el aire, y combinado con la ecuación de balance de masa para el aire del modelo pseudoestacionario (ec. 2-50), se obtiene el balance de energía en el secadero:

$$\boxed{\left( \rho_L C_{ps} \right) \frac{\partial T_s}{\partial t} = -G_a \left( \frac{\partial Y}{\partial z} \right) L_g - G_a \left( C_{pah} \frac{\partial T_a}{\partial z} \right)} \quad [2-53]$$

El modelo queda conformado por el balance de masa para el sólido (ec. 2-7), el balance de masa para el aire caso pseudoestacionario (ec. 2-50), el balance de energía en el secadero (ec. 2-53), además de la condición de igualdad entre  $T_s$  y  $T_a$ , y la ecuación constitutiva para  $n_w$ .

### 2.1.11 Modelo pseudoestacionario de equilibrio térmico y másico

Se introduce la consideración de que el aire que sale de una capa está en equilibrio con el sólido de esa capa. Asumiendo equilibrio másico ya no se requiere una ecuación para la velocidad de secado, y el sistema a resolver se reduce a dos ecuaciones.

Sumando las ecs. (2-7) y (2-50) y cancelando los términos iguales, se obtiene el balance total (aire + granos) de agua en el lecho:

$$\boxed{\rho_L \frac{\partial X}{\partial t} = - G_a \frac{\partial Y}{\partial z}} \quad [2-54]$$

El modelo queda conformado por las ecuaciones (2-53) y (2-54), las condiciones iniciales y de borde las dadas por la ec. 2-52.

Una deducción alternativa de este modelo, que es el más sencillo de todos los considerados en este trabajo, es a través del planteo de los balances macroscópicos de masa y energía, en una capa del lecho de espesor  $\Delta z$  durante un periodo de tiempo  $\Delta t$ :

$$\rho_L S \Delta z (X_{z,t+\Delta t} - X_{z,t}) = - G_a S (Y_{z+\Delta z,t} - Y_{z,t}) \Delta t \quad [2-55]$$

$$- \rho_L S \Delta z C_{ps} (T_{s,z,t+\Delta t} - T_{s,z,t}) + L_g (Y_{z+\Delta z,t} - Y_{z,t}) = G_a S C_{pa} (T_{a,z+\Delta z,t} - T_{a,z,t}) \quad [2-56]$$

Dividiendo por  $S \Delta z \Delta t$  todos los términos, simplificando y tomando límite cuando  $\Delta t$  y  $\Delta z$  tienden a cero, se llega a las mismas ecuaciones de balance de masa (ec. 2-54) y de balance de energía (ec. 2-53).

## 2.2 Parámetros del modelo

Se requiere la relación psicrométrica entre la humedad absoluta y la presión parcial de vapor en el aire:

$$Y = \frac{P_{\text{vap}}}{(P - P_{\text{vap}})} \frac{18}{29} \quad [2-57]$$

La presión parcial puede escribirse en función de la humedad relativa decimal ( $h_{ra}$ ) y de la presión de saturación del agua pura ( $P_{\text{sat}}$ ):

$$P_{\text{vap}} = h_{ra} P_{\text{sat}}$$

La  $P_{\text{sat}}$  es función de la temperatura, por lo cual se requiere también una correlación entre ambas variables (Giner y col., 1996):

$$P_{\text{sat}} = \exp \left[ 54,12 - \frac{6547}{T_a + 273,16} - 4,23 \ln(T_a + 273,16) \right] \quad [2-58]$$

La densidad del aire, dada por la ley de los gases ideales, es:

$$\rho_a = \frac{P M_a}{R (T_a + 273)} \quad [2-59]$$

R es la constante universal de los gases ( $R=8314 \text{ Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \text{ kmol}^{-1}$ ) y  $M_a$  es la masa molar del aire ( $M_a=29 \text{ kg kmol}^{-1}$ )

La relación entre la densidad del lecho expresado como masa de sólido húmedo por unidad de volumen ( $\rho_{Lh}$ ) y la masa de sólido seco por unidad de volumen ( $\rho_L$ ), está dada por la expresión siguiente, donde X es la humedad del sólido en base seca:

$$\rho_L = \frac{\rho_{Lh}}{(1 + X)} \quad [2-60]$$

Mientras que la densidad del lecho y la densidad del grano ( $\rho_s$ ) están relacionadas por la porosidad del lecho ( $\epsilon$ ):

$$\rho_L = \rho_s (1 - \epsilon) \quad [2-61]$$

Los valores de  $\rho_s$  y  $\epsilon$  se han considerado constantes y se han obtenido a partir de las ecuaciones anteriores usando  $\epsilon=0,40$  y  $\rho_{Lh}=750 \text{ kg/m}^3$  (a  $X=0,20$ ) (ASAE, 2003).

Los valores de calores específicos del maíz y del agua líquida adsorbida, que intervienen en la ecuación de calor específico del sólido en función de su contenido de humedad (ec. 2-22) se obtuvieron de bibliografía (Brook y Foster, 1981):

$$C_{pw}=3560 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_{pss}= 1465 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

Los calores específicos del aire seco y del vapor de agua, requeridos para el cálculo del calor específico del aire húmedo (ec. 2-38), corresponden a los valores presentados en Perry (1997):

$$C_{pas}= 1008 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_{pv}= 1883 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

Los granos se han considerado partículas esféricas de tamaño constante, con un radio del grano,  $r_g$ , igual a  $4,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  (Brooker y col., 1992).

### 2.3 Isotermas de sorción

Para relacionar el contenido de humedad del sólido y la humedad relativa del aire, en el equilibrio (expresada en forma decimal), se utilizó la ecuación de Chung-Pfost Modificada (CPM):

$$X_e = -\frac{1}{100 C_3} \ln \left[ -\frac{\ln(h_{ra})(T_a + C_2)}{C_1} \right] \quad [2-62]$$

Cuyos parámetros para maíz colorado duro fueron obtenidos de un trabajo de Sun (1998), en el cual relevó los datos disponibles en su momento:  $C_1=486,1$ ;  $C_2=56,8$  y  $C_3=0.1807$ .

#### 2.4 Cinética de secado

La ecuación constitutiva de cinética de secado que se requiere para resolver las ecuaciones de balance de masa y energía se obtiene a partir de la ecuación de capa delgada provista por Misra y Brooker (1980), cuyos coeficientes fueron determinados para un amplio rango de condiciones operativas, incluyendo las de secado con aire a bajas temperaturas:

$$X = (X_0 - X_e) \exp(-K t^N) + X_e \quad [2-63]$$

Donde  $K$  y  $N$  son los parámetros del modelo, que para el rango de bajas temperaturas están dados por:

$$K = \exp(-7.1735 + 1.2793 \ln(1.8T + 32) + 0.1378 v) \quad [2-64]$$

$$N = 0.0811 \ln(h_{ra} 100) + 0.0078(X_0 100) \quad [2-65]$$

Derivando la ec. (2-63):

$$\frac{dX}{dt} = (X - X_e) (-K) \left( \frac{t}{3600} \right)^{N-1} \frac{N}{t/3600} \quad [2-66]$$

Y teniendo en cuenta el balance diferencial de agua para el sólido en la capa delgada (equivalente a la 2-6 que es el balance para el lecho):

$$n_w a_p = -\rho_s \frac{dX}{dt} \quad [2-67]$$

En esta ecuación  $a_p$  es el área superficial de la partícula por unidad de volumen de partícula, que se relaciona con  $a$  (área superficial de partícula por unidad de volumen de lecho mediante la porosidad del lecho):

$$a_p(1 - \varepsilon) = a \quad [2-68]$$

Reemplazando (2-66) en (2-67) se obtiene la ecuación constitutiva que se usará en el modelo de lecho fijo:

$$n_w a_p = \rho_s (X - X_e)(K) \left( \frac{t}{3600} \right)^N \frac{N}{t/3600} \quad [2-69]$$

## 2.5 Calor de sorción

El calor de sorción, es decir la energía asociada a la evaporación del agua inherente al proceso de secado, puede calcularse en función de la temperatura por medio de la ecuación de Clapeyron:

$$L_g = L_w + \frac{R(T_s + 273)^2}{M_v} \left( \frac{\partial \ln a_w}{\partial T} \right)_X \quad [2-70]$$

Esta expresión indica que el calor de sorción del agua en los granos está compuesto por el calor de vaporización del agua pura ( $L_w$ ) mas un término debido a la energía adicional de atracción entre las moléculas de agua y la materia seca higroscópica del grano (Giner, 1999).

El símbolo  $a_w$  es la actividad acuosa, que se que se obtiene partir de la isoterma adecuada, en este caso la de CPM, que se despeja como  $h_{ra}$  en equilibrio:

$$a_w = h_{ra} = \exp\left(-\frac{C_1 e^{-100 X C_3}}{(T + C_2)}\right) \quad [2-71]$$

A partir de esta relación se calcula la derivada de  $a_w$  con respecto a la temperatura, a humedad constante:

$$\ln a_w = -\frac{C_1 e^{-100 X C_3}}{(T + C_2)} \quad [2-72]$$

$$\left( \frac{\partial \ln a_w}{\partial T} \right)_X = \frac{C_1 e^{-100 X C_3}}{(T + C_2)^2} \quad [2-73]$$

El calor latente de evaporación del agua pura se obtiene usando la ecuación de Clapeyron y la correlación para la presión de saturación:

$$L_w = \frac{R}{M_v} (6547,1 - 4,23(T + 273)) \quad [2-74]$$

## 2.6. Consumo específico de energía

La caída de presión por unidad de longitud de lecho (Pa/m) fue calculada usando la ecuación de Hukill & Ives:

$$\frac{\Delta p}{Z_{\max}} = \frac{a v^2}{\ln(1 + b v)} \quad [2-75]$$

Donde  $v$  es la velocidad superficial del aire en m/s

Los parámetros para maíz publicados por Brooker y col. (1992) son:  $a=2,07 \cdot 10^4$  y  $b=30,4$  (para maíz en grano, con flujos de aire en el rango:  $0,0056-0,304 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \text{ s}$ ).

La potencia absorbida por el aire a su paso por el ventilador,  $P_o'$ , se calculó como el producto de la caída de presión total y el caudal volumétrico del aire ( $Q_v$ ):

$$P_o' = \Delta p Z_{\max} Q_v \quad [2-76]$$

$Q_v$  se calculó a partir del caudal volumétrico por unidad de volumen de lecho,  $Q_{vv}$ , que es la variable que comúnmente se maneja en SBT por ser un caudal de aire relativo al volumen de lecho, y el volumen de lecho ( $Z_{\max} \cdot S$ ):

$$Q_v = Q_{vv} Z_{\max} S \quad [2-77]$$

Se usaron dos factores de corrección, para tener en cuenta la presencia de finos:  $f_1=1,5$  y la pérdida de carga en el sistema de distribución del aire:  $f_2=1,3$ . Además se consideró una eficiencia del motor del ventilador del 50%, para lo cual se incorporó otro factor:  $f_3=2$ .

La ecuación resultante para el cálculo de la potencia demandada por el ventilador es:

$$P_o = \Delta p Q_{vv} Z_{\max}^2 S f_1 f_2 f_3 \quad [2-78]$$

El consumo de energía durante el secado, suponiendo un uso ininterrumpido del ventilador,  $E$  (J=Ws), se obtiene multiplicando la potencia por el tiempo de secado ( $t_s$ ) en segundos:

$$E = P_o t_s \quad [2-79]$$

Para el cálculo del consumo específico de energía  $E_{\text{esp}}$  (MJ/kg agua evaporada), se dividió el consumo de energía por el agua evaporada en el proceso:

$$E_{\text{esp}} = \frac{E}{(X_0 - X_{\text{pr}}) \rho_L (S Z_{\max}) 10^6} \quad [2-80]$$

El parámetro  $E_{\text{esp}}$  se utilizó para comparar el desempeño del secadero en lo que concierne al consumo energético.

## **2.7 Criterio de finalización de secado**

Salvo que se indique lo contrario, el secado se consideró terminado cuando la humedad en la última capa se reducía por debajo del valor de almacenamiento seguro (de modo de evitar la contaminación microbiana en todo el lecho): 14,5% b.h. (17 % b.s.), dada por la norma argentina de calidad comercial de maíz (Res. Ex SAGyP N°1075/94, Bolsa de Comercio de Rosario, 2013).



## Capítulo 3

---

### Estudio comparativo de los modelos pseudoestacionarios, de equilibrio y no equilibrio

#### 3.1 Introducción

El modelo de equilibrio presenta algunas ventajas, tales como la simplicidad y la facilidad de resolución. Además para su implementación no se requiere una expresión cinética para la velocidad de secado. La cinética de secado, especialmente en sistemas lentos donde no se desarrollan gradientes internos, normalmente se modela empleando expresiones empíricas o semiempíricas para la humedad media del grano en función del tiempo, cuyos parámetros se determinan usando datos experimentales de secado en capa delgada. Este procedimiento conlleva un cierto nivel de error y limita la aplicación del modelo del secadero a las condiciones (tipo y tamaño del sólido, condiciones del aire: temperatura, humedad y velocidad, escala de tiempo de las determinaciones) para las cuales es válida la ecuación cinética.

Por otra parte, el tiempo de cálculo es generalmente mayor para los modelos de no equilibrio y este es un factor a tener en cuenta en el lento proceso de secado a bajas temperaturas usando series de datos meteorológicos, especialmente cuando se desea aplicar el modelo en la simulación de estrategias de control.

Tales ventajas llevan a considerar los modelos de equilibrio, aunque la factibilidad de su empleo (rango de condiciones en las que es posible aplicarlo con un margen de error aceptable) debe determinarse.

En este capítulo se analizan dos modelos, uno de equilibrio y otro de no equilibrio, a efectos de comparar las predicciones en las mismas condiciones de secado y la influencia de dichas condiciones en los resultados. Los dos modelos que se estudian en este capítulo son el modelo pseudoestacionario de equilibrio másico y térmico (PsEst-EQ) y el modelo pseudoestacionario de equilibrio térmico y no equilibrio másico (PsEst-NEQ), resueltos en forma numérica por el método de diferencias finitas explícito. En el Anexo I se presenta una breve descripción de los métodos de resolución numérica que se aplican en este trabajo y sus principales características.

En primer lugar, se consideró el caso de condiciones constantes del aire de entrada. Se evaluó la influencia de la discretización del dominio, esto es, del tamaño de los intervalos de espacio en la altura del lecho ( $\Delta z$ ) y de tiempo ( $\Delta t$ ), en relación con la estabilidad, el error de truncación y el tiempo de cómputo, a efectos de seleccionar los valores que resulten adecuados. Estos valores deben ser los mismos para resolver los dos modelos, de modo que las diferencias en los resultados predichos se puedan atribuir sólo al modelo y no a la resolución numérica y por ende los resultados serán aptos para cumplir con el objetivo del estudio comparativo de los modelos. Se analizó la influencia de las condiciones de proceso (flujo de aire, temperatura y humedad de entrada del aire) en los resultados predichos por ambos modelos (tiempo de secado, humedad promedio final en el lecho, consumo específico de energía, velocidad de secado) y en el tiempo de cómputo. Todos los cálculos se hicieron con la misma computadora, a efectos de que los tiempos de cómputo resultaran comparables.

En segundo lugar, se analizó el secado en condiciones variables del aire de entrada, es decir usando series de datos meteorológicos. Se emplearon los datos horarios promedio de 7 años de dos localidades de la zona de producción de maíz de Argentina y se consideraron los meses de febrero a junio, correspondientes a la época de cosecha del cereal en esas zonas.

Finalmente, además se compararon los resultados predichos con datos experimentales de bibliografía y con los obtenidos de los balances macroscópicos de masa y energía.

A partir de estos resultados se analizan las ventajas y desventajas de los ambos modelos, en lo que respecta a su adecuación para predecir el comportamiento del secado de maíz a bajas temperaturas en un lecho fijo y a los tiempos de cómputo que insumen.

### **3.2 Resolución numérica de los modelos PsEst-EQ y PsEst-NEQ por el método de diferencias finitas explícito**

El modelo pseudoestacionario de equilibrio másico y térmico (PsEst-EQ) está conformado por las ecuaciones diferenciales de balance de masa para el agua en el lecho (ec. 2-49) y de balance de energía en el lecho (ec. 2-50):

$$\rho_L \frac{\partial X}{\partial t} = - G_a \frac{\partial Y}{\partial z}$$

$$\left(\rho_L C_{ps}\right) \frac{\partial T_s}{\partial t} = -G_a \left(\frac{\partial Y}{\partial Z}\right) L_g - G_a \left(C_{pah} \frac{\partial T_a}{\partial Z}\right)$$

Que se complementan con la condición de equilibrio térmico (igualdad de temperaturas entre el sólido y el aire) y de equilibrio másico, es decir la isoterma de equilibrio (ec. 2-62).

Estas ecuaciones escritas en diferencias finitas adelantadas, quedan

$$\rho_L \left(\frac{X_{i,j+1} - X_{i,j}}{\Delta t}\right) = -G_a \left(\frac{Y_{i+1,j+1} - Y_{i,j}}{\Delta Z}\right) \quad [3-1]$$

$$\rho_L C_{ps} \left(\frac{T_{si,j+1} - T_{si,j}}{\Delta t}\right) = -G_a \left(L_w \left(\frac{Y_{i+1,j+1} - Y_{i,j}}{\Delta Z}\right) + C_{pa} \left(\frac{T_{ai+1,j+1} - T_{ai,j}}{\Delta Z}\right)\right) \quad [3-2]$$

$$T_{ai+1,j} = T_{si,j} \quad [3-3]$$

$$X_{ei,j} = -\frac{1}{100 C_3} \ln \left[ -\frac{Ln(h_{rai+1,j})(T_{ai+1,j} + C_2)}{C_1} \right] \quad [3-4]$$

Conformando un esquema de resolución explícita.

En lo que respecta al modelo pseudoestacionario de equilibrio térmico y no equilibrio másico (PsEst-NEQ), está constituido por las ecuaciones de balance de masa para el agua en el sólido (ec. 2-7), balance de masa para el agua en el aire (ec. 2-50) y el balance de energía en el lecho (ec. 2-53):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{n_w a}{\rho_L}$$

$$0 = -G_a \frac{\partial Y}{\partial Z} + n_w a$$

$$\rho_L C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = -G_a \left(\frac{\partial Y}{\partial Z}\right) L_g - G_a \left(C_{pah} \frac{\partial T_a}{\partial Z}\right)$$

Ademas de la ecuación constitutiva para la cinética de secado (ec. 2-70) y la condición de equilibrio térmico.

Escribiendo las derivadas en diferencias finitas hacia delante, queda el esquema de resolución explícito:

$$\rho_L \left(\frac{X_{i,j+1} - X_{i,j}}{\Delta t}\right) = -n_{wi,j} a \quad [3-5]$$

$$0 = -G_a \left(\frac{Y_{i+1,j} - Y_{i,j}}{\Delta Z}\right) + n_{wi,j} a \quad [3-6]$$

$$\rho_L C_{ps} \left( \frac{T_{s_{i,j+1}} - T_{s_{i,j}}}{\Delta t} \right) = -G_a \left( L_g \left( \frac{Y_{i+1,j} - Y_{i,j}}{\Delta z} \right) + C_{pah} \left( \frac{T_{a_{i+1,j}} - T_{a_{i,j}}}{\Delta z} \right) \right) \quad [3-7]$$

$$T_{a_{i+1,j}} = T_{s_{i,j}} \quad [3-8]$$

$$n_{wi,j} a_p = \rho_s (X_{i,j} - X_{ei,j}) (K) \left( \frac{t_j}{3600} \right)^N \frac{N}{t_j / 3600} \quad [3-9]$$

En ambos casos se emplean las mismas condiciones iniciales y de borde, dadas por la ec. 2-52:

$$t = 0 \quad X = X_0 \quad T_s = T_{s0} \quad 0 \leq z \leq Z_{max}$$

$$z = 0 \quad Y = Y_{en} \quad T_a = T_{aen} \quad t > 0$$

En el Anexo II se muestran los diagramas de bloques simplificados de la resolución numérica de los modelos PsEst-EQ y PsEst-NEQ, respectivamente.

En todos los casos la condición de finalización de secado es el valor seguro de la humedad en la última capa del lecho: 14,5% b.h. (17 % b.s).

Dado que existe un compromiso entre el tamaño de paso, la estabilidad, el error de truncación y el tiempo de cálculo (Anexo I), es posible optimizar las condiciones de utilización del método numérico.

### 3.3 Comparación de los modelos para condiciones del aire constantes

#### 3.3.1 Análisis de los tamaños de paso en $z$ ( $\Delta z$ ) y en $t$ ( $\Delta t$ ) apropiados para los dos modelos

Se inicia el estudio a condiciones del aire constantes: una temperatura de entrada de 20°C ( $T_a=20^\circ\text{C}$ ) y una humedad relativa de 0,60 ( $h_{ra}=0,60$ ), así como una altura de lecho de 3 m ( $Z_{max}=3$  m) y una humedad inicial de los granos de 0,20 b.s. ( $X_0=0,20$ ). A efectos de buscar una respuesta “sistémica” del modelo y de esa manera verificar que las tendencias predichas sean correctas cuando el comportamiento resulte previsible. Se considera en primera instancia un caudal por unidad de volumen de lecho,  $Q_{vv}$ , de 0,03  $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$  y se realizan las corridas para distintos  $\Delta z$  y distintas relaciones  $\Delta z/\Delta t$ , a efectos de determinar su influencia en la estabilidad, en los valores predichos de tiempo de secado ( $t_s$ ), consumo específico de energía ( $E_{esp}$ ) y tiempo de cómputo ( $t_c$ ). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.1 tanto para el modelo de equilibrio (PsEst-EQ) como para el modelo de no equilibrio (PsEst-NEQ).

Tabla 3.1. Influencia de la relación  $\Delta t/\Delta z$  en la estabilidad, tiempo de cálculo y resultados predichos para los dos modelos.  $Q_{VV}= 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ .

(a) Modelo PsEst-EQ.

$\Delta t/\Delta z$ (h/m)	$\Delta t$ (h)	$t_s$ (h)	$E_{\text{esp}}$ (MJ/ kg. agua evap.)	$t_c$ (s)
$\Delta z=0,12 \text{ m}$				
4	0,48	inestable	inestable	-
2,00	0,240	inestable	inestable	-
1	0,120	232,56	1,0270	3,40
0,5	0,060	232,56	1,0272	21,32
0,25	0,030	232,56	1,0273	102,95
$\Delta z=0,06 \text{ m}$				
4	0,240	inestable	inestable	-
2,00	0,120	inestable	inestable	-
1	0,060	235,68	1,0182	52,53
0,5	0,030	235,65	1,0183	220,26
0,25	0,015	235,63	1,0183	890,974
$\Delta z=0,03 \text{ m}$				
4	0,120	inestable	inestable	-
2,00	0,060	inestable	inestable	-
1	0,030	237,21	1,0136	446,62
0,5	0,015	237,21	1,0137	1785,52
0,25	7,5e-3	237,20	1,0137	7140,37

(b) Modelo PsEst-NEQ

$\Delta t/\Delta z$ (h/m)	$\Delta t$ (h)	$t_s$ (h)	$E_{\text{esp}}$ (MJ/ kg agua evap.)	$t_c$ (s)
$\Delta z=0,12 \text{ m}$				
4,67	0,56	inestable	inestable	-
4,00	0,480	259,68	1,58	0,32
2,00	0,240	259,44	1,58	1,38
1	0,120	259,20	1,58	5,58
0,5	0,060	259,14	1,58	37,13
$\Delta z=0,06 \text{ m}$				
4	0,240	inestable	inestable	-
2,00	0,120	262,44	1,59	19,46
1	0,060	262,38	1,59	87,45
0,5	0,030	262,32	1,59	363,31
0,25	0,015	262,30	1,59	1462,22
$\Delta z=0,03 \text{ m}$				
3,67	0,110	inestable	inestable	-
2,00	0,060	263,94	1,60	181,90
1	0,030	263,94	1,60	727,75
0,5	0,015	263,91	1,60	2914,46
0,25	7,5e-3	263,89	1,60	11662,44

El  $\Delta t$  máximo que puede usarse queda limitado por la necesidad de satisfacer la condición de estabilidad, y ese valor depende del modelo y de  $\Delta z$ . La máxima relación  $\Delta t/\Delta z$  es menor, más estricta, para el modelo PsEst-EQ (de aprox. 1 m/h) que para el modelo PsEst-NEQ (aprox. 2-4 m/h).

Con respecto a los resultados predichos para el tiempo de secado se observa que, en los rangos estudiados,  $\Delta z$  influye mucho más (con diferencias en el orden de 1-2%) que el  $\Delta t$  (con diferencias en el orden de 0,02-0,2%). Posiblemente esto se debe a que en todos los casos,  $\Delta t$  es muy chico respecto del tiempo total de secado, mientras que  $\Delta z$  representa un intervalo proporcionalmente mayor de la altura del lecho.

También se aprecia una diferencia en los tiempos de secado predichos por los modelos del orden del 10%. Tal discrepancia no es muy grande, pero no puede desconsiderarse.

En lo que concierne al tiempo de cálculo, éste aumenta considerablemente al aumentar  $\Delta t$  y  $\Delta z$ ; y para iguales  $\Delta t$  y  $\Delta z$  es siempre mayor para el modelo PsEst-NEQ que para el modelo PsEst-EQ (diferencias del orden del 60%). Esto tendría explicación en la mayor complejidad del modelo NEQ, en el que hay una ecuación diferencial más a resolver además de la inclusión de la ecuación cinética.

Teniendo en cuentas estos resultados, se selecciona un  $\Delta z=0,03$  m por considerarse un valor suficientemente pequeño para lograr bajos errores de truncación. Así se obtienen datos en 101 posiciones del lecho (para  $Z_{\max}=3$  m), es decir cada 3 centímetros, lo cual se considera suficiente. Como los valores predichos no dependen prácticamente del  $\Delta t$  en el rango estudiado, conviene usar los valores de  $\Delta t$  máximos que permiten cumplir con la condición de estabilidad, de modo de evitar excesivos tiempos de cálculo.

Cabe esperar que el valor de  $\Delta t/\Delta z$  máximo dependa también de parámetros del modelo y de las condiciones de proceso, en particular es necesario determinar lo que sucede con aquellos que se van a variar en este trabajo:  $Q_{VV}$ ,  $h_{ra}$  y  $T_a$ . Con este objetivo se realizan corridas para los dos modelos variando el caudal volumétrico específico de aire (Tabla 3.2) y las condiciones (humedad y temperatura) del aire de entrada (Tabla 3.3). También se informan en esas tablas los resultados predichos (tiempo de secado y consumo específico de energía) y los tiempos de cálculo.

Tabla 3.2. Influencia del caudal volumétrico específico de aire en la relación  $\Delta t/\Delta z$  para satisfacer la condición de estabilidad.  $\Delta z=0,03$   $T_a=20^\circ\text{C}$   $h_{ra}=0,60$ .

(a) Modelo PsEst-EQ

$\Delta t/\Delta z$ (h/m)	$\Delta t$ (h)	$t_s$ (h)	$E_{esp}$ (MJ/ kg agua )	$t_c$ (s)
$Q_{VV}=0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$				
5	0,15	inestable	inestable	-
4	0,12	inestable	inestable	-
3,33	0,1	711,60	0,2290	365
3	0,09	711,63	0,2290	452
2	0,06	711,60	0,2290	1008
0,6	0,05	711,60	0,2290	1464
1	0,03	711,60	0,2290	4049
$Q_{VV} \square \square = \text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$				
2	0,06	inestable	inestable	-
1,67	0,05	355,80	0,5720	364
1,33	0,04	355,80	0,5720	573
1	0,03	355,80	0,5720	1017
$Q_{VV} \square = \text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$				
2,00	0,060	inestable	inestable	-
1,67	0,05	inestable	inestable	-
1	0,030	237,21	1,0136	447
0,5	0,015	237,21	1,0137	1785
0,25	7,5e-3	237,20	1,0137	7140

(b) Modelo PsEst-NEQ

$\Delta t/\Delta z$ (h/m)	$\Delta t$ (h)	$t_s$ (h)	$E_{esp}$ (MJ/kg agua.)	$t_c$ (s)
$Q_{VV}=0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$				
10	0,3	inestable	inestable	-
8,33	0,25	720,75	0,303	76
6	0,18	720,72	0,3031	150
5	0,15	720,75	0,3031	218
3,33	0,1	720,70	0,3030	489
$Q_{VV}=0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$				
8,33	0,25	inestable	inestable	-
6	0,18	inestable	inestable	-
5	0,15	379,35	0,8397	58
3,67	0,11	379,20	0,8395	134
1,67	0,05	379,15	0,8393	543
1	0,03	379,11	0,8393	1513
$Q_{VV}=0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$				
3,67	0,110	inestable	inestable	-
2,00	0,060	263,94	1,60	182
1	0,030	263,94	1,60	728
0,5	0,015	263,91	1,60	2914

De los datos presentados en la Tabla 3.2 se observan diferencias en los valores predichos por ambos modelos y, asimismo, más allá de las consideraciones del método numérico, la notable influencia del  $Q_{vv}$ , en tales parámetros de desempeño, así como en el tiempo de cálculo. Esto se analizará en detalle en la sección 3.3.2.

Teniendo en cuenta el compromiso entre el error de truncación y el tiempo de cálculo, así como la necesidad de que los resultados predichos por los dos modelos sean comparables se seleccionan valores de  $\Delta t$  diferentes para cada  $Q_{vv}$  e iguales para ambos modelos, lo cual obliga a usar el limitante (el del modelo PsEst-EQ), de lo que surgen los valores que se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Valores de  $\Delta t/\Delta z$  y de  $\Delta t$  para  $Z_{\max}=3$  m, seleccionados para cada caudal.

$Q_{vv}$ ( $m^3/m^3 s$ )	$\Delta t/\Delta z$ (h/m)	$\Delta t$ (h)
0,01	3,33	0,1
0,02	1,67	0,05
0,03	1	0,03

Al ser más cortos los tiempos de proceso con  $Q_{vv}$  más altos, los  $\Delta t$  posibles de usar resultan menores también. Esto ocurre en realidad porque, si bien el proceso es más corto, todavía sigue siendo suficientemente lento como para que el acortamiento del  $\Delta t$  no influya en la estabilidad.

Tabla 3.4. Aplicación de los modelos para la relación  $\Delta t/\Delta z$  seleccionada según el caudal para distintas humedades y temperaturas del aire.  $Q_{vv}=0,02 m^3/m^3 s$  ( $\Delta t/\Delta z=1,67$ ).  $\Delta z=0,03$  m.

(a) Modelo PsEst-EQ

$T_a$ (°C)	$h_{ra}$	$t_s$ (h)	$E_{esp}$ (MJ/ kg agua)	$t_c$ (s)
20	0,60	355,80	0,572	366
10	0,60	439,70	0,809	563
20	0,40	286,80	0,302	239
10	0,40	364,05	0,567	387

(b) Modelo PsEst-NEQ

$T_a$ (°C)	$h_{ra}$	$t_s$ (h)	$E_{esp}$ (MJ/ kg agua)	$t_c$ (s)
20	0,60	379,15	0,839	547
10	0,60	564,40	1,406	1212
20	0,40	201,00	0,371	152
10	0,40	263,25	0,567	263



Según indican los resultados de la Tabla 3.4, los valores de  $\Delta t/\Delta z$  seleccionados que se presentan en la Tabla 3.3 son adecuados para el rango de estudio de  $h_{ra}$  y  $T_a$ .

### **3.3.2 Comparación de resultados obtenidos aplicando los dos modelos para distintas condiciones operativas: caudal, temperatura y humedad relativa del aire**

Como la condición de finalización de secado es la humedad en la última capa del lecho, la humedad promedio final ( $X_{prf}$ ) en el lecho es diferente y por lo tanto la cantidad total de agua evaporada, dependiendo del modelo empleado y de las condiciones de proceso. Por ello la comparación se realiza también a través de la velocidad media de secado,  $V_s$ , definida como:

$$V_s = \frac{(X_0 - X_{prf})}{t_s} \quad [3-10]$$

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados predichos por los dos modelos, incluyendo la velocidad de secado definida por la ec. 3-10, así como el tiempo de cómputo para distintos caudales y condiciones de entrada del aire.

Se observa que la humedad final promedio del lecho para el modelo EQ es cercana a la humedad de equilibrio con el aire de entrada, lo que es coherente con la suposición de existencia de equilibrio másico. Con respecto a la humedad promedio que predice el modelo NEQ es siempre mayor que para el EQ y la diferencia entre ambas depende de las condiciones de entrada del aire: (i) para aire con humedad relativa de entrada de 60%, tanto a temperatura de 20°C como de 10 °C es menor la diferencia que para (ii) aire con humedad relativa del 40%, tanto a 10°C como a 20°C. En el primer caso los tiempos de cálculo son siempre mayores para el modelo NEQ, lo cual resulta lógico por tratarse de un modelo más complejo. Los tiempos de secado son mayores para el NEQ y las velocidades de secado son mayores para el EQ: la consideración de equilibrio implica la suposición de que el contacto aire-grano es suficientemente prolongado como para que el aire salga en equilibrio másico y térmico con el grano en cada capa. En el segundo caso tanto los tiempos de cálculo como los tiempos de secado son mayores para el modelo EQ, al ser muy inferior la humedad final promedio del lecho. Aún así, las velocidades de secado, que tienen en cuenta estas diferencias en el contenido final de humedad promedio del lecho, siguen siendo mayores para el modelo EQ lo que indica que la mayor evaporación de agua predicha por el modelo EQ tiene mayor efecto en la velocidad que el mayor tiempo de secado calculado en condiciones de baja humedad relativa.

Tabla 3.5. Comparación de modelos pseudoestacionarios de equilibrio (EQ) y de no equilibrio (NEQ). Condiciones del aire constantes.  $Z_{\max}=3\text{m}$   $X_0=0,20$   $T_0=20^\circ\text{C}$   $\Delta z=0,03\text{ m}$ .  $\Delta t$  según caudal (Tabla 3.3).

(a)  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  ( $X_e=0,1391$ )

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3\text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evap.)		$V_s$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}\text{ h}$ ) $\times 10^4$	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
0,01	365	489	0,1398	0,1539	711,60	720,70	0,2290	0,3030	0,84	0,64
0,02	366	547	0,1398	0,1563	355,80	379,15	0,5720	0,8393	1,69	1,15
0,03	452	733	0,1398	0,1577	237,21	263,91	1,0137	1,6048	2,54	1,60

(b)  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  ( $X_e=0,1068$ )

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3\text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evaporada)		$V_s$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}\text{ h}$ ) $\times 10^4$	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
0,01	236	156	0,1081	0,1438	573,60	407,70	0,1209	0,1405	1,6	1,4
0,02	239	152	0,1081	0,1487	286,80	201,00	0,3018	0,3790	3,2	2,5
0,03	295	192	0,1081	0,1514	191,19	134,73	0,5349	0,7134	4,8	3,6

(c)  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  ( $X_e=0,1468$ )

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3\text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evap.)		$V_{sec}$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}\text{ h}$ ) $\times 10^4$	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
0,01	560	998	0,1474	0,1594	879,40	025,10	0,3241	0,4889	0,596	0,396
0,02	563	1212	0,1474	0,1612	439,70	564,30	0,8095	1,4060	1,195	0,688
0,03	694	1737	0,1474	0,1622	293,16	405,69	1,435	2,761	1,79	0,931

(d)  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  ( $X_e=0,1145$ )

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3\text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evaporada)		$V_{sec}$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}\text{ h}$ ) $\times 10^4$	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
0,01	382	254	0,1158	0,1511	728,10	517,60	0,1675	0,205	1,16	0,94
0,02	386	263	0,1158	0,1551	364,05	263,25	0,4182	0,567	2,31	1,71
0,03	477	347	0,1158	0,1573	242,70	181,02	0,7412	1,089	3,47	2,34

Las velocidades de secado resultan siempre mayores en el modelo EQ. Las diferencias entre EQ y NEQ disminuyen al reducirse el caudal de aire, al aumentar la humedad relativa y al disminuir la temperatura, tal cual se esperaba, dado que tales condiciones promueven un secado más lento, que se aproxima mejor a las condiciones de “secado en equilibrio”, para las que el modelo de EQ representa mejor el comportamiento del secador. Se observa que  $Q_{vv}$  es el que más influye seguido de  $h_{ra}$  y finalmente de  $T_a$ .

Las diferencias en consumos específicos de energía  $E_{esp}$  (consumo de energía por unidad de tiempo relativa a la masa de agua evaporada por unidad de tiempo) son

prácticamente iguales a las diferencias en velocidad de secado, ya que ambas son proporcionales al tiempo de secado e inversamente proporcionales a la diferencia entre humedad inicial y final media del lecho. En todos los casos el  $E_{esp}$  predicho por el modelo NEQ es mayor, lo que está de acuerdo con la menor velocidad de secado que predice este modelo.

Se observa que la humedad promedio final aumenta al aumentar el caudal, esto se explica porque al ser mayor el caudal es más rápido el secado y no se alcanzan a secar tanto las capas inferiores, lo que sí ocurre a bajo caudal. En todos los casos se llega a la misma humedad en la última capa, pero la diferencia está en las capas de abajo, cercanas a la entrada de aire.

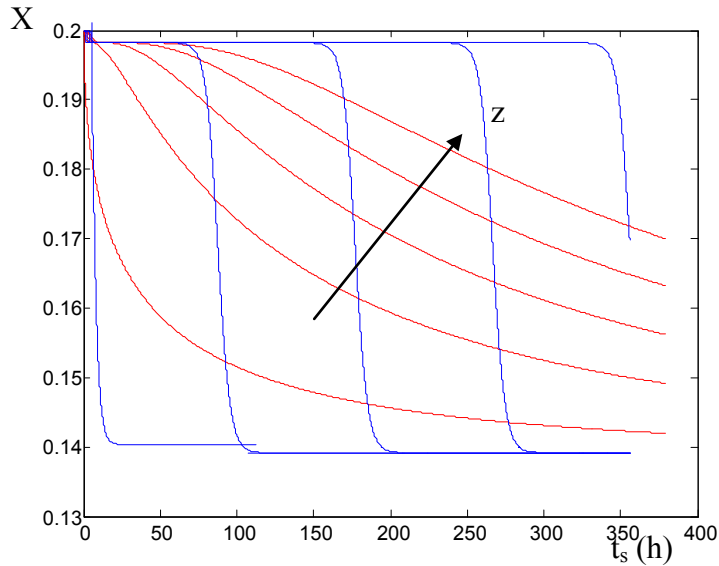
Para realizar una comparación más adecuada se utilizó como condición final de secado la humedad promedio del lecho (en lugar de la humedad de última capa) menor o igual al valor seguro (0,17 dec. b.s.), se realizaron corridas con esta condición final para las cuatro combinaciones temperatura- humedad del aire de entrada y para un mismo caudal. Los resultados se muestran en la Tabla 3.6. Se observa que en este caso los tiempos, tanto de cálculo como de secado, resultan siempre mayores para el modelo NEQ. También se muestra que la humedad máxima final, que es la de la última capa, es mayor al valor seguro. Como el objetivo del secado es lograr la estabilidad del lecho, se usa como criterio de finalización que en la última capa no se supere la humedad de comercialización segura.

Tabla 3.6. Comparación de modelos pseudoestacionarios de equilibrio (EQ) y de no equilibrio (NEQ). Condición final: humedad promedio en el lecho menor al valor seguro. Condiciones del aire constantes.  $Z_{max}=3m$   $X_0=0,20$   $T_0=20^{\circ}C$   $\Delta z=0,03$  m  $\Delta t =0,03$   $Q_{vv}=0,03$  ( $m^3/m^3$  s).

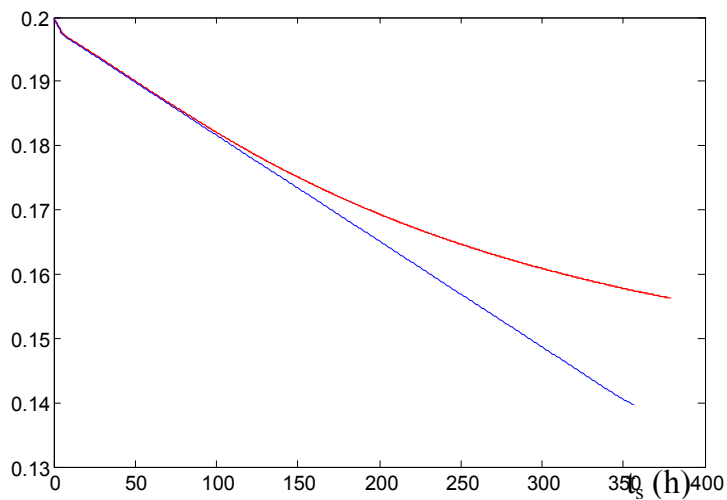
$T_a-h_{ra}$	$t_c$ (s)		$X_{maxf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evap.)		$V_s$ ( $kg_{agua}/kg_{ss}$ h) $\times 10^4$	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
20-0,60	102	203	0,198	0,185	114	138,84	0,977	1,19	2,6	2,16
20-0,40	25	40	0,197	0,183	57,39	63,63	0,492	0,545	5,22	4,71
10-0,60	180	560	0,194	0,179	150,03	230,58	1,28	1,97	1,99	1,30
10-0,40	40	86	0,193	0,183	72,48	92,43	0,62	0,79	4,14	3,24

En las Figuras 3.1 y 3.2 se muestran los perfiles de humedad en función del tiempo para distintas posiciones del lecho (a) y la humedad promedio en el lecho en función del

tiempo (b), para un caudal de aire intermedio en el rango estudiado ( $Q_{vv}=0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ ) y  $20^\circ\text{C}$  de temperatura de entrada del aire, para los dos valores de humedad relativa analizados: 0,60 (Caso I) y 0,40 (Caso II), respectivamente.

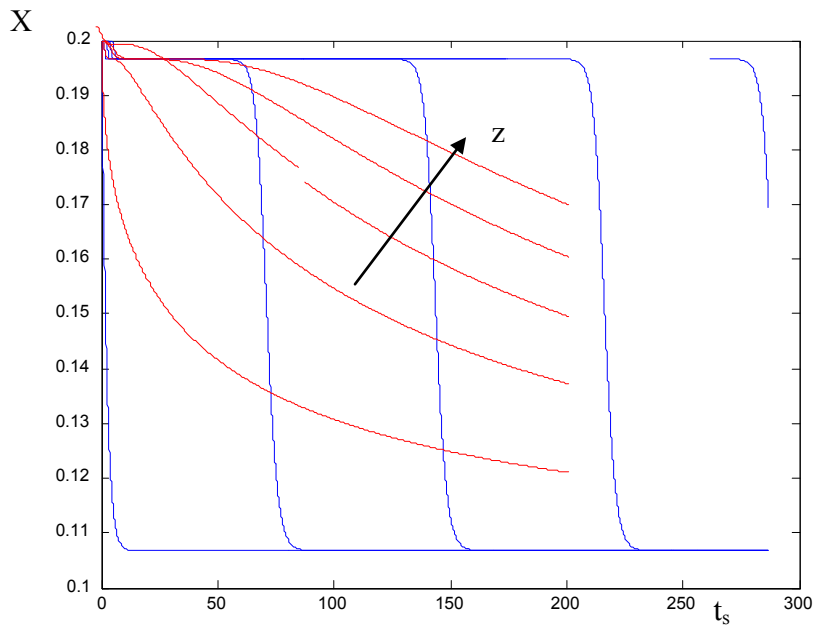


(a)

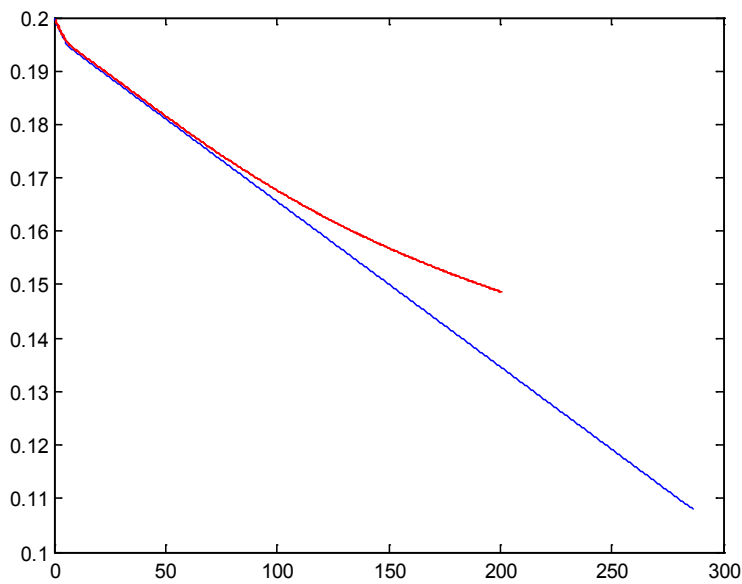


(b)

Figura 3.1. (a) Perfiles de humedad a distintas posiciones del lecho (b) humedad promedio del lecho en función del tiempo. Modelo EQ (-) y modelo NEQ (-).  $Q_{vv}=0,02$  Caso (I)



(a)



(b)

Figura 3.2. (a) Perfiles de humedad a distintas posiciones del lecho (b) humedad promedio del lecho en función del tiempo. Modelo EQ (-) y modelo NEQ (-).  $Q_{vV}=0,02$   $T_a=20$   $h_{ra}=0,40$ . Caso (II).

Se puede ver que los perfiles que predicen ambos modelos son bastante diferentes, y esa diferencia es más marcada en la situación de baja  $h_{ra}$ .

La humedad promedio disminuye con el tiempo en ambos casos, tal cual lo esperado, pero esa disminución es más rápida para el modelo EQ. Esto ocasiona que el tiempo de secado sea mayor para el NEQ con aire a  $h_{ra}=0,60$ , aunque con aire a  $h_{ra}=0,40$  el tiempo de secado EQ es mayor, porque debe llegar hasta una humedad final media muy inferior. Se observa que, cuando empieza a disminuir la humedad del tope del lecho en el modelo NEQ, la curva de humedad media se aleja de la linealidad. Esta linealidad en el descenso de la humedad media no está emparentada con un mecanismo de secado de partícula con control externo, como suele verse en las típicas “curvas características de secado” de los libros de texto (Crapiste y Rotstein, 1997), sino que ocurre a nivel de lecho y con control interno.

### **3.4 Comparación de los modelos para condiciones variables del aire**

En este caso se utiliza aire en condiciones variables como entrada al secadero. Se consideró una serie histórica de datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa y presión barométrica) para dos regiones productoras de maíz de Argentina, la ciudad de Junín, Bs As ( $34^{\circ} 31' S$ ,  $60^{\circ} 52' W$ ) y la ciudad de Río Cuarto, Cba. ( $33^{\circ} 7' S$ ,  $64^{\circ} 20' O$ ). Los datos fueron provistos generosamente por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina ([www.smn.gov.ar](http://www.smn.gov.ar)). Se promediaron los datos horarios de los años 2000 a 2006 de los meses de cosecha de maíz en esta zona: febrero a junio (es decir, de  $7 \times 24 \times 150 \times 3$  datos, el promedio los redujo a  $24 \times 150 \times 3$  datos). Estos datos horarios promediados de temperatura y humedad se cargaron en forma de vectores en un archivo, desde el cual el programa principal toma los datos al momento de calcular las condiciones de entrada del aire, esto para cada tiempo en que se llevan a cabo los cálculos, lo cual depende del  $\Delta t$  usado. Para cada tiempo los valores correspondientes de temperatura y humedad de entrada del aire se obtienen por interpolación cúbica spline de los datos.

Dado que los tiempos de cálculo se incrementan considerablemente con respecto al caso de condiciones constantes del aire, se adopta para este caso un  $\Delta z$  igual al doble del caso anterior o sea  $\Delta z=0,06$  m y el  $\Delta t$  máximo para cumplir con la condición de estabilidad.

En la Tabla 3.7 se muestran los valores de temperatura y humedad relativa del aire promedios mensuales de cada mes en cada región, así como la humedad de equilibrio del sólido correspondientes a esas condiciones del aire, a efectos de tener una idea de las condiciones del aire y su relación con la humedad de equilibrio, que en algunos casos es mayor que la humedad final deseada y por lo tanto no podría completarse el secado con operación continua del ventilador.

Tabla 3.7. Condiciones meteorológicas de aire, meses de Febrero a Junio (a) Junín, (b) Río Cuarto.

(a) Junín

Mes	$T_a$ promedio (°C)	$h_{ra}$ promedio (dec.)	$X_e$ (dec. b.s.)
Febrero	22,2	0,736	0,166
Marzo	19,9	0,749	0,170
Abril	16,2	0,741	0,171
Mayo	12,7	0,779	0,184
Junio	10,6	0,780	0,186

(b) Río Cuarto

Mes	$T_a$ promedio (°C)	$h_{ra}$ promedio (dec.)	$X_e$ (dec. b.s.)
Febrero	21,9	0,738	0,162
Marzo	20,2	0,723	0,164
Abril	16,3	0,736	0,170
Mayo	12,2	0,738	0,174
Junio	10,3	0,722	0,171

Se observa que en ambas localidades la temperatura promedio disminuye de 20 a 10°C entre la finalización del verano (Febrero-Marzo) y el comienzo del invierno (Junio). La humedad promedio no cambia prácticamente para Río Cuarto, pero sí se observan valores un poco más elevados para Junín en Mayo y Junio.

Es de destacar la clara oscilación entre día y noche que se observa en todos los casos, en la Figura 3.3 se presentan la variación horaria de  $T_a$  y  $h_{ra}$  para el mes de Febrero en Junín, los demás meses en Junín y todos los meses en Río Cuarto se muestran en el Anexo III.

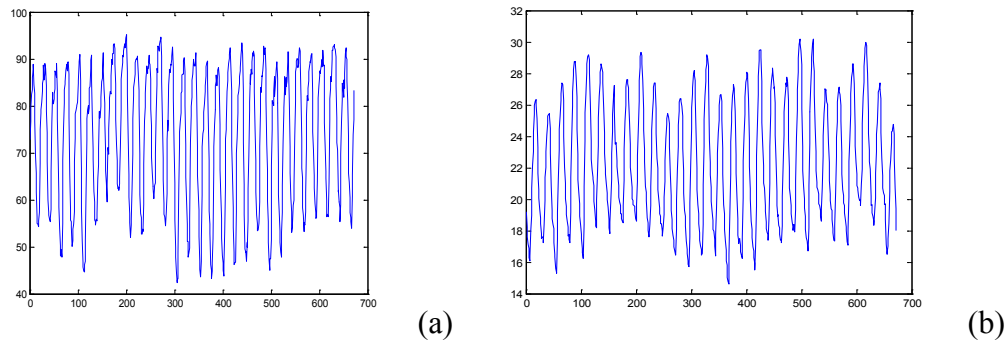


Figura 3.3. Condiciones meteorológicas horarias del aire Febrero Junín (a) Humedad relativa porcentual (b) Temperatura

### 3.4.1 Comparación de los modelos para condiciones variables del aire. Junín y Río Cuarto, mes de Febrero

Para el mes de febrero, en el cual las condiciones meteorológicas permiten cumplir con el objetivo de humedad final en la última capa igual al valor seguro de 0,17 b.s. en operación continua, se presenta una tabla comparativa de los resultados predichos (humedad promedio, tiempo de secado, consumo de energía y velocidad de secado) y el tiempo de cálculo, para dos caudales de aire y para los dos modelos (Tabla 8).



Tabla 3.8. Comparación de modelos pseudoestacionarios de equilibrio (EQ) y de no equilibrio (NEQ). Condiciones del aire variables: mes de Febrero Junín y Río Cuarto,  $Z_{\max}=3\text{m}$   $X_0=0,20$   $T_0=20^\circ\text{C}$   $\Delta z=0,06$   $\Delta t=0,05$ . Condición finalización secado: humedad última capa menor o igual al valor seguro (0,17 dec., b.s.) ó finalización del mes (670 h).

(a) Febrero Junín

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{\text{prf}}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{\text{esp}}$ (MJ/ kg agua evap.)		$V_{\text{sec}}$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}\text{h}$ ) $\times 10^4$	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
0,02	1032	3422	0,157	0,165	404,80	670 (0,174)	0,92	1,97	1,05	0,42
0,03	475	2274	0,162	0,167	273,85	670 (0,172)	1,85	6,17	1,40	0,41

(b) Febrero Río Cuarto

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{\text{prf}}$ (dec. B.s.)		$t_s$ (h)		$E_{\text{esp}}$ (MJ/ kg agua evaporada)		$V_{\text{sec}}$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}} \text{ h}$ ) $\times 10^4$	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
0,02	1181	3034	0,162	0,168	443,65	670 (0,176)	1,13	2,03	0,86	0,47
0,03	525	3015	0,166	0,169	296,55	670 (0,175)	2,24	5,59	1,15	0,46

Se observó en este caso un comportamiento diferente que para condiciones del aire constantes, el  $\Delta t$  máximo estuvo limitado por el modelo NEQ y resultó menor a menores caudales de aire: los problemas de estabilidad son más críticos para el modelo NEQ que para el modelo EQ y para valores bajos de caudal de aire. Esto es esperable, puesto que la ecuación cinética debe predecir en un rango muy alto de variación de humedad relativa. Si se tiene en mente la isoterma de adsorción, altas humedades relativas implican humedades de equilibrio instantáneas muy altas que implican el rehumedecimiento de los granos. Por tanto, el comportamiento cinético es muy variable e influencia las condiciones de estabilidad, respecto de las estudiadas para condiciones de aire constante. Este estudio empírico de la estabilidad del modelo puede beneficiar incluso la teoría del análisis numérico, puesto que en la bibliografía se nota una gran escasez de ejemplos sobre sistemas de ecuaciones diferenciales parciales compuestos exclusivamente por derivadas primeras.

El tiempo de cálculo es de 3 a 5 veces mayor para el modelo NEQ. Se observa también que con un caudal de 0,03 ya no hay ventajas respecto del secado con aire caliente, en cuanto al consumo específico de energía.

El tiempo de secado es mayor y la velocidad de secado menor para el modelo NEQ, lo que coincide con lo observado para las condiciones del aire constantes. Incluso según el modelo NEQ no se llega al valor deseado de última capa en todo el mes.

Se aprecia una diferencia importante en el tiempo de secado predicho por ambos modelos, y esa diferencia es mayor a mayor  $Q_{VV}$ . Hay que tener en cuenta además que no se llega al mismo valor de humedad final de última capa, según el modelo EQ se alcanza el valor deseado (0,17) en el transcurso del mes, pero según el modelo NEQ es mayor al finalizar el mes (670 h).

En las Figuras 3.4 y 3.5 se muestran los perfiles de humedad del sólido a distintas posiciones en el lecho en condiciones meteorológicas de Junín en Febrero, para los modelos EQ y NEQ, respectivamente. En la Figura 3.6 se presenta la humedad promedio en función del tiempo, para ambos modelos.

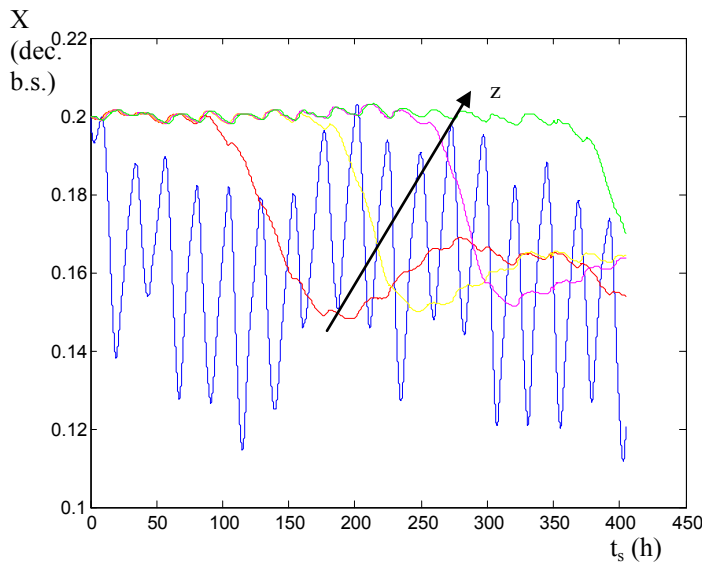


Figura 3.4. Perfiles de humedad a distintas posiciones del lecho  $Q_{VV}=0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$  s. Modelo EQ. Junín Febrero. ---0,06m --- 0,9 m --- 1,5m --- 2,1 m --- 3m

Se observa que en la primera capa (azul) la humedad oscila siguiendo los cambios en las condiciones de entrada del aire, esto se amortigua en las capas superiores del lecho.

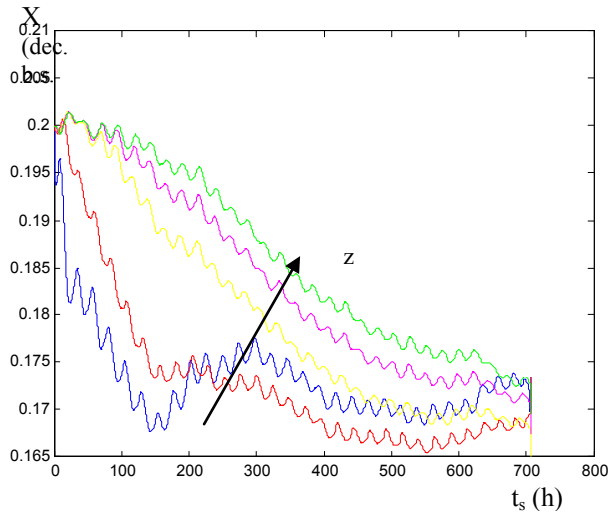


Figura 3.5. Perfiles de humedad a distintas posiciones del lecho  $Q_{VV}=0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ . Modelo NEQ. Junín Febrero. ---0,06m --- 0,9 m --- 1,5m --- 2,1 m --- 3m

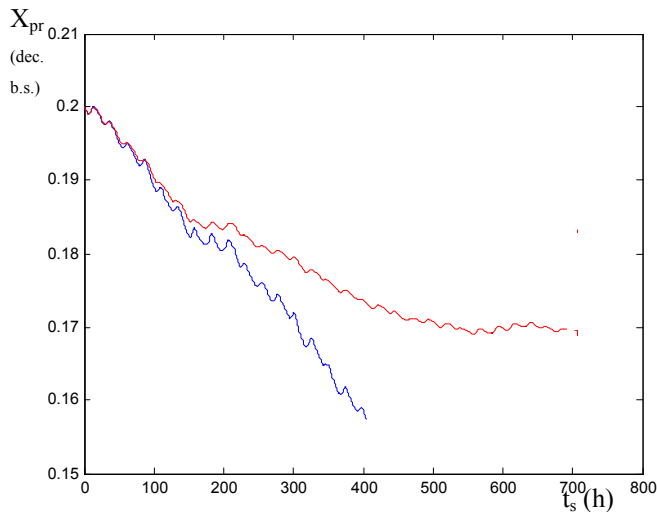


Figura 3.6. Humedad promedio en el lecho.  $Q_{VV}=0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ . Modelos EQ(-) NEQ (-). Junín febrero.

Los perfiles de humedad en distintas posiciones del lecho y de humedad promedio son considerablemente diferentes para los dos modelos, tal como se observó para condiciones constantes.

### 3.4.2 Comparación de los modelos para condiciones variables del aire. Junín y Río Cuarto. Meses Marzo a Junio

Para los meses restantes (marzo, abril mayo y junio), en los que hay casos donde no es posible lograr el objetivo de humedad final de la última capa de 0,17 b.s. se realizaron corridas para un tiempo total de secado inferior o igual al del mes (700 horas

para los meses de 30 días y 730 horas para los de 31 días) y se comparan la humedad final alcanzada en la última capa, así como la humedad promedio en el lecho (Tabla 3.9).

Tabla 3.9. Comparación de modelos pseudoestacionarios de equilibrio (EQ) y de no equilibrio (NEQ). Condiciones del aire variables: meses marzo a junio. (a) Junín y (b) Río Cuarto.  $Z_{\max}=3\text{m}$   $X_0=0,20$   $T_0=20^\circ\text{C}$   $Q_{vv}=0,03$   $\Delta z=0,06\text{ m}$   $\Delta t=0,05\text{ h}$ .

a) Junín

Mes	$t_c$ (s)		$X_{\text{prf}}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$X_f$ última capa (dec. b.s.)	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
Marzo	538	3427	0,172	0,176	306,2	730	0,170	0,177
Abril	1699	3695	0,166	0,179	533,10	700	0,170	0,181
Mayo	3187	4557	0,179	0,191	730	730	0,186	0,191
Junio	2931	4947	0,184	0,193	700	700	0,178	0,193

b) Río Cuarto

Mes	$t_c$ (s)		$X_{\text{prf}}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$X_f$ última capa (dec. b.s.)	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
Marzo	414	3422	0,161	0,169	268	730	0,17	0,171
Abril	2187	3149	0,152	0,175	607	700	0,170	0,178
Mayo	679	3425	0,169	0,179	342	730	0,170	0,182
Junio	1005	3121	0,164	0,179	417	700	0,170	0,182

La humedad promedio final del lecho que predice el modelo de NEQ es, en todos los casos, mayor que la predicha por el modelo EQ. En lo que respecta a la humedad final de última capa, hay una clara diferencia entre lo que ocurre con el modelo EQ y el NEQ. Según el modelo NEQ en todos los casos el valor es mayor al deseado, mientras que según el EQ se alcanza el valor deseado para los meses de marzo y abril en Junín y para todos los meses en Río Cuarto. Esta diferencia entre las dos localidades se explica por la mayor humedad relativa del aire en mayo y junio de Junín. La menor diferencia entre los modelos se da para los meses de mayo y junio en Junín ( $h_{ra}$  alta). En general las diferencias entre los modelos siguen la tendencia ya observada: la velocidad de secado (relación entre la masa de agua evaporada y el tiempo de secado) es mayor para el modelo EQ. Los resultados de este modelo no son “conservadores” en el sentido de que pueden sugerir una exposición a un tiempo de proceso que no es suficiente para

estabilizar los granos. Y como son distintos a los del modelo NEQ es evidente se requiere seleccionar uno de los dos modelos. Las diferencias son importantes para todos los casos estudiados: condiciones del aire constantes y variables, y aunque las diferencias son menores cuando disminuye  $Q_{vv}$  y aumenta  $h_{ra}$ , aún siguen siendo relevantes en tales casos. Por tanto, es necesario determinar cual de los dos modelos es el adecuado en el sentido de representar mejor lo que ocurre en la realidad.

El tiempo de cálculo sigue siendo en todos los casos mayor para el modelo NEQ, de 1,3 a 8 veces mayor. Así es que, desde este punto de vista, siempre conviene el modelo EQ.

En el Anexo III se muestran los graficos de  $h_{ra}$  y  $T_a$  vs. tiempo así como los perfiles de humedad en el lecho y la humedad promedio en función del tiempo que predicen los dos modelos para Río Cuarto y los meses de marzo a junio.

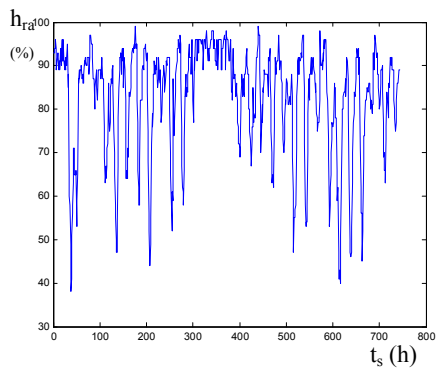
### 3.4.3 Comparación de los modelos para condiciones variables del aire. Junín Mayo. Datos del aire de un año y datos del aire promedio 7 años

En el caso de mayo Junín se hicieron dos corridas: en una tomando los datos de del 2000 y en la otra el promedio de los 7 años (Tabla 10).

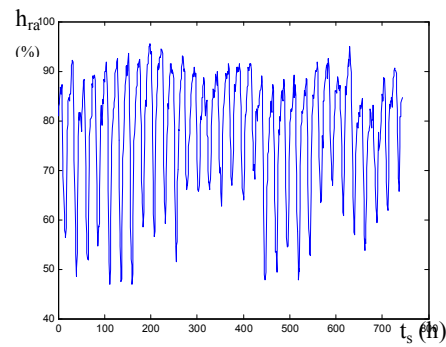
Tabla 3.10. Influencia de los datos considerados para el aire. Mayo Junín. Condiciones del aire de un año y condiciones del aire promedio de 7 años.  $Z_{max}=3m$   $X_0=0,20$   $T_0=20^\circ C$   $Q_{vv}=0,03$   $\Delta z=0,06$  m  $\Delta t=0,05$  h.

Período Condiciones del aire	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$X_f$ <i>ultima capa</i> (dec. b.s.)	
	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ	EQ	NEQ
1 año	3153	6195	0,194	0,202	730	730	0,203	0,200
Promedio de 7 años	3187	4557	0,179	0,191	730	730	0,186	0,191

En este mes, para el año 2000 entre las 300 y 400 horas de secado (días 13 a 16), la humedad relativa se mantiene por encima del 90% (Fig. 7a), mientras que para el promedio de los 7 años si bien la  $h_{ra}$  se mantiene alta los valores son menores, ya que se promedian con los de otros años en los que los valores de  $h_{ra}$  son menores en esos días del mes (Fig. 7b). Se observa que al promediar los 7 años se pierden los datos de los días completamente húmedos, y por lo tanto no se puede tener en cuenta su efecto.



(a)

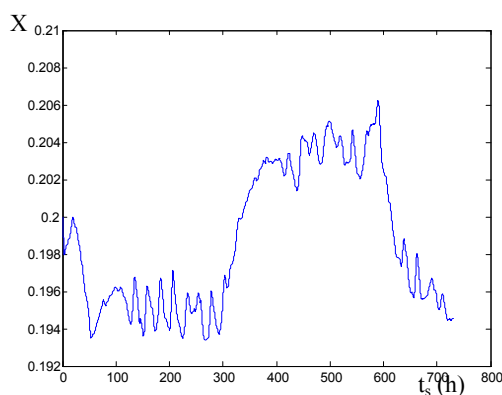


(b)

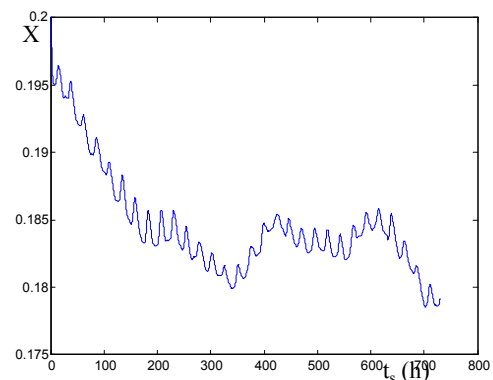
Figura 3.7. Humedad relativa del aire (%) vs tiempo (horas). Mayo Junín. (a) datos del año 2000. (b) datos promedio de 7 años.

Esto se refleja en la humedad promedio del grano que predice el modelo EQ: en el período de alta  $h_{ra}$  para el caso de datos de un año se rehumedece el grano que se había secado y ya no tiene tiempo de bajar hasta el valor deseado en el resto del mes (Fig. 3.8.(a)). La cinética supone que la rehidratación va a la humedad promedio, cuando en realidad queda cerca de la superficie y tardaría en penetrar en el grano dadas las bajas temperaturas. Con este fin habría que desarrollar modelos cinéticos de grano basados en balances microscópicos, pero con esta escala de tiempos de secado, los tiempos de cálculo serían extremadamente largos y anularían la capacidad del modelo para usarse en control o simulación para diseño interactivo.

Si bien se observa lo mismo para los datos promedio no es tan marcada la consecuencia (Fig. 3.8 (b), el efecto está amortiguado. Lo mismo se observa para el modelo NEQ (Fig. 3.9 (a) y (b) ).



(a)



(b)

Figura 3.8. Humedad promedio del sólido en el lecho ( $X_{pr}$ ) vs. tiempo (horas). Modelo EQ. Mayo Junín. (a) datos del aire de un año (b) datos promedio de 7 años.

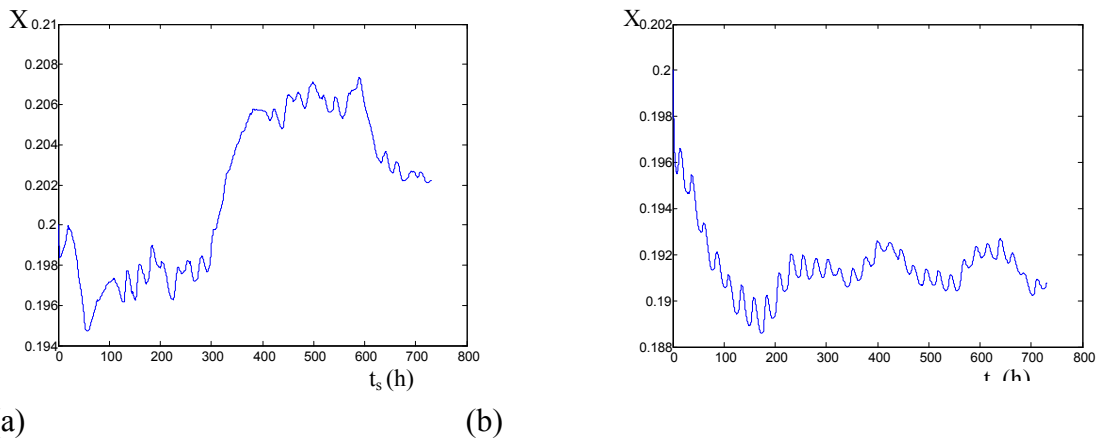


Figura 3.9. Humedad promedio del sólido en el lecho ( $X_{pr}$ ) vs. tiempo (horas). Modelo NEQ. Mayo Junín. (a) datos del aire de un año (b) datos promedio de 7 años

Esto indica que hay que tener la precaución de considerar estas situaciones al usar el modelo para analizar el comportamiento del secadero y por otra parte que sería conveniente apagar el ventilador en esos períodos de duración prolongada de alta humedad.

### 3.5 Comparación con datos experimentales

Se utilizarán para la comparación datos experimentales de bibliografía (Eichelberger y col., 2009). Se trata del secado de maíz en un silo de 1,5 m de diámetro y 3,2 m de altura, que opera con un flujo de aire de  $4 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ , que considerando una densidad de lecho de  $1,28 \text{ t/m}^3$ , es de  $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ , y aire ambiente en condiciones variables. Se presentan los datos diarios de temperatura y humedad relativa del aire así como los perfiles de humedad del sólido a varias alturas del lecho y el valor promedio, en función del tiempo. Se usan para la comparación los datos correspondientes al funcionamiento ininterrumpido del ventilador (exceptuando los puntos (\*)).

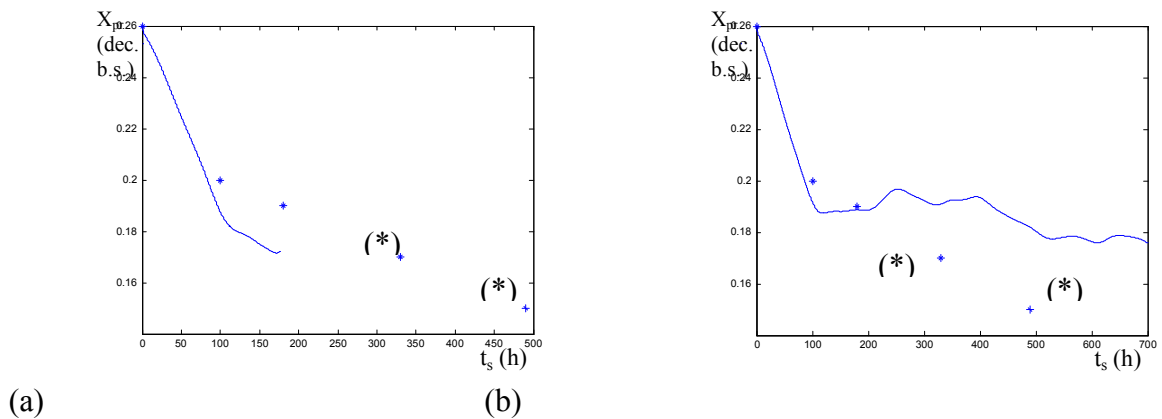


Figura 3.10. humedad promedio en el lecho en función del tiempo: valores predichos por los modelos y valores experimentales. (a) modelo EQ (b) modelo NEQ.

En las Figuras 3.10 (a) y 3.10 (b) se muestran la humedad promedio que predicen los modelos EQ y NEQ, con los datos experimentales.

Se observa que el modelo NEQ representa bien los datos experimentales, mientras que el EQ predice valores menores que los medidos, o sea que la alta velocidad de secado que predice ese modelo no se condice con lo que ocurre realmente, al menos en estas condiciones operativas. Se muestra el rango completo de tiempo en el que se dispone de datos experimentales, aunque cabe destacar que los datos a partir de 300 horas no se pueden comparar ya que a partir de ese momento el ventilador del silo no se hace funcionar en forma continua, lo que no ocurre en el modelo de simulación. Como a partir de ese momento hay un período, entre 300-400 horas, de alta humedad y baja temperatura del aire (Figura 3.11), la circulación de aire en el lecho no es efectiva para el secado. Esta es otra evidencia de la conveniencia de apagar el ventilador en períodos de alta humedad.

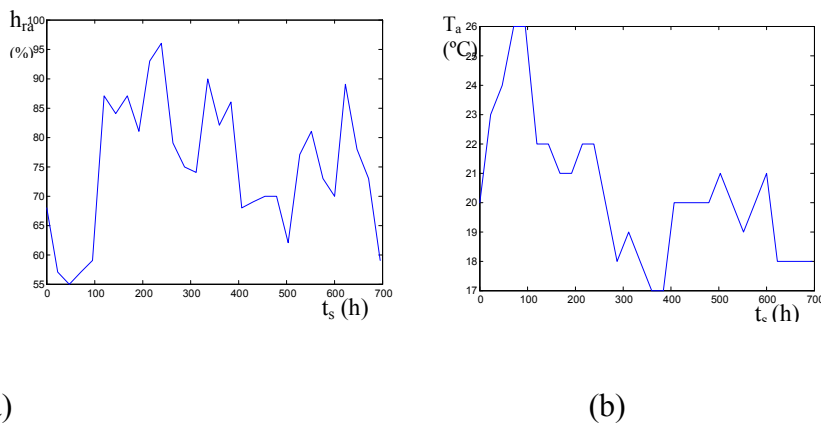


Figura 3.11. Condiciones del aire correspondientes a los datos experimentales. (a)  $h_{ra}$  (%) (b)  $T_a$ .

### 3.6 Comparación con balances de masa y energía macroscópicos globales

A efectos de contar con una verificación adicional de los resultados del modelo se realizaron balances de masa y energía microscópicos globales para todo el proceso. Se calcularon así la humedad absoluta y la temperatura de salida promedio del aire a partir del modelo NEQ y a partir de estos balances, para condiciones del aire de entrada constantes.



Para realizar el balance de masa macroscópico global se considera que toda el agua que pierde el sólido (agua evaporada) pasa al aire, que es quien se encarga de acarrearla fuera del lecho:

Masa de agua evaporada=masa de agua que se incorpora al aire

Donde:

Masa de agua evaporada= masa de sólidos secos x (humedad inicial del lecho-humedad promedio final del lecho

Masa de agua que se incorpora al aire que atraviesa el lecho= caudal de aire seco x tiempo de secado x (humedad promedio del aire de salida-humedad aire entrada)

Lo que, escrito en forma de ecuación, es:

$$S Z_{\max} \rho_L (X_0 - X_{\text{prf}}) = Q_{\text{vv}} S Z_{\max} t_s \rho_a (Y_{\text{salpr}} - Y_{\text{en}}) \quad [3-10]$$

A partir de la ecuación (3-10) se obtiene la humedad promedio del aire de salida,  $Y_{\text{salpr}}$

Para el balance de energía macroscopico global se considera que el cambio de entalpía del sólido es igual a la del aire, lo que físicamente implica que la energía necesaria para evaporar el agua y para el cambio en el calor sensible del sólido es aportada por el calor sensible del aire a su paso por el lecho:

Cambio de entalpia del sólido = cambio de entalpia del aire

Donde:

Cambio de entalpia del sólido= masa de sólidos secos x (entalpia inicial-entalpia final promedio)

Cambio de entalpia del aire= masa de aire seco x (entalpia de entrada del aire-entalpia de salida promedio del aire)

En forma de ecuación:

$$S Z_{\max} \rho_L C_{\text{ps}} (T_{s0} - T_{\text{sprf}}) = Q_{\text{vv}} S Z_{\max} t_s \rho_a [C_{\text{pa}} (T_{\text{asalpr}} - T_{\text{aen}}) + Lg(Y_{\text{salpr}} - Y_{\text{en}})] \quad [3-11]$$

A partir de la ecuación (3-11) se obtiene la temperatura promedio del aire de salida,  $T_{aspr}$

En la Tabla 3.11 se muestran los valores de salida del aire calculados con estas ecuaciones y predichos por el modelo NEQ para distintas condiciones del aire de entrada.

Tabla 3.11. Comprobación de resultados. Predicho por el modelo (NEQ) y de balance macroscópico de no equilibrio. Condiciones del aire constantes.  $Z_{max}=3m$   $X_0=0,20$   $T_0=20^\circ C$   $\Delta z=0,03 m$   $\Delta t$  según caudal (Tabla 3.3).

(a)  $T_a=20^\circ C$ ,  $h_{ra}=0,60$

$Q_{vv}$ ( $m^3/m^3 s$ )	$Y_{spr}$ (b.s.)		$T_{aspr}$ ( $^\circ C$ )	
	Balance macroscópico	Modelo NEQ	Balance macroscópico	Modelo NEQ
0,01	0,0097	0,0097	17,60	17,70
0,02	0,0096	0,0096	17,88	17,93
0,03	0,0095	0,0095	18,03	18,08

(b)  $T_a=20^\circ C$ ,  $h_{ra}=0,40$

$Q_{vv}$ ( $m^3/m^3 s$ )	$Y_{spr}$ (b.s.)		$T_{aspr}$ ( $^\circ C$ )	
	Balance macroscópico	Modelo NEQ	Balance macroscópico	Modelo NEQ
0,01	0,0078	0,0078	15,64	15,02
0,02	0,0077	0,0076	15,37	15,42
0,03	0,0076	0,0075	15,54	15,69

(c)  $T_a=10^\circ C$ ,  $h_{ra}=0,60$

$Q_{vv}$ ( $m^3/m^3 s$ )	$Y_{spr}$ (b.s.)		$T_{aspr}$ ( $^\circ C$ )	
	Balance macroscópico	Modelo NEQ	Balance macroscópico	Modelo NEQ
0,01	0,0052	0,0051	8,83	8,88
0,02	0,0051	0,0051	8,99	9,04
0,03	0,0050	0,0050	9,09	9,14

(d)  $T_a=10^\circ C$ ,  $h_{ra}=0,40$

$Q_{vv}$ ( $m^3/m^3 s$ )	$Y_{spr}$ (b.s.)		$T_{aspr}$ ( $^\circ C$ )	
	Balance macroscópico	Modelo NEQ	Balance macroscópico	Modelo NEQ
0,01	0,0044	0,0044	7,11	7,19
0,02	0,0043	0,0042	7,44	7,52
0,03	0,0042	0,0041	7,67	7,75

Se observan que los valores promedio de humedad y temperatura de salida del aire calculados con el modelo NEQ y con los balances macroscopicos son practicamente identicos, por lo que esta comprobacion puede ser considerada una validacion adicional al modelo aplicado para simular el secado en lecho fijo a bajas temperaturas en el sentido que coinciden sus resultados con los obtenidos de una manera simple pero claramente respaldada por conceptos fenomenologicos del proceso de secado.

### 3.7 Conclusiones

El  $\Delta t$  máximo que puede usarse para un dado  $\Delta z$  queda limitado por la necesidad de satisfacer la condición de estabilidad en el método explícito usado para resolver los dos modelos considerados en este Capítulo: pseudoestacionario de equilibrio (PsEst-EQ) y pseudoestacionario de no equilibrio (PsEst-NEQ). La máxima relación  $\Delta t/\Delta z$  depende de las condiciones operativas, especialmente del caudal de aire. Con respecto a los resultados predichos para el tiempo de secado se observa que, en los rangos estudiados,  $\Delta z$  influye mucho más que  $\Delta t$  y el tiempo de cálculo aumenta considerablemente al disminuir los tamaños de paso. Teniendo en cuenta estas consideraciones se selecciona para la comparación de modelos en condiciones constantes del aire un  $\Delta z=0,03$  m y para condiciones variables del aire  $\Delta z=0,06$  m, y el máximo valor de  $\Delta t$  que permite satisfacer la condición de estabilidad.

Para condiciones constantes del aire el modelo simplificado PsEst-EQ predice una aproximación rápida de los granos al valor de equilibrio con el aire. Si las condiciones del aire son tales que la humedad de equilibrio resulta muy inferior a la humedad final deseada, la humedad final promedio del lecho predicha difiere considerablemente según el modelo de secado que se aplique y tales discrepancias se extienden a otros parámetros de desempeño calculados, como los tiempos de secado y consumos específicos de energía. La diferencia entre los resultados predichos por los dos modelos depende fuertemente de la humedad relativa del aire de entrada, y aumentan al aumentar el caudal de aire.

Para condiciones variables del aire (es decir, cuando se analizan series históricas de datos meteorológicos horarios, que resultan altamente variables) la humedad promedio del lecho no difiere de la misma manera entre los modelos que para los casos de humedad de equilibrio diferente de humedad deseada como ocurre con aire en condiciones constantes. Esto se atribuye a las condiciones cambiantes del aire, las

cuales hacen variar también la humedad de equilibrio. De alguna manera podría decirse que no “hay tiempo suficiente” para alcanzar el equilibrio entre cambios de las condiciones de entrada del aire, para el modelo PsEst-EQ. Los resultados predichos por ambos modelos difieren considerablemente: el modelo PsEst-EQ predice tiempos de secado y consumos de energía menores que el modelo PsEst-NEQ, para todos los caudales de aire analizados, lo cual sugiere procesos más cortos y con menor consumo de energía que los que pueden requerir realmente los granos, por lo cual su empleo no resulta prudente. La comparación con datos experimentales indica que el modelo NEQ representa mejor el comportamiento del secador y los resultados se verifican apropiadamente con los resultados de balances macroscópicos globales.

Se concluye que los modelos de equilibrio sólo pueden usarse para algunos casos (altas humedades relativas y bajos caudales de aire) en el secado con aire en condiciones constantes y no pueden usarse para predecir el comportamiento de un secadero en condiciones variables del aire, resultando entonces más adecuado el empleo del modelo de no equilibrio.

## Capítulo 4

---

### **Efecto del método numérico en la resolución del modelo Pseudoestacionario de no equilibrio (PsEst-NEQ)**

#### **4.1. Introducción**

Se ha mostrado en el Capítulo 3 que la lenta operación de secado a bajas temperaturas se representa mejor con el modelo de no equilibrio (PsEst-NEQ) y que la resolución numérica de este modelo por el método explícito de diferencias finitas demanda tiempos de cálculo demasiado prolongados dado que la relación  $\Delta t/\Delta z$  máxima que puede utilizarse está condicionada por la estabilidad. Esta situación lleva a considerar otros métodos numéricos que podrían resultar más eficientes para resolver el sistema de ecuaciones que constituyen el modelo del secadero. Con esta motivación se abordó en este capítulo un estudio comparativo de tres métodos numéricos para la resolución del modelo PsEst-NEQ: Además del método de diferencias finitas explícito (DFE) aplicado en el Capítulo 3, se estudian en este Capítulo el método de diferencias finitas implícito (DFI) y el método de las líneas (MDL).

Un modelo de simulación apropiado debería insumir un corto tiempo de cálculo de modo de proveer una salida suficientemente rápida como para interactuar con el diseñador. Además, debe ser flexible y robusto, capaz de realizar predicciones en un amplio rango de condiciones operativas de los granos y del aire. También se espera que el modelo provea una buena estimación, tanto de los tiempos de secado como de la calidad del producto, cuando se use para el secado con aire en condiciones meteorológicas, lo que implica el uso de datos reales de temperatura y humedad del aire para distintas zonas y épocas del año.

Autores previos han empleado varios métodos numéricos para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales parciales que representa el fenómeno de secado de granos con aire, siendo el más directo el método de diferencias finitas explícito (Dalpasquale y col., 2008). Este método es estable para pequeños pasos de tiempo, siendo en estas condiciones más rápido que el método implícito. No obstante, los métodos implícitos permiten el uso de mayores pasos de tiempo al no estar

condicionados por problemas de estabilidad, y consecuentemente, permiten reducir considerablemente el número de puntos de la grilla mediante la cual se discretiza el dominio espacio-temporal, aunque esto tendría la posible desventaja de resignar información importante (Finlayson, 1992). Por otro lado, la idea básica del método de las líneas es reemplazar las derivadas espaciales por diferencias finitas y al quedar solamente las derivadas temporales, llegar a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que puede ser resuelto por métodos bien estudiados.

## 4.2 Resolución numérica del modelo PsEst-NEQ

### 4.2.1 Resolución numérica del modelo PEst-NEQ por el método de diferencias finitas implícito

Según se mencionó en el Capítulo 3 el modelo pseudoestacionario de equilibrio térmico y no equilibrio másico (PsEst-NEQ), está conformado por las ecuaciones de balance de masa para el agua en el sólido (ec.2-7), balance de masa para el agua en el aire (ec. 2-50) y el balance de energía en el lecho (ec. 2-53):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{n_w a}{\rho_L}$$

$$0 = -G_a \frac{\partial Y}{\partial z} + n_w a$$

$$(\rho_L C_{ps}) \frac{\partial T_s}{\partial t} = -G_a \left( \frac{\partial Y}{\partial z} \right) L_g - G_a \left( C_{pah} \frac{\partial T_a}{\partial z} \right)$$

Además de la ecuación constitutiva para la cinética de secado (ec. 2-70) y la condición de equilibrio térmico.

Escribiendo las derivadas en diferencias finitas adelantadas y usando los valores de las variables evaluadas en el tiempo nuevo (j+1), queda el esquema de resolución implícito:

$$\rho_L \left( \frac{X_{i,j+1} - X_{i,j}}{\Delta t} \right) = -n_{w i,j+1} a \quad [4-1]$$

$$0 = -G_a \left( \frac{Y_{i+1,j+1} - Y_{i,j+1}}{\Delta z} \right) + n_{wi,j+1} a \quad [4-2]$$

$$\rho_L C_{ps} \left( \frac{T_{si,j+1} - T_{si,j}}{\Delta t} \right) = -G_a \left( L_g \left( \frac{Y_{i+1,j+1} - Y_{i,j+1}}{\Delta z} \right) + C_{pah} \left( \frac{T_{ai+1,j+1} - T_{ai,j+1}}{\Delta z} \right) \right) \quad [4-3]$$

$$T_{ai+1,j+1} = T_{si,j+1} \quad [4-4]$$

$$n_{wi,j+1} a_p = \rho_s (X_{i,j+1} - X_{ei,j+1}) (K) \left( \frac{t_{j+1}}{3600} \right)^N \frac{N}{t_{j+1}/3600} \quad [4-5]$$

Las condiciones iniciales y de borde, son las dadas por la ec. 2-52:

$$t = 0 \quad X = X_0 \quad T_s = T_{s0} \quad 0 \leq z \leq Z_{\max}$$

$$z = 0 \quad Y = Y_{en} \quad T_a = T_{aen} \quad t > 0$$

En la Figura 1 del Anexo V se muestra el diagrama de bloques simplificado de la resolución numérica del PsEst-NEQ, que permite hallar los valores de las variables en el tiempo  $j+1$ , resolviendo un sistema de ecuaciones no lineales.

En este método el número total de ecuaciones a resolver depende del número de pasos de espacio ( $N_z$ ) y el número de pasos de tiempo ( $N_t$ ) que se usen (estos, a su vez dependen de los tamaños de paso de espacio  $\Delta z$  y tiempo  $\Delta t$ , respectivamente).

El número final de ecuaciones no lineales a resolver a cada tiempo es de  $4N_z$  y el proceso de solución debe ser repetido  $N_t$  veces. Así, el número total de ecuaciones que finalmente deben resolverse es de  $4N_z N_t$ .

### 4.2.3 Resolución numérica del modelo PEst-NEQ por el método de las líneas

En este trabajo el método de las líneas se implementó usando diferencias finitas atrasadas para reemplazar las derivadas espaciales. Se obtuvo así un sistema de dos ecuaciones diferenciales ordinarias, cuyo tamaño depende del valor de  $N_z$  (ec. 4-6 y 4-7). Este sistema se resolvió con la función preprogramada del entorno Matlab ("solver") *ode 113*, la cual aplica el método de orden variable de Adams-Bashforth-Moulton, con paso de tiempo variable.

$$\rho_{b0} \frac{dX_i}{dt} = -n_{wi} a \quad [4-6]$$

$$\rho_{b0} C_{ps} \frac{dT_{si}}{dt} = -G_a \left( C_{pa} \left( \frac{T_{a\ i+1} - T_{a\ i}}{\Delta z} \right) + L_g \left( \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\Delta z} \right) \right) \quad [4-7]$$

El balance de agua para el aire (ec. 4-8) y la condición de equilibrio térmico (ec. 4-9) se requieren como ecuaciones auxiliares para resolver el sistema EDO

$$0 = -G_a \left( \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\Delta z} \right) + n_{wi} a \quad [4-8]$$

$$T_{a\ i+1} = T_{s\ i} \quad [4-9]$$

Las ecs. 4-6 y 4-7 son las dos ecuaciones diferenciales ordinarias a resolver para cada punto de la grilla, de modo que la cantidad total de ecuaciones diferenciales es de  $2 \times N_z$ . La variable independiente es el tiempo y las variables dependientes son  $X$  y  $T_s$  en cada posición del lecho.

Debe formarse una única matriz con las variables dependientes ( $X$  y  $T_s$ ) para todos los puntos de la grilla y luego aplicar el *solver*, que integrará las ecuaciones diferenciales en el tiempo y dará como resultado los valores de  $X$  y  $T_s$  en todas las posiciones del lecho y a todos los tiempos. Estos resultados quedan almacenados en una matriz: que luego se separa para obtener dos nuevas matrices: una para  $X$  y otra para  $T_s$  (Lee y col., 2004).

En la Figura 2 del Anexo V se muestra el diagrama de bloques simplificado del método de las líneas.

### 4.3 Comparación de métodos numéricos. Condiciones del aire constantes

Las simulaciones se llevaron a cabo para el conjunto de condiciones correspondientes a la situación típica, descrita en el Capítulo 3: altura de lecho  $Z_{m\acute{a}x.} = 3$  m; caudal volumétrico de aire por unidad de volumen de lecho  $Q_{vv} = 0,03 \text{ m}^3/(\text{s m}^3)$ , contenido inicial de humedad del grano  $X_0 = 0,20$  kg agua/kg materia seca, temperatura inicial del sólido  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ . Condiciones de entrada del aire: temperatura,  $T_a = 20^\circ\text{C}$  y humedad relativa,  $h_{ra} = 0,60$ . Los resultados obtenidos usando el método de diferencias explícito, para diferentes valores de  $\Delta z$  y de  $\Delta t$ , se muestran en la Tabla 4.1. Para cada  $\Delta z$  se usó el máximo  $\Delta t$  que satisfizo la condición de estabilidad (límite en el valor  $\Delta t/\Delta z$  máximo) y valores menores.



Tabla 4.1. Resultados predichos por el método de diferencias finitas explícito. (\*)

$\Delta t/\Delta z$	$\Delta t$	$t_s$	$E_{esp}$	$t_c$
(h/m)	(h)	(h)	(MJ/kg agua evap.)	(s)
$\Delta z=0,12$ m				
4,67	0,560	inestable	inestable	-
4,17	0,500	260,00	1,58	0,29
4,00	0,480	259,68	1,58	0,32
3,83	0,460	259,44	1,58	0,5
3,67	0,440	259,60	1,58	0,38
3,33	0,400	259,60	1,58	0,47
2,00	0,240	259,44	1,58	1,38
1,67	0,200	259,40	1,58	2,00
1	0,120	259,20	1,58	5,58
0,5	0,060	259,14	1,58	37,13
$\Delta z=0,06$ m				
4	0,240	inestable	inestable	-
3,83	0,230	263,58	1,60	3,31
3,67	0,220	262,46	1,60	3,64
3,33	0,200	262,60	1,60	4,65
2,00	0,120	262,44	1,59	19,46
1,67	0,100	262,40	1,59	29,14
1	0,060	262,38	1,59	87,45
0,5	0,030	262,32	1,59	363,31
0,25	0,015	262,30	1,59	1462,22
$\Delta z=0,03$ m				
3,67	0,110	inestable	inestable	-
3,33	0,100	264,00	1,60	64,13
2,00	0,060	263,94	1,60	181,90
1,67	0,050	263,95	1,60	259,14
1	0,030	263,94	1,60	727,75
0,5	0,015	263,91	1,60	2914,46
0,25	7,5e-3	263,89	1,60	11662,44
$\Delta z=0,015$ m				
3,67	0,110	inestable	inestable	-
3,33	0,050	264,75	1,61	515,55
2,33	0,035	264,74	1,61	1065,31
2,00	0,030	264,72	1,61	1447,61
1,67	0,025	264,72	1,61	2082,95
1	0,015	264,70	1,61	5802,52
0,5	7,5 e-3	Out of memory		

(\*) Esta tabla está basada en la Tabla 1.b del Capítulo 3, a la cual se agregaron datos.

Se observa, tal como se visualizó en el Capítulo 3, que los valores de  $\Delta z$  más pequeños requieren menores valores de  $\Delta t$  para satisfacer la condición de estabilidad. Consecuentemente a medida que  $\Delta z$  se reduce, también lo hace  $\Delta t$  y el tiempo de cálculo se incrementa notablemente.

Con relación a los valores predichos por el modelo, se observa que para un dado valor de  $\Delta z$ , cuando  $\Delta t$  disminuye el tiempo de secado predicho tiende a un cierto valor, lo mismo sucede cuando  $\Delta z$  disminuye. El valor obtenido a los menores valores de  $\Delta z$  y  $\Delta t$ ,  $t_s = 264,70$  h, es el que tiene menor error de truncación. El consumo específico de energía muestra una pequeña variación con  $\Delta z$  y ninguna con  $\Delta t$ .

En la Tabla 4.2 se proveen los resultados correspondientes al método implícito; en este caso el máximo valor de  $\Delta t$  no está limitado por la estabilidad, sino por el error de truncación.

Tabla 4.2. Resultados predichos por el método de diferencias finitas implícito.

$\Delta t/\Delta z$ (h/m)	$\Delta t$ (h)	$t_s$ (h)	$E_{\text{esp}}$ (MJ/kg agua evap.)	$t_c$ (s)
$\Delta z=0,12$ m				
1,67	0,20	259,40	1,58	540,66
3,33	0,40	259,60	1,58	225,24
4	0,46	259,90	1,58	195,03
5	0,60	259,80	1,58	149,93
10	1,20	261,60	1,59	76,98
17	2,00	262,00	1,59	45,13
$\Delta z=0,06$				
1,67	0,10	262,40	1,60	3983,57
3,33	0,20	262,60	1,60	1709,02
4	0,24	262,80	1,60	1251,52
5	0,30	262,80	1,60	902,01
10	0,60	263,41	1,60	352,06
17	1,00	264,00	1,60	191,78
$\Delta z=0,03$ m				
1,67	0,05	263,95	1,60	12226,63
2,33	0,07	263,97	1,60	9667,09
3,33	0,10	264,10	1,60	7764,89
4	0,12	264,12	1,60	6703,85
5	0,15	264,15	1,60	5718,77
10	0,30	264,30	1,61	2947,39
17	0,50	265,00	1,61	1340,66
$\Delta z=0,015$ m				
2,33	0,035	264,74	1,61	29649,96
5	0,075	264,82	1,61	16790,14
10	0,150	264,90	1,61	10443,79
17	0,250	265,25	1,61	6871,38

En este caso para cada valor de  $\Delta z$  se usaron valores de  $\Delta t$  iguales a los empleados en el método explícito y se incluyeron también valores mayores, no admitidos en el explícito por los problemas de estabilidad.

Se observa que, en comparación con el método DFE, el tiempo de cálculo se incrementa considerablemente para los mismos tamaños de paso, debido a que en el método DFI debe resolverse en forma simultánea un conjunto de ecuaciones no lineales para cada tiempo. Para el caso de la máxima relación  $\Delta t/\Delta z$  requerida para satisfacer la condición de estabilidad del método DFE, el tiempo de cálculo para el método DFI es sustancialmente mayor.

El tiempo de secado predicho por este método a los menores valores usados de  $\Delta z$  y  $\Delta t$  (es decir el que tiene menor error de truncamiento) es  $t_s = 264,74$  h. Tal como sucede con el método DFE el consumo específico de energía varía muy poco con  $\Delta z$  y prácticamente nada con  $\Delta t$ .

Los resultados predichos por el MDL se muestran en la Tabla 4.3. En este caso se fijó el valor de  $\Delta z$ , y el valor de  $\Delta t$  lo determina automáticamente el *solver* y como no es constante el valor informado en la tabla es la media aritmética.

Tabla 4.3. Resultados predichos por el método de las líneas.

$\Delta z$ (m)	$\Delta t/\Delta z$ (h/m)	$\Delta t$ (h)	$t_s$ (h)	$E_{\text{esp}}$ (MJ/kg agua evap.)	$t_c$ (s)
0,120	2,83	0,340	235,27	1,45	1,49
0,060	2,50	0,050	248,57	1,52	5,18
0,030	2,33	0,070	260,63	1,59	22,19
0,015	2,33	0,035	263,34	1,60	108,64
0,010	2,30	0,023	264,10	1,60	297,76
0,008	2,25	0,018	264,40	1,61	569,20
0,006	2,33	0,014	264,69	1,61	1373,30

Puede observarse que este método demanda menos tiempos de cálculo, pero se deben usar valores de  $\Delta z$  bastante menores para obtener una adecuada predicción del tiempo de secado.

Para los menores valores de  $\Delta z$  y  $\Delta t$  (condiciones en las que se da el menor error de truncamiento) el tiempo de secado predicho por este método fue  $t_s = 264,69$  h.

Teniendo en cuenta los “mejores” valores obtenidos por los tres métodos, se calculó el promedio:  $t_s = 264,71$  h, valor que se usó como referencia para calcular el error de truncamiento aproximado, que se presenta en las Tablas 4 y 5.

Con respecto al consumo específico de energía, se observa que el método no influye prácticamente en el valor predicho, siendo el valor de 1,61 MJ/kg agua evap. el “mejor” valor obtenido.

En la Tabla 4.4 para  $\Delta z=0,03$  m y en la Tabla 4.5 para  $\Delta z=0,015$  m, se muestran los resultados comparativos de los tres métodos, a través del valor predicho del tiempo de secado, el error de truncamiento aproximado y el tiempo de cálculo. El valor de  $\Delta t$  se seleccionó de modo de obtener la misma relación  $\Delta t/\Delta z$  en todos los casos

Tabla 4.4. Comparación de métodos numéricos para  $\Delta z=0,03$  m,  $\Delta t=0,07$  h para métodos explícitos e implícitos ( $\Delta t/\Delta z=2,33$ ).  $\Delta t$  fijado por el *solver* en el método de las líneas.

Método	$t_s$ (h)	Error aproximado, %	$t_c$ (s)
Diferencias finitas explícito	263,97	0,27	131,64
Diferencias finitas implícito	263,97	0,27	9667,09
Método de las líneas	260,63	1,53	22,19

Tabla 4.5. Comparación de métodos numéricos para  $\Delta z=0,015$  m y  $\Delta t=0,035$  h para métodos explícitos e implícitos ( $\Delta t/\Delta z=2,33$ ).  $\Delta t$  fijado por el *solver* en el método de las líneas.

Método	$t_s$ (h)	Error aproximado, %	$t_c$ (s)
Diferencias finitas explícito	264,74	0,01	1065,31
Diferencias finitas implícito	264,74	0,01	29649,96
Método de las líneas	263,34	0,51	108,64

Se observa que, para cada relación  $\Delta t/\Delta z$  el tiempo de cálculo es considerablemente menor para el MDL, aunque para obtener valores de tiempo de secado mas parecidos a lso de los metodos DFE y DFI el  $\Delta z$  debe ser menor.

El esquema implícito tal como fue implementado, que incluye la resolución de un sistema de ecuaciones no lineales en cada paso, insume un excesivo tiempo de cálculo, por lo que se descarta en el estudio de la influencia del método para secado con condiciones variables del aire, que se presenta en la sección que sigue.

#### 4.4 Comparación de métodos numéricos. Condiciones del aire variables

Tal como se realizó en el Capítulo 3, se estudió el secado en condiciones meteorológicas en dos etapas: para el mes de Febrero y para los meses de Marzo a Junio,

dato que el mes de febrero es el que presenta condiciones más favorables (mayor temperatura del aire). Si no se logra la condición final de secado (humedad de última capa menor a 0,17 b.s.) al finalizar el mes, se concluye el secado a ese tiempo (fin de mes): 670 horas para Febrero, 730 horas para Marzo y Mayo y 700 para Abril y Junio. Para el mes de Febrero se presenta una tabla comparativa de los resultados predichos (humedad promedio, tiempo de secado, consumo de energía y velocidad de secado) y el tiempo de cómputo, para tres caudales de aire y para los dos métodos numéricos (Tabla 4.6).

Se observa que los tiempos de cálculo son considerablemente menores para el MDL aún para la mitad de tamaño de paso en z. Los valores predichos de tiempos de secado y consumo de energía, así como la humedad promedio final en el lecho, obtenidos por ambos métodos son prácticamente iguales.

Con respecto al consumo específico de energía, es fuertemente dependiente del caudal de aire: para un caudal  $Q_{vv} = 0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$  resulta prohibitivo y para  $Q_{vv} = 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$  sigue siendo alto. Para  $Q_{vv} = 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$  el consumo de energía es aceptable, casi la mitad del de una secadora de aire caliente (4-5 MJ/kg agua evaporada).

En la Tabla 4.7 se presentan la humedad final alcanzada en la última capa, la humedad promedio en el lecho así como los tiempos de secado y de cómputo, para los meses de Marzo, Abril, Mayo y Junio.

Tabla 4.6. Comparación de métodos numéricos: DFE y MDL, modelo PsEst-NEQ. Condiciones del aire variables.  $Z_{\max}=3\text{m}$   $X_0=0,20 \text{ dec., b.s.}$   $T_0=20^\circ\text{C}$ .  $\Delta z=0,06 \text{ m}$   $\Delta t=0,05 \text{ h}$  (DFE).  $\Delta z=0,03 \text{ m}$  (MDL). Condición finalización secado: humedad de la última capa  $\leq 0,17 \text{ dec., b.s.}$  ó finalización del mes.

(a) Febrero Junín

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{\text{prf}}$ (dec., b.s.)		$t_s$ (h) $X_f$ (dec., b.s.)		$E_{\text{esp}}$ (MJ/ kg agua evap.)		$V_{\text{sec}}$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}\text{h}$ ) $\times 10^4$	
	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE
0,02	2412	3422	0,166	0,165	670 (0,175)	670 (0,174)	2,49	1,97	0,40	0,42
0,03	241	2274	0,166	0,167	670 $X_f=0,173$	670 $X_f=0,172$	6,18	6,17	0,41	0,41
0,04	388	2127	0,171	0,170	670 $X_f=0,172$	670 $X_f=0,172$	12,59	12,59	0,42	0,42

b) Febrero Río Cuarto

$Q_{vv}$ ( $m^3/m^3 s$ )	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec., b.s.)		$t_s$ (h) $X_f$ (dec., b.s.)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evap.)		$V_{sec}$ ( $kg_{agua}/kg_{ss}h$ ) $\times 10^4$	
	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE
0,02	118	972	0,174	0,1677	670 ( $X_f=0,177$ )	670 ( $X_f=0,176$ )	2,51	2,03	0,38	0,47
0,03	176	936	0,173	0,1688	670 ( $X_f=0,175$ )	670 ( $X_f=0,175$ )	6,39	5,59	0,40	0,46
0,04	242	937	0,173	0,1705	670 ( $X_f=0,173$ )	670 ( $X_f=0,172$ )	12,85	2,03	0,41	0,43

Se observa que los resultados predichos por ambos métodos son prácticamente idénticos, y que el tiempo de cálculo para el método DFE es considerablemente mayor que para MDL (relación aprox. 18:1). En el ANEXO VI se muestran los perfiles de humedad a distintas alturas del lecho y la humedad promedio en función del tiempo, que predicen los dos métodos para todos los meses en Río Cuarto.

Tabla 4.7. Comparación de métodos numéricos: DFE y MDL, modelo PsEst-NEQ. Condiciones del aire variables: meses marzo a junio. Condición de finalización de secado: finalización del mes. (a) Junín y (b) Río Cuarto.  $Z_{max}=3m$   $X_0=0,20$   $T_0=20^\circ C$   $Q_{vv}=0,03$ . DFE:  $\Delta z=0,06 m$   $\Delta t=0,05 h$ . MDL:  $\Delta z=0,03 m$   $\Delta t=0,07 h$ .

a) Junín

Mes	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$X_f$ última capa (dec. b.s.)	
	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE
Marzo	189	3659	0,178	0,176	730	730	0,177	0,177
Abril	186	3695	0,179	0,179	700	700	0,182	0,181
Mayo	194	4557	0,191	0,191	730	730	0,192	0,191
Junio	195	4947	0,194	0,193	700	700	0,195	0,193

b) Río Cuarto

Mes	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$X_f$ última capa (dec. b.s.)	
	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE	MDL	DFE
Marzo	188	3422	0,168	0,169	730	730	0,171	0,171
Abril	178	3149	0,175	0,175	700	700	0,178	0,178
Mayo	190	3425	0,179	0,179	730	730	0,182	0,182
Junio	183	3121	0,178	0,179	700	700	0,182	0,182

#### 4.5 Conclusiones

Los tres métodos numéricos usados permiten resolver el modelo de secado a bajas temperaturas de maíz. El método de diferencias finitas explícito requiere el uso de un valor limitante para el tamaño de tiempo ya que a valores por encima de ese umbral el método es inestable, y este valor es menor para menores  $\Delta z$ , lo que lleva a tiempos de cómputo considerables. El método de diferencias finitas implícito no mejora la situación, ya que si bien permite una discretización con mayores tamaños de paso, éstos ocasionan mayores errores de truncamiento y no se logran disminuir los tiempos de cómputo, ya que se deben resolver simultáneamente un gran número de ecuaciones no lineales.

El método de las líneas demanda el uso de pequeños  $\Delta z$  para obtener valores aceptables de los resultados predichos, a pesar de lo cual, el tiempo de cómputo es considerablemente menor que el de los otros dos métodos.

En conclusión, para la simulación del secado de maíz a baja temperatura el MDL se considera el mejor de los tres métodos estudiados.

## Capítulo 5

---

### **Estudio comparativo de los modelos de no equilibrio: pseudoestacionario y no estacionario**

#### **5.1. Introducción**

Hay distintas versiones de los modelos constituidos por ecuaciones diferenciales parciales: modelos rigurosos que tienen en cuenta diversos factores y modelos que surgen de la consideración de hipótesis simplificativas. Así, pueden encontrarse casos en los que se desprecian los términos de acumulación del vapor o la energía en la fase aire, obteniéndose lo que se suele denominar como modelo pseudo estacionario, para distinguir del modelo completo ó totalmente no estacionario (Brooker y col., 1992). Hay evidencias en trabajos publicados acerca de la diferencia entre los resultados predichos por modelos que incluyen los términos de acumulación en el aire y modelos que los desprecian (Wang, 1993 y Aregba y Nadeau, 2007). Aregba y Nadeau concluyen que las diferencias son pequeñas si la relación altura lecho/velocidad del aire es menor que 0,2 s, la temperatura del aire es menor a 30°C y su humedad relativa mayor a 50%; situación en la cual es posible entonces despreciar los términos de acumulación del aire.

En este Capítulo se desarrollará el modelo no estacionario de no equilibrio (NEst-NEQ), y su resolución numérica por el método de las líneas, variando el tamaño de paso espacial y el algoritmo de resolución del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias resultantes de la discretización de las ecuaciones diferenciales parciales en el espacio. Los resultados predichos y el tiempo de cómputo de este modelo se compararán con los correspondientes al modelo pseudoestacionario de no equilibrio (PsEst-NEQ) presentado en el Capítulo 4, resuelto por el método de las líneas, tanto en condiciones de aire constantes como variables.



## 5.2 Resolución numérica del modelo NEst-NEQ por el método de las líneas

El modelo no estacionario de no equilibrio másico ni térmico (NEst-NEQ), está conformado por las ecuaciones de balance de masa para el agua en el sólido (ec.2-7), balance de masa para el agua en el aire (ec. 2-14), balance de energía para el sólido (ec. 2-29) y el balance de energía para el aire (ec. 2-46), reescrita las entalpías  $H_v$  y  $H_{va}$  en términos de la temperatura (ecs 2-44 y 2-45, respectivamente):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{n_w a}{\rho_L}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{G_a}{\varepsilon_0 \rho_a} \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{n_w a}{\varepsilon_0 \rho_a}$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{a}{\rho_L C_{ps}} \left( h_v (T_a - T_s) - n_w L_g \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_a}{\partial t} = & -\frac{h_v a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} (T_a - T_s) - \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon_0} \left( \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} \left[ n_w a C_{pv} (T_s - T_a) \right] \end{aligned}$$

Además de las ecuaciones constitutivas para la cinética de secado,  $n_w$  (ec. 2-69) y el coeficiente de intercambio de calor,  $h_v$ . El coeficiente de intercambio de calor se obtuvo de bibliografía (Brooker y col., 1992):

$$h_v = 0,2755 C_{pa} G_a \left( \frac{(0.06175 + 0.000165 T_a)}{2 r_g G_a 3600} \right)^{0.34} \quad [5-1]$$

En esta ecuación, para unidades del sistema internacional:  $T_a[=]^{\circ}\text{C}$ ,  $G_a[=]\text{kg/h m}^2$ ,  $C_{pa}[=]\text{kJ/kg K}$ ,  $r_g[=]\text{m}$  y  $h_v[=]\text{J/s m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Las condiciones iniciales y de borde, son las dadas por la ec. 2-49:

$$\begin{array}{lll}
t = 0 & X = X_0 & T_s = T_{s0} \quad 0 \leq z \leq Z_{\max} \\
t = 0 & Y = Y_0 & T_a = T_{a0} \quad 0 \leq z \leq Z_{\max} \\
z = 0 & Y = Y_{en} & T_a = T_{aen} \quad t > 0
\end{array}$$

La resolución numérica de este modelo se realizó con el método de las líneas, usando diferencias finitas atrasadas para reemplazar las derivadas espaciales. Se obtuvo así un sistema de EDOs cuyo tamaño depende del valor del número de intervalos espaciales,  $N_z$  (Ec. 5-1 a 5-10).

Tal como se resolvió por el método de la líneas el modelo PsEST-NEQ, se forma una única matriz con las variables dependientes ( $X$  y  $T_s$ ) para todos los puntos de la grilla para luego aplicar el *solver*, que integrará las EDOs en el tiempo y dará como resultado los valores de  $X$  y  $T_s$  en todos las posiciones del lecho y a todos los tiempos. Estos resultados quedan almacenados en una matriz: que luego se divide para obtener dos nuevas matrices: una para  $X$  y otra para  $T_s$ .

En la Figura 1 del Anexo VI se muestra el diagrama de bloques simplificado del método de las líneas.

$$\rho_{b0} \frac{dX_i}{dt} = -n_{wi}a \quad [5-2]$$

$$\frac{dY_i}{dt} = -\frac{G_a}{\varepsilon \rho_a} \left( \frac{Y_i - Y_{i-1}}{\Delta z} \right) + \frac{n_{wi} a}{\varepsilon \rho_a} \quad [5-3]$$

$$\frac{dT_{si}}{dt} = \frac{a}{\rho_{b0} C_{ps}} \left( h_{vi} (T_{ai} - T_{si}) - n_{wi} L_{gi} \right) \quad [5-4]$$

$$\begin{aligned}
\frac{dT_{ai}}{dt} = & -\frac{h_{vi} a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} (T_{ai} - T_{si}) - \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon_0} \left( \left( \frac{T_{ai} - T_{ai-1}}{\Delta z} \right) \right) \\
& + \frac{1}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} \left[ n_{wi} a C_{pv} (T_{si} - T_{ai}) \right]
\end{aligned} \quad [5-5]$$

### 5.3 Comparación de modelos PsEst-NEQ y NEst-NEQ. Condiciones del aire constantes

En la primera parte de este ítem se analizan varias cuestiones inherentes al método numérico, tales como algoritmos de resolución de las EDO y tamaño de paso espacial; así como la influencia de las condiciones iniciales para el aire (modelo NEst).

Para estos análisis se consideraron las condiciones del caso base: altura de lecho  $Z_{\text{máx.}}=3$  m; caudal volumétrico de aire por unidad de volumen de lecho  $Q_{\text{vv}} = 0,03$  m<sup>3</sup>/(s m<sup>3</sup>), contenido inicial de humedad del grano  $X_0= 0,20$  kg agua/kg materia seca, temperatura inicial del sólido,  $T_0=20^\circ\text{C}$ . Condiciones de entrada del aire: temperatura,  $T_a=20^\circ\text{C}$  humedad relativa,  $h_{\text{ra}}=0,60$ .

Luego se estudió la influencia de las condiciones de entrada del aire (caudal, temperatura y humedad relativa) en los resultados predichos y el tiempo de cómputo, en forma comparativa para los dos modelos.

#### 5.3.1 Influencia del algoritmo de cálculo

Siendo la principal ventaja del método de las líneas la posibilidad de usar módulos preprogramados de resolución del sistema de EDOs obtenido luego de discretizar las derivadas espaciales de las EDP, se analizaron los distintos algoritmos disponibles para resolver el sistema EDO resultante en cada uno de los modelos.

Para el modelo PsEst, tal como se ha explicitado en el Capítulo 4 se usa la función *ode113* de Matlab. Esta rutina aplica el método de Adams-Bashforth-Moulton PECE (predictor evaluador corrector evaluador) de orden variable. Es una rutina multipaso generalmente más eficiente que la estándar *ode45* (fórmula explícita Runge Kutta (4,5) de Dormand-Prince, de un paso, que suele aplicarse como primera opción y tiene un orden de exactitud medio). El orden de exactitud de la *ode113* es intermedio. Se aplica cuando se impone una tolerancia de error rigurosa o para resolver un sistema EDO computacionalmente intensivo (Ashino y col., 2000; Shampine y col., 2003).

Para el caso del modelo NEst, estas rutinas no resultan adecuadas por demandar un tiempo muy elevado para realizar los cálculos. Esto llevó a la necesidad de considerar otras opciones, en particular relacionadas con rutinas desarrolladas para contemplar casos en los que la *ode113* y la *ode45* son muy lentas, lo cual generalmente se debe a que el problema es rígido (*stiff*). Con problemas *stiff*, es decir sistemas que combinan velocidades de cambio muy diferentes, una muy rápida (calor) y otra muy lenta (materia), que necesita un paso extremadamente pequeño en sistemas explícitos

aún cuando el componente rápido “se extinga” es decir se equilibre, todavía se necesitan esos pasos muy pequeños.

Eso se puede tratar con métodos implícitos.

Las rutinas que se probaron para estos casos fueron las rutinas de Matlab desarrolladas para problemas *stiff*: *ode15s*, *ode23s*, *ode23t* y *ode 23tb*.

La *ode15s* es de orden variable y está basada en fórmulas de diferenciación numéricas implícitas, opcionalmente usa las fórmulas de diferenciación hacia atrás (también conocido como método Gear). Es una rutina multipaso, como la *ode113*. Su orden de exactitud es de bajo a medio. Se usa cuando las *ode 45/ode113* fallan.

La *ode23s* está basada en la fórmula de Rosenbrock modificada de orden 2. Como es un método de resolución de un paso, puede ser más eficiente que la *ode15s* a altas tolerancias de error. Puede ser efectiva para algunos problemas *stiff* para los que la *ode15s* no lo es. El orden de exactitud es bajo. Las funciones *ode23t* y *ode23tb* se usan para problemas moderadamente *stiff* ó *stiff*, cuando se admiten errores de tolerancia altos (Shampine y col., 2003).

Teniendo en cuenta estas consideraciones se resolvió el modelo NEst, para dos valores de tamaño de paso  $\Delta z$ , usando estas rutinas para resolver las EDOs. Los resultados se muestran en la Tabla 5.1 para  $\Delta z=0,06$  y  $\Delta z=0,015$  m. La *ode113* emplea un  $\Delta t$  muy pequeño, lo que lleva a tiempos de cálculos prohibitivos.

Tabla 5.1. Influencia de la función de resolución del sistema EDO. Modelo Nest-NEQ.

(a)  $\Delta z=0,06$  m

Método resol. EDO	$t_c$ (s)	$\Delta t$ (h)	$t_s$ (h)
<i>ode15s</i>	27,4	2,59	266,95
<i>ode23s</i>	333.00	2.68	265.83
<i>ode23t</i>	45.25	0.77	265.87
<i>ode23tb</i>	28.62	4.94	266.95

(b)  $\Delta z=0,015$  m

Método resol. EDO	$t_c$ (s)	$\Delta t$ (h)	$t_s$ (h)
<i>ode15s</i>	389.93	2.20	266.39
<i>ode23s</i>	6363.62	2.22	267.06
<i>ode23t</i>	389.61	2.67	266.38
<i>ode23tb</i>	444.89	4.45	267.43

Considerando estos resultados, la *ode113* se descarta para este modelo. Las otras cuatro funciones son de uso factible en lo que respecta a tiempo de cálculo, aunque la función *ode23s* demanda un tiempo de cálculo entre 7 y 20 veces mayor que el promedio de las otras tres. La elección dependerá entonces de la exactitud requerida para los resultados. Dado que los tiempos de cálculo lo permiten, se usará  $\Delta z=0,015$ . Para este caso se observa que las funciones *ode15s*, *ode23t* y *ode23tb* dan resultados predichos y tiempos de cálculo prácticamente idénticos, sólo difieren en el  $\Delta t$ : en la *23tb* es el doble del de la *15s* y el orden de exactitud de la *15s* es mayor que el de la *23t*. Por tanto, la función seleccionada para resolver el modelo NEst es la *ode15s*.

### 5.3.2 Influencia del tamaño de paso espacial

En esta sección se analiza la influencia del tamaño de paso espacial, tanto para el modelo PsEst resuelto con la *ode113* (Tabla 5.2 (a)) como para el modelo NEst, resuelto con la *ode15s* (Tabla 5.2 (b)).

**Tabla 5.2.** Influencia del tamaño de paso espacial

(a) Modelo PsEst-NEQ. Función *ode113*.

$\Delta z$	$\Delta t/\Delta z$	$\Delta t$	$t_s$	$t_c$
(m)	(h/m)	(h)	(h)	(s)
0,120	2,83	0,340	235,27	1
0,060	2,50	0,150	248,57	5
0,030	2,33	0,075	260,63	22
0,015	2,33	0,035	263,34	109
0,010	2,30	0,023	264,10	298
0,008	2,25	0,018	264,40	569
0,006	2,33	0,014	264,69	1373

(b) Modelo NEst-NEQ. Función *ode15s*.

$\Delta z$	$\Delta t/\Delta z$	$\Delta t$	$t_s$	$t_c$
(m)	(h/m)	(h)	(h)	(s)
0,120	18	2,32	264,16	8
0,060	27	2,26	267,12	28
0,030	72	2,20	266,65	102
0,015	137	2,06	266,91	390
0,010	198	1,98	267,94	756
0,008	246	1,98	267,01	1368
0,0075	264	1,98	267,03	1557
0,006	316	1,90	266,79	2112
0,005	378	1,89	267,21	3536

El tiempo de cálculo, tal cual lo esperado, aumenta al disminuir  $\Delta z$  y se observa que es, para el NEst, aproximadamente el doble que para el PEst.

En la Figura 5.1 se muestran las tendencias de los tiempos predichos y tiempos de cálculo en relación con  $\Delta z$ , para los distintos puntos considerados (casos representados en abscisas) y para el modelo PsEst. Para el modelo NEst se representa lo mismo en la Figura 5.2.

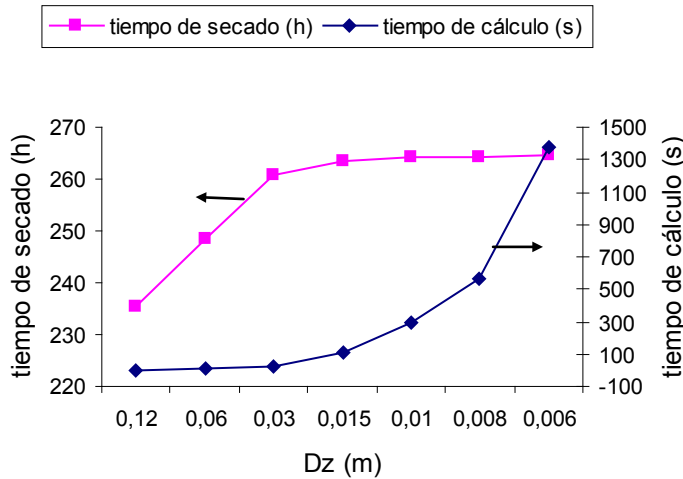


Figura 5.1. Influencia de  $\Delta z$  en el tiempo de cálculo y en el tiempo de secado. Modelo PsEst-NEQ. Rutina *ode113*

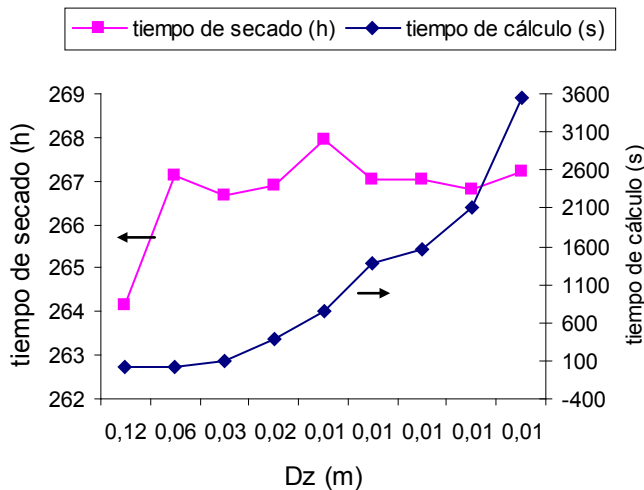


Figura 5.2. Influencia de  $\Delta z$  en el tiempo de cálculo y en el tiempo de secado. Modelo Est-NEQ. Función *ode15s*.

Se observa claramente que, en ambos casos, se llega a un punto para el cual una disminución de  $\Delta z$  se traduce en un gran aumento del tiempo de cómputo, mientras que los valores predichos de tiempos de secado ya prácticamente no cambian. El tiempo de

secado predicho por el modelo PsEst es siempre creciente y tiende a aproximadamente  $t_s=265$  h, mientras que para el NEst oscila en torno a un valor de  $t_s=267$  h. Es decir que en el compromiso que ocasiona una disminución de  $\Delta z$ , favorable para disminuir el error de truncación local y desfavorable por aumentar el tiempo de cómputo, el óptimo sería un valor intermedio  $\Delta z=0,015$ . Tal valor se usará para la comparación de los modelos en distintas condiciones del aire de entrada.

Otro tema que merece análisis es el paso de tiempo  $\Delta t$ , cuyo valor es elegido por la función, siendo bastante más elevado para el modelo NEst-NEQ (entre 1 y 2 órdenes de magnitud). Esto se debe a la función usada para resolver las EDO, es decir el método numérico, es distinto en cada modelo, habiendo sido seleccionados según lo explicado, con el objetivo de optimizar el cálculo.

Se observa también que no hay una diferencia apreciable en los valores de tiempos de secado predichos por ambos modelos en las condiciones del caso base, aunque, a continuación, la investigación se extenderá a otras condiciones de secado a baja temperatura, tanto para aire de condiciones constante como variables en el tiempo.

### **5.3.3 Influencia de las condiciones iniciales para el modelo NEst-NEQ**

Para el modelo NEst-NEQ se requieren condiciones adicionales a las aplicadas para el modelo PsEst-NEQ, para que el problema quede bien formulado: al considerar los terminos de acumulacion del aire se debe proveer de condiciones iniciales para el aire, es decir los valores de temperatura y humedad absoluta del aire en el lecho al comienzo de la operación. A efectos de evaluar la influencia de estas condiciones en los resultados, se analizaron tres situaciones:

Situación 1. Condiciones iniciales del aire intergranular iguales a sus condiciones de entrada:  $T_{a0}=T_{se}$ ,  $h_{ra0}=h_{rae}$

Situación 2. Condiciones iniciales del aire intergranular correspondientes a las de equilibrio con el sólido en el lecho: equilibrio térmico ( $T_{a0}=T_{s0}$ ) y equilibrio másico (humedad del aire obtenida de la isoterma de adsorción a  $T_{s0}$  y  $X_0$ ).

Situación 3. Condiciones iniciales del aire intergranular arbitrarias, a valores bajos de temperatura y humedad relativa comparados con las correspondientes a las situaciones 1 y 2.

Los tiempos de secado y tiempos de cálculo obtenidos para el caso base, y las tres situaciones de condiciones iniciales planteadas se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Influencia de las condiciones iniciales del aire intergranular. Modelo NEst-NEQ. Caso base.  $\Delta z=0,015$ . Función *ode15s*.

Condiciones Iniciales del aire	Situación 1	Situación 2	Situación 3
	$T_{a0}=20^{\circ}\text{C}$	$T_{a0}=20^{\circ}\text{C}$	$T_{a0}=10^{\circ}\text{C}$
	$h_{ra0}=60\%$	$h_{ra0}=84\%$ (equilibrio a $X_0=0,20$ y $T_{s0}=20^{\circ}\text{C}$ )	$h_{ra0}=40\%$
Tiempo de cálculo (s)	388	388	394
Tiempo de secado predicho (h)	266,91	266,39	266,93

Se observa que las condiciones iniciales del aire intergranular influyen muy poco en el valor de tiempo de secado predicho (diferencia de un 0,2%) y en el tiempo de cálculo (diferencia de 1,5%). De manera que su elección no va a afectar los resultados obtenidos por el modelo NEst-NEq, siempre que se mantengan en un rango razonable.

### 5.3.4 Influencia de las condiciones de entrada del aire

Se consideraron dos temperaturas ( $10^{\circ}\text{C}$ - $20^{\circ}\text{C}$ ) y dos valores de humedad relativa (0,40–0,60), que combinados dan lugar a cuatro casos, con su correspondiente humedad de equilibrio del grano,  $X_e$ :

Caso 1:  $T_a=20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  ( $X_e=0,1391$  kg agua/kg materia seca)

Caso 2:  $T_a=10^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  ( $X_e=0,1468$  kg agua/kg materia seca)

Caso 3:  $T_a=10^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  ( $X_e=0,1145$  kg agua/kg materia seca)

Caso 4:  $T_a=20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  ( $X_e=0,1068$  kg agua/kg materia seca)

Para cada uno de estos casos se aplicaron tres valores de caudal volumétrico específico de aire (0,01-0,02-0,03  $\text{m}^3/(\text{s m}^3)$ ).

Para el tamaño de paso se seleccionó el valor de  $\Delta z=0,015$  m, según lo concluido en el ítem anterior. El modelo PsEst se resolvió con la ode 113 y el modelo NEst con la ode 15s. Los  $\Delta t$  fueron determinados por la misma rutina de cálculo. Las condiciones iniciales del aire intergranular se consideraron iguales a las del aire a la entrada.

Los resultados predichos por los modelos pseudoestacionario y no estacionario se muestran en la Tabla 5.4.



Tabla 5.4. Comparación de modelos de no equilibrio pseudoestacionarios (PsEst) y no estacionario (NEst). Condiciones del aire constantes. Caso base.  $\Delta z=0,015\text{m}$  .

(a) Caso 1:  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  ( $X_e=0,1391$ )

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evap.)	
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
0,01	101	393	0,1542	0,1531	598,57	734,49	0,294	0,303
0,02	106	384	0,1563	0,1550	377,99	384,47	0,837	0,831
0,03	107	394	0,1577	0,1572	263,33	266,91	1,601	1,605

(b) Caso 2:  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  ( $X_e=0,1468$ )

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evaporada)	
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
0,01	156	456	0,1596	0,1608	989,27	1033	0,474	0,510
0,02	169	404	0,1612	0,1627	562,69	665,55	1,402	1,465
0,03	191	403	0,1622	0,1636	405,06	405,55	2,757	2,864

(c) Caso 3:  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  ( $X_e=0,1145$ )

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evap.)	
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
0,01	75	506	0,1515	0,1529	497,56	524,72	0,199	0,216
0,02	80	451	0,1551	0,1561	262,49	266,30	0,565	0,598
0,03	81	451	0,1573	0,1579	180,59	183,12	1,087	1,117

(d) Caso 4:  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  ( $X_e=0,1068$ )

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ )	$t_c$ (s)		$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$t_s$ (h)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evap.)	
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
0,01	62	502	0,1441	0,1436	396,13	415,09	0,141	0,142
0,02	66	502	0,1487	0,1499	200,09	204,48	0,377	0,395
0,03	80	396	0,1514	0,1534	134,28	136,76	0,711	0,755

Se observa que, en todas las condiciones analizadas, el tiempo de cálculo es mayor para el modelo NEst que para el modelo PsEst.: de 3 a 8 veces mayor

Por otra parte es necesario analizar las diferencias en los resultados predichos a efectos de determinar la aptitud del modelo simplificado PsEst para representar el SBT de maíz. Con este propósito se calculan las diferencias porcentuales de tiempo de secado predicho  $e_{rts}$ , según la ec. (5-6):

$$e_{rts} = \left[ \frac{t_{sNEst} - t_{sPsEst}}{t_{sNEst}} \right] \times 100 \quad [5-6]$$

Estos valores, calculados para todos los casos considerados, se muestran en la Figura 5.3.

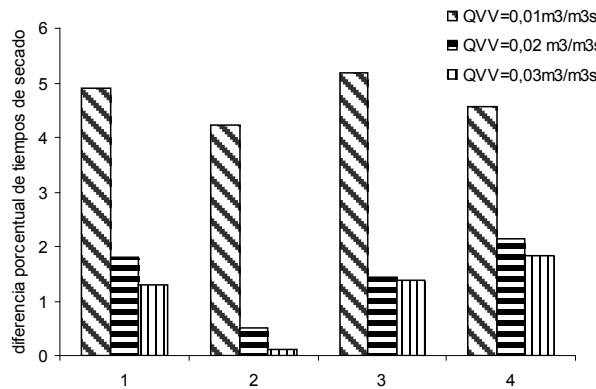


Figura 5.3. Diferencia porcentual en tiempos de secado predichos por los dos modelos.

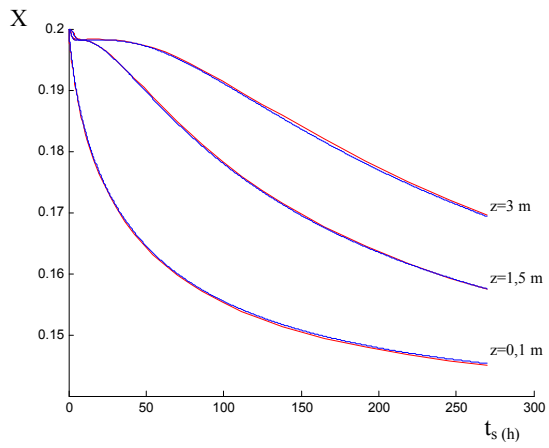
1.  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  2.  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  3.  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  4.  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$

Se observa que la diferencia relativa entre los tiempos de secado es, en todos los casos, inferior al 5,5%. Para todas las combinaciones  $h_{ra}$  y  $T_a$ , la diferencia entre tiempos de secado aumenta al disminuir el  $Q_{vv}$ . Este valor de  $Q_{vv}$  está relacionado directamente con los aportes convectivos al lecho. Por tanto a medida que los aportes convectivos aumentan, los términos de acumulación de vapor y energía se vuelven despreciables frente a ellos.

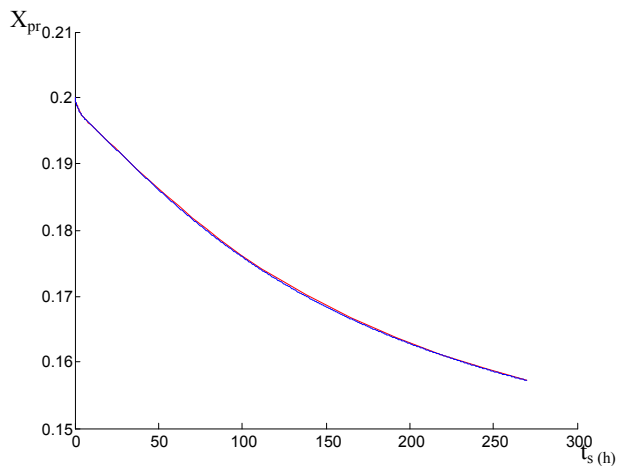
La influencia de  $h_{ra}$  y  $T_a$  es bastante menor, con excepción de la condición de 10-0,60; en la cual las diferencias son bastante más bajas, especialmente a caudales de 0,02 y 0,03  $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ .

Para visualizar otros aspectos vinculados a la comparación de los dos modelos para condiciones del aire constantes se analizaron los perfiles de humedad y temperatura a distintas alturas del lecho y la humedad promedio de los granos en función del tiempo.

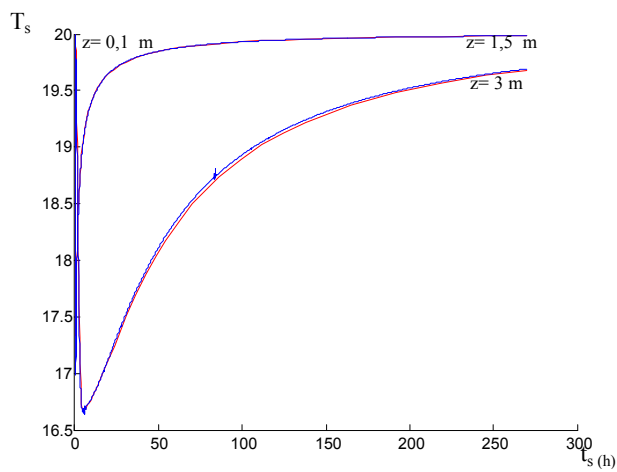
En las Figuras 5.4 para las condiciones del aire de caso 1 y  $Q_{vv}=0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$  (caso base) y en la Figura 5.5 para condiciones del aire del caso 4 y  $Q_{vv}=0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$  que es la situación que presenta mayor diferencia en tiempos de secados predichos por los modelos.



(a) humedad del sólido en función del tiempo para tres posiciones en el lecho  
 --- NEst --- PsEst

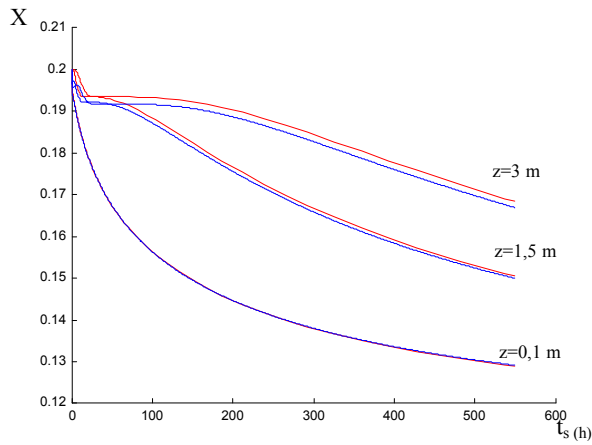


(b) humedad promedio en el lecho en función del tiempo  
 --- NEst --- PsEst



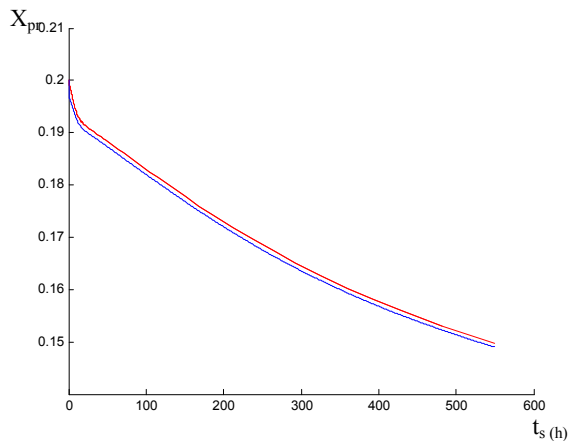
(c) temperatura del sólido en función del tiempo para dos posiciones en el lecho  
 --- NEst --- PsEst

Figura 5.4. Perfiles de temperatura y humedad del sólido. Condiciones del aire constantes. Caso 1:  $T_a=20^\circ\text{C}$   $h_{ra}=0,60$   $Q_{vv}=0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ .



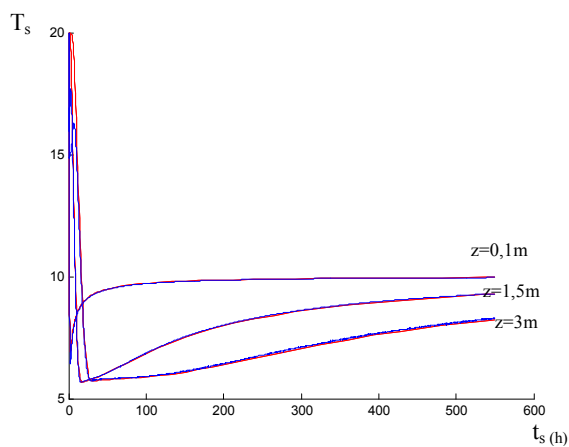
(a) humedad del sólido en función del tiempo para tres posiciones en el lecho

--- NEst --- PsEst



(b) humedad promedio en el lecho en función del tiempo

--- NEst --- PsEst



(c) temperatura del sólido en función del tiempo para tres posiciones en el lecho

--- NEst --- PsEst

Figura 5.5. Perfiles de temperatura y humedad del sólido. Condiciones del aire constantes. Caso 4:  $T_a=20^\circ\text{C}$   $h_{ra}=0,40$   $Q_{vv}=0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ .

El aire está inicialmente a  $20^\circ\text{C}$  en todo el lecho (acorde a la condición inicial usada) y cede calor para el secado que, con el lecho húmedo, ocurre con mayor velocidad al comienzo de la operación. Al no ser suficiente el calor aportado por el aire para abastecer esa velocidad de secado, los granos experimentan enfriamiento evaporativo, en un fenómeno análogo al del termómetro húmedo. A partir de eso y a medida que los granos se secan la temperatura del aire aumenta, porque la velocidad de secado disminuye y el enfriamiento evaporativo es menor, y tiende al valor de entrada ( $10^\circ\text{C}$ ), primero en las capas inferiores del lecho y luego en las demás.

Se aprecia que las diferencias entre los perfiles entre los modelos es mayor para el caso 3 que para el caso 1, pero aún en este caso son muy pequeñas.

También se observa que los perfiles de temperatura del aire y del sólido son idénticos, para el modelo Nest en el que se consideró no equilibrio térmico. Esto avala la suposición de equilibrio térmico que se hace en el modelo PsEst, aunque cabe destacar que la principal diferencia entre los dos modelos son las que resultan de los términos de acumulación en el aire intergranular que se desprecian en el PsEst y sí se tienen en cuenta en el NEst.

#### **5.4 Comparación de métodos numéricos. Condiciones del aire variables**

Se estudió el secado usando series históricas de datos meteorológicos para los meses de Febrero a Junio, tanto en Junín como en Río Cuarto.

Para el modelo NEst se usó la *ode23tb* ya que ni la *ode15s* aplicada para condiciones constantes ni las otras disponibles (*ode45*, *ode23*, *ode23s*) se pudieron usar, ya que el tiempo de cómputo es tan alto que no se llega a completar el cálculo. Esto es debido a que el método, en virtud de las oscilaciones de las condiciones del aire, elige pasos de tiempo más pequeños en forma automática. El método que se aplica en la *ode 23tb* permite resolver rápidamente (el paso de tiempo que aplica el método es bastante mayor), claro que a costa de resignar exactitud en los resultados.

Tal como se ha realizado en los capítulos anteriores, como en general no es posible lograr el objetivo de humedad final de última capa igual al valor seguro de 0,17 b.s. con funcionamiento continuo del ventilador, se realizaron corridas para un tiempo total de secado inferior o igual al del mes (670 horas para febrero, 700 horas para los meses de 30

días y 730 horas para los de 31 días) y se comparan la humedad final alcanzada en la última capa, la humedad promedio en el lecho y el consumo de energía predichos, así como los tiempos de cómputo. En primera instancia para el caudal considerado como caso base:  $Q_{vv}=0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{s}$ . Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5-6.

Tabla 5.6. Comparación de modelos PsEst y NEst. Condiciones del aire variables: meses febrero a junio. (a) Junín y (b) Río Cuarto.  $Z_{\max}=3 \text{ m}$ ,  $X_0=0,20$   $T_0=20^\circ\text{C}$ . PsEst: *ode113*  $\Delta z=0,03 \text{ m}$   $\Delta t \approx 0,07\text{h}$ . NEst: *ode23tb*  $\Delta z=0,03 \text{ m}$   $\Delta t \approx 0,5\text{h}$ .  $Q_{vv}=0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{s}$

a) Junín

Mes	$t_c$		$X_{\text{prf}}$		$E_{\text{esp}}$		$X_f$	
	(s)		(dec., b.s.)		(MJ/ kg agua evap.)		última capa (dec., b.s.)	
	PsEst	NEst	PsEst	NEst	PsEst	NEst	PsEst	NEst
Febrero ( $t_s=670 \text{ h}$ )	241	105	0,166	0,172	6,18	6,13	0,173	0,173
Marzo ( $t_s=730\text{h}$ )	185	106	0,176	0,175	7,83	7,60	0,178	0,180
Abril ( $t_s=700\text{h}$ )	179	118	0,179	0,179	8,73	8,43	0,181	0,181
Mayo ( $t_s=730\text{h}$ )	180	201	0,191	0,190	20,48	18,70	0,191	0,193
Junio ( $t_s=700\text{h}$ )	187	191	0,193	0,192	24,35	22,93	0,193	0,193

b) Río Cuarto

Mes	$t_c$		$X_{\text{prf}}$		$E_{\text{esp}}$		$X_f$	
	(s)		(dec. b.s.)		(MJ/ kg agua evap.)		última capa (dec., b.s.)	
	PsEst	NEst	PsEst	NEst	PsEst	NEst	PsEst	NEst
Febrero ( $t_s=670 \text{ h}$ )	178	50	0,173	0,172	6,39	6,23	0,175	0,174
Marzo ( $t_s=730\text{h}$ )	189	62	0,169	0,168	5,98	5,87	0,171	0,171
Abril ( $t_s=700\text{h}$ )	178	90	0,175	0,174	7,20	7,03	0,178	0,177
Mayo ( $t_s=730\text{h}$ )	190	90	0,179	0,178	9,12	8,85	0,182	0,184
Junio ( $t_s=700\text{h}$ )	183	84	0,179	0,178	8,40	8,19	0,182	0,185

El tamaño de paso de tiempo promedio (determinado como parte del método propio de las funciones preprogramadas utilizadas) fue de aprox. 0,07 h para el PsEst y 0,5 h para el NEst.

Se observa que los valores de humedad de última capa y humedad promedio del lecho al finalizar el secado (en estos casos al finalizar el mes) predichos por los dos modelos son prácticamente idénticos.

En cuanto al tiempo de cálculo, habiendo encontrado la función apropiada para resolver el modelo NEst, que es el que presentó mayores complicaciones en este aspecto (especialmente bajo condiciones de entrada del aire variables), resultó adecuado y del mismo orden para los dos casos, incluso menores para el NEst. Lo que sí se presenta como desventaja para este caso es su mayor error de truncación, por el método aplicado y por el mayor tamaño de paso de tiempo.

Con el objetivo de analizar la influencia del caudal de aire, que en el caso de condiciones constantes del aire ha mostrado influir en los resultados predichos por los dos modelos, se llevaron a cabo simulaciones para todos los meses, en las mismas condiciones de la Tabla 5.6, pero a un caudal menor:  $Q_{vv}=0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{s}$  (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Comparación de modelos PsEst y NEst. Condiciones del aire variables: meses febrero a junio. (a) Junín y (b) Río Cuarto.  $Z_{\max}=3 \text{ m}$ ,  $X_0=0,20$   $T_0=20^\circ\text{C}$ . PsEst: *ode113*  $\Delta z=0,03 \text{ m}$   $\Delta t \approx 0,2 \text{ h}$ . NEst: *ode23tb*  $\Delta z=0,03 \text{ m}$   $\Delta t \approx 0,6 \text{ h}$ .  $Q_{vv}=0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{s}$ .

a) Junín

Mes	$t_c$		$X_{\text{prf}}$		$E_{\text{esp}}$		$X_f$	
	(s)		(dec., b.s.)		(MJ/ kg agua evap.)		última capa (dec., b.s.)	
	PsEst	NEst	PsEst	NEst	PsEst	NEst	PsEst	NEst
Febrero ( $t_s=670 \text{ h}$ )	99	96	0,171	0,172	0,53	0,54	0,184	0,185
Marzo ( $t_s=730 \text{ h}$ )	69	102	0,178	0,178	0,66	0,66	0,182	0,185
Abril ( $t_s=700 \text{ h}$ )	68	96	0,181	0,181	0,72	0,73	0,183	0,186
Mayo ( $t_s=730 \text{ h}$ )	70	184	0,188	0,188	1,20	1,27	0,189	0,187
Junio ( $t_s=700 \text{ h}$ )	73	158	0,191	0,191	1,55	1,54	0,188	0,191

b) Río Cuarto

Mes	$t_c$		$X_{\text{prf}}$		$E_{\text{esp}}$		$X_f$	
	(s)		(dec. b.s.)		(MJ/ kg agua evaporada)		última capa (dec., b.s.)	
	PsEst	NEst	PsEst	NEst	PsEst	NEst	PsEst	NEst
Febrero ( $t_s=670 \text{ h}$ )	65	61	0,176	0,177	0,54	0,55	0,183	0,185
Marzo ( $t_s=730 \text{ h}$ )	70	75	0,173	0,173	0,52	0,53	0,179	0,180
Abril ( $t_s=700 \text{ h}$ )	64	94	0,179	0,179	0,63	0,66	0,184	0,186
Mayo ( $t_s=730 \text{ h}$ )	70	82	0,181	0,182	0,75	0,77	0,184	0,186
Junio ( $t_s=700 \text{ h}$ )	66	82	0,181	0,182	0,71	0,74	0,184	0,187

La humedad final del lecho, tanto el promedio como de la última capa son en general superiores a los obtenidos con el mayor caudal, aunque en ninguno de los casos se satisface la condición de finalización de secado segura ( $X_f$  de última capa  $< 0,17$  dec. b.s.). El consumo específico de energía es mucho menor a menor caudal de aire. No se observan diferencias importantes en los resultados predichos por los dos modelos.

En las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 se muestran los perfiles de humedad y temperatura del sólido para uno de los casos mostrados en la Tabla 5.6, correspondiente al mes de Mayo en Junín. En la Figura 5.6 se muestra la humedad promedio del lecho en función del tiempo; en las figuras 5.7 y 5.8 se observan los perfiles de humedad y temperatura del sólido, respectivamente para tres posiciones del lecho. En todos los casos para los dos modelos (a) PsEst y (b) NEst. En el ANEXO VII se encuentran todos los gráficos de perfiles de humedad y temperatura, para los dos modelos y todos los casos presentados en la Tabla 5.6.

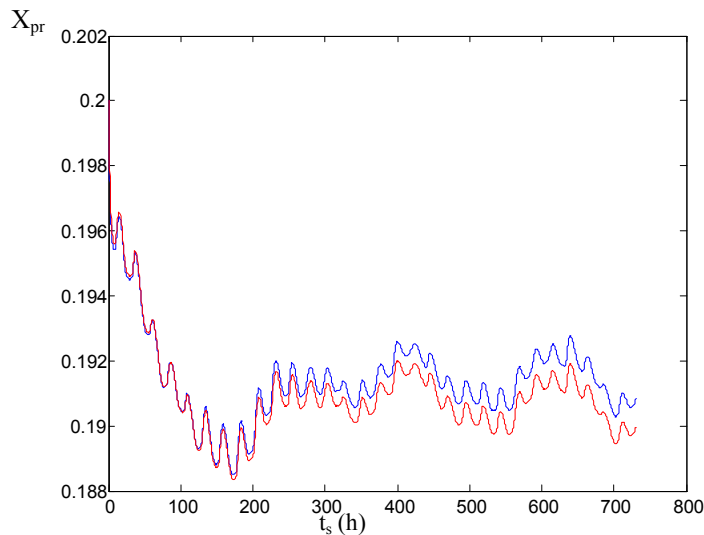
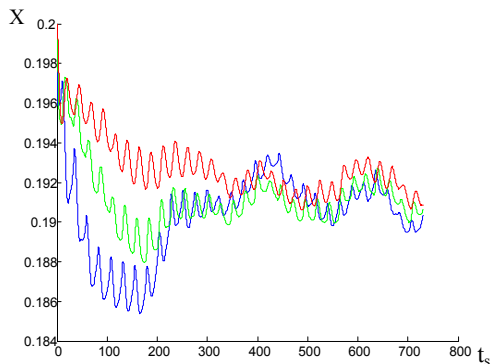
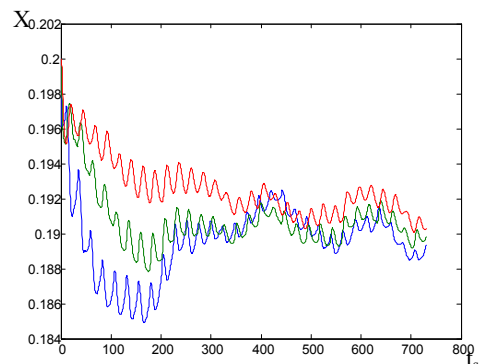


Figura 5.6. Humedad promedio en el lecho en función del tiempo. Condiciones del aire variables. Mayo Junín.  $Q_{vv}=0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{s}$  --- NEst --- PsEst



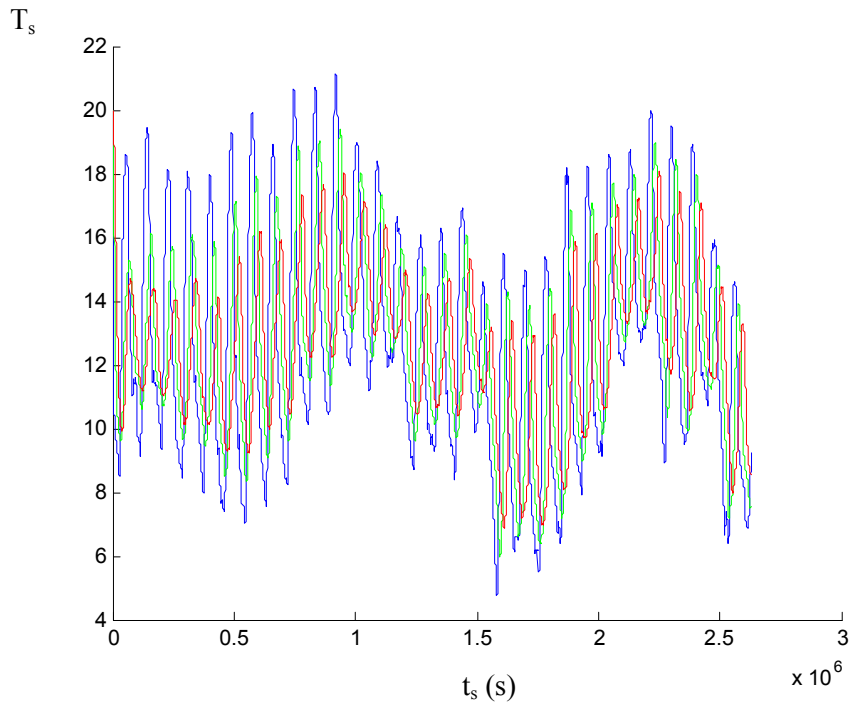
(a)



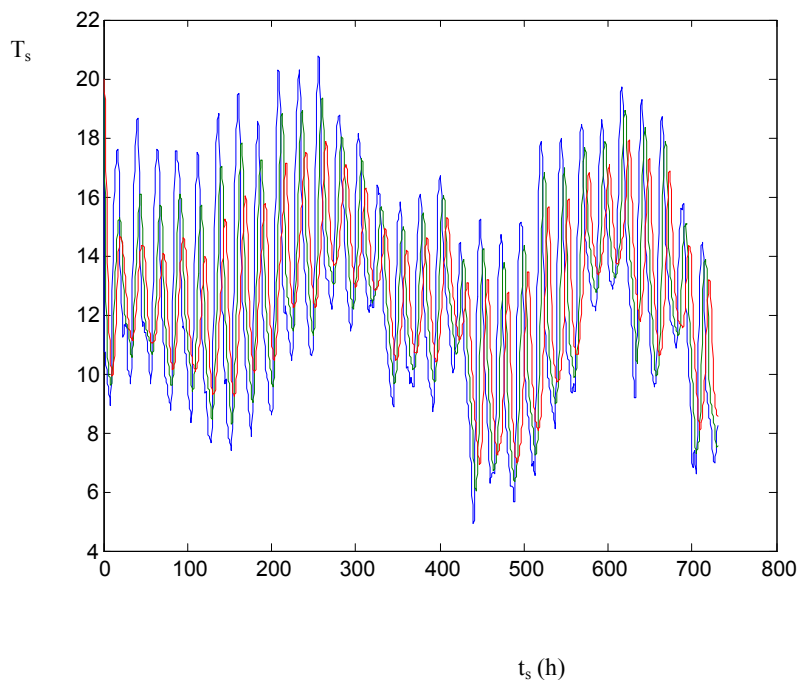
(b)



Figura 5.7. Humedad del sólido en tres posiciones del lecho en función del tiempo. Condiciones del aire variables. Mayo Junín.  $Q_{vv}=0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{s}$  ---  $z=3\text{m}$  ---  $z=1,5 \text{ m}$  ---  $z=0,1\text{m}$  (a)PsEst (b) NEst.



(a)



(b)

Figura 5.8. Temperatura del sólido en tres posiciones del lecho en función del tiempo. Condiciones del aire variables. Mayo Junín.  $Q_{vv}=0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{s}$  ---  $z=3\text{m}$  ---  $z=1,5 \text{ m}$  ---  $z=0,1\text{m}$  (a)PsEst (b) NEst

Se aprecia la prácticamente total coincidencia de los perfiles de humedad y temperatura y la escasa diferencia en la humedad promedio, principalmente al inicio del secado.

En la Figura 5.9 se muestra la humedad promedio del lecho en función del tiempo de secado para los dos modelos y los dos caudales estudiados, para Río Cuarto y los meses extremos del período considerado: Febrero y Junio.

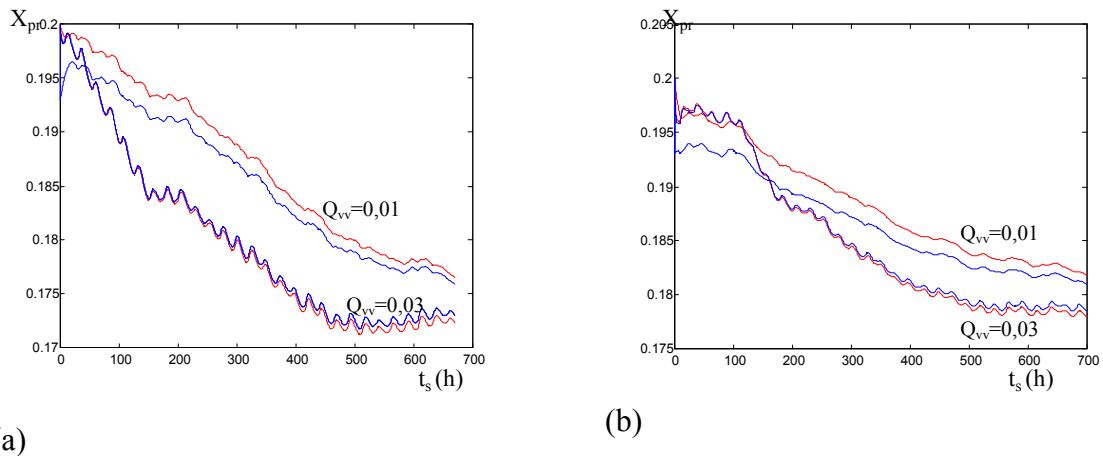


Figura 5.9. Humedad promedio en el lecho en función del tiempo. Condiciones del aire variables. Influencia del caudal de aire. Río Cuarto. (a) Febrero. (b) Junio

--- NEst ---PsEst

El menor caudal da lugar a una curva más suave, en la que no aparecen tan marcadas las oscilaciones del aire de entrada.

Se observa una diferencia bastante más importante para el menor caudal, tendencia que se había observado para el caso de condiciones constantes del aire (Figura 5.5).

### 5.5 Conclusiones

Fue necesario seleccionar la rutina adecuada para resolver el modelo más complejo, el NEst, ya que la aplicada para resolver el modelo PsEst insume un tiempo de cómputo prohibitivo. Así se encontró que para el modelo NEst las funciones más adecuadas fueron la *ode15s* para condiciones del aire constantes y la *ode23tb* para condiciones del aire variables.

El tamaño de paso espacial  $\Delta z$ , se optimizó teniendo en cuenta que valores pequeños son favorables para disminuir el error de truncación local y desfavorables por aumentar el tiempo de cómputo. Para condiciones del aire constantes ese valor óptimo fue de  $\Delta z=0,015$  m y para condiciones del aire variables  $\Delta z=0,03$  m.

Se encontró que las condiciones iniciales del aire intergranular, que deben asignarse para resolver el modelo NEst, no influyen en los resultados.

Usando el algoritmo apropiado el tiempo de cálculo del modelo más complejo NEst es del mismo orden que para el modelo simplificado PsEst. La exactitud de los resultados desde el punto de vista computacional es mayor para el PsEst, por el algoritmo empleado y el menor  $\Delta t$ . Con respecto a los resultados predichos, cualquiera de los dos modelos propuestos podría usarse para predecir el comportamiento del secado de maíz en lecho fijo a baja temperatura, tanto en condiciones del aire constantes como variables, aunque para bajos caudales de aire, situación más común para el secado a baja temperatura, la diferencia entre los resultados predichos por los modelos es más marcada.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se concluye que el modelo NEst-NEQ resulta más apropiado, apto para todos los caudales de aire.

Este es el modelo que se aplicará para el estudio de distintos aspectos del secado natural tales como calor aportado por el ventilador y pérdida de materia seca, objetivos del Capítulo 6.

## Capítulo 6

---

### **Aplicación del modelo seleccionado para el estudio de aspectos relevantes del secado natural de maíz**

#### **6.1. Introducción**

El análisis de los modelos matemáticos para representar el secado natural de maíz en lecho fijo y de los métodos numéricos apropiados para su resolución permitieron obtener un simulador del proceso adecuado para el secado a bajas temperaturas. El simulador está basado en el modelo no estacionario de no equilibrio resuelto por el método de las líneas. Este simulador puede ser aplicado para distintos propósitos. En particular en este Capítulo se utilizará para el estudio del efecto del calentamiento del aire a través del ventilador y para la determinación del deterioro del grano mediante la estimación de la pérdida de materia seca.

#### **6.2 Efecto del calentamiento del aire al pasar por el ventilador**

##### **6.2.1 Introducción**

Usualmente el aire se calienta al pasar por el ventilador, lo que aumenta el potencial de secado del aire o la velocidad de secado, si el secado se realiza, como es habitual, con el ventilador ubicado “aguas arriba” del equipo de secado (tiro forzado).

La elevación de temperatura en el ventilador tiene un efecto considerable en el perfil de contenido de humedad del grano. En general se estima en 1°C, aunque es más exacto considerar que el valor está en el rango de 0,5-2,5°C.

En caso de utilizar ventiladores axiales, toda la energía eléctrica absorbida por el ventilador se traduce en calor que pasa al aire. Este efecto puede reducir por ejemplo la humedad final de un grano de 15,5% con aire sin pasar por el ventilador, a 14,5% a aire que pasa por el ventilador (aproximadamente un punto de humedad), siendo a menudo razón suficiente para evitar el uso de calefactores de aire (Wilcke y Morey, 1997).

Algunos autores, como Biondi y col. (1988), usan un incremento fijo de temperatura del aire por efecto del ventilador de 1°C y otros lo calculan a partir de la

energía eléctrica consumida por el ventilador. Schoenau y col. (1995), analizando ventiladores centrífugos, consideraron que el 50% de la energía requerida por el ventilador se transforma en calor y aumenta la temperatura del aire, porque el aire no se pone en contacto físico con el motor, a diferencia de los ventiladores axiales. Wilcke y col. (1993), asumen que para ventiladores axiales el 57,5% de la energía eléctrica alimentada al mismo se usa para calentar el aire y que el 42,5 % restante se convierte en energía calorífica que se distribuye uniformemente en todo el lecho. Smith y Bailey (1983), Sun y col. (1995) consideran que el aire se hace pasar por el motor del ventilador y por lo tanto que toda la potencia suministrada al ventilador está disponible para el calentamiento del aire. Hansel y col. (2008) especifican que si el ventilador es axial el aire pasa por el motor.

Debe tenerse en cuenta que, en prácticamente todos los trabajos que tratan este tema del calentamiento del aire por el ventilador se hace referencia al trabajo de Lamond (1982). En este trabajo se demuestra mediante un análisis teórico y un trabajo experimental, que en un sistema bien diseñado en el que el calor del motor es colectado por el aire, es razonable suponer que toda la energía suministrada al motor resulta en un incremento equivalente en la temperatura del aire (despreciando las pérdidas de calor hacia el ambiente) y que este incremento de temperatura ocurre sólo en el ventilador y no se produce un calentamiento adicional del aire al disminuir la presión estática a través del lecho.

### **6.2.2 Cálculo del incremento de temperatura que se produce en el ventilador**

Para calcular el aumento de temperatura del aire, se considera que toda la potencia suministrada al ventilador se traduce en un incremento en la temperatura del aire, lo que corresponde al diseño de ventilador axial. Se planteó un balance macroscópico de energía en estado estacionario (Bird, 2008) considerando al ventilador + motor como un sistema termodinámico abierto. La expresión resultante es que el cambio de entalpía del aire en J/s es igual a la energía recibida por trabajo mecánico de las aletas del ventilador (W) y del calor disipado por el motor (Q):

$$Q - W = \Delta \hat{H} G_a S \quad [6-1]$$

$G_a S$  es el flujo másico de aire que pasa por el ventilador.

La ecuación 2.78 da la potencia suministrada al ventilador, en la cual están incluidos Q y W:

$$P_o = Q - W = \Delta p Q_{vv} Z_{\max}^2 S^{1,5} \quad [6-2]$$

El aumento en la temperatura de entrada del aire se calcula con suficiente exactitud calculando el cambio de entalpía del aire como el producto de su calor específico y el incremento de temperatura:

$$\Delta H = C_{pa} \Delta T_a \quad [6-3]$$

Entonces, el incremento de temperatura del aire se obtiene combinando las ecs.

(6-1), (6-2) y (6-3):

$$\Delta T_a = \frac{\Delta p Z_{\max}^2 Q_{vv} S^{1,5}}{G_a C_{pa}} \quad [6.4]$$

Este aumento de temperatura ocasiona una disminución en la humedad relativa del aire que entra al lecho, lo cual causa otro efecto favorable para el proceso de secado.

Se considerarán dos casos: (1) SCA: no hay incremento en la temperatura del aire por efecto del ventilador. Esto se corresponde a la situación de tiro inducido, en la que el ventilador se coloca aguas abajo del secadero, o sea el aire no pasa por el ventilador antes de entrar al lecho. (2) CCA: el aire se calienta al pasar por el ventilador, antes de entrar al secadero y el incremento de temperatura se relaciona con toda la potencia aportada al ventilador. Esto corresponde como se ha mencionado a la situación de tiro forzado y ventilador axial.

### 6.2.3. Influencia del calentamiento del aire. Condiciones de secado constantes.

Para estos análisis se consideraron las condiciones del caso base: contenido inicial de humedad del grano  $X_0=0,20$  kg agua/kg materia seca, temperatura inicial del sólido  $T_0=20^\circ\text{C}$ . Condiciones de entrada del aire: temperatura,  $T_a=20^\circ\text{C}$  humedad relativa,  $h_{ra}=0,60$ . Se usaron distintos valores de las variables que más influyen (según se aprecia en la ec. 6-4), en el cambio de temperatura del aire ( $\Delta T_a$ ) al pasar por el ventilador: la altura de lecho  $Z_{\max}$ , (2- 3 - 4 m) y el caudal volumétrico de de aire por unidad de volumen de lecho;  $Q_{vv}$  (0,01- 0,02 - 0,03  $\text{m}^3/\text{s}$   $\text{m}^3$ ). También se evaluó la influencia de las condiciones de entrada del aire:  $T_a$  ( $10^\circ\text{C}$  y  $20^\circ\text{C}$ ) y  $h_{ra}$  (0,40 y 0,60), ya que ambas cambian continuamente en el secado realizado en condiciones meteorológicas y estos resultados facilitarán el análisis de la performance del secadero CCA para ese caso. Los parámetros de desempeño del secadero considerados fueron: el

tiempo de secado, la humedad promedio final en el lecho y el consumo específico de energía (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Influencia del calentamiento del aire al pasar por el ventilador. Condiciones del aire constantes. Caso base ( $X_0 = 0,20$  kg agua/kg materia seca,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 20^\circ\text{C}$  y  $h_{ra} = 0,60$ ), para distintos  $Q_{vv}$  y  $Z_{m\acute{a}x}$ .

$Q_{vv}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ )	$\Delta T_a$ ( $^\circ\text{C}$ )	$h_{ra}$ luego de ventilador (dec)	$X_{prf}$ (dec. b.s.)	$t_s$ (h)	$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evap.)			
$Z_{max}=2 \text{ m}$								
			SCa	CCa	SCa	CCa	SCa	CCa
0,01	0,112	0,588	0,1531	0,1522	734,49	712,72	0,123	0,117
0,02	0,266	0,582	0,1550	0,1534	384,47	361,45	0,321	0,290
0,03	0,459	0,575	0,1572	0,1524	266,91	241,07	0,579	0,489
$Z_{max}=3 \text{ m}$								
			SCa	CCa	SCa	CCa	SCa	CCa
0,01	0,276	0,582	0,1531	0,1525	734,49	694,87	0,303	0,283
0,02	0,689	0,567	0,1550	0,1550	384,47	336,35	0,831	0,659
0,03	1,220	0,549	0,1572	0,1499	266,91	212,81	1,605	1,092
$Z_{max}=4 \text{ m}$								
			SCa	CCa	SCa	CCa	SCa	CCa
0,01	0,526	0,581	0,1531	0,1506	734,49	641,46	0,586	0,486
0,02	1,376	0,544	0,1550	0,1468	384,47	303,74	1,581	1,103
0,03	2,484	0,508	0,1572	0,1409	266,91	179,54	2,946	1,589

Se observa que el aumento en la temperatura del aire al pasar por el ventilador está en el rango  $0,1-2,5^\circ\text{C}$ , lo que ocasiona una disminución de la humedad relativa del aire (en porcentaje de humedad relativa) entre  $0,4$  y  $8,4 \%$ . La magnitud del calentamiento del aire por influencia del ventilador depende fuertemente de la altura del lecho y el flujo de aire, y afecta principalmente al tiempo de secado (Figura 6.1) y al consumo específico de energía (Figura 6.2). El cambio de humedad promedio final en el lecho está en el rango  $0,0007-0,0142$  kg agua/kg de masa seca

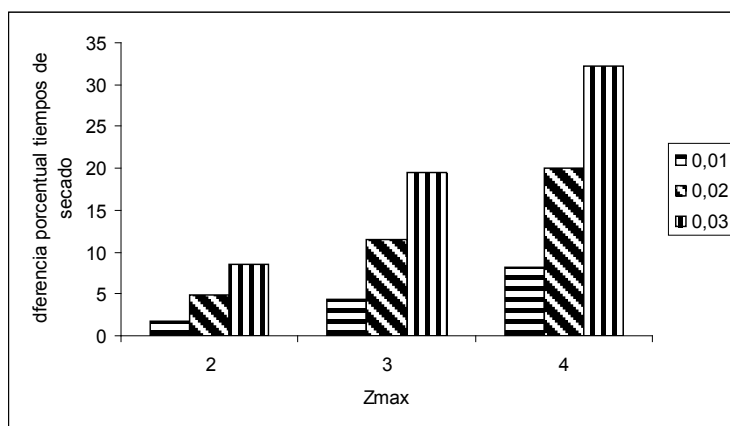


Figura 6.1. Influencia del calentamiento del aire al pasar por el ventilador en la diferencia porcentual en tiempos de secado para distintas alturas de lecho y caudales de aire.

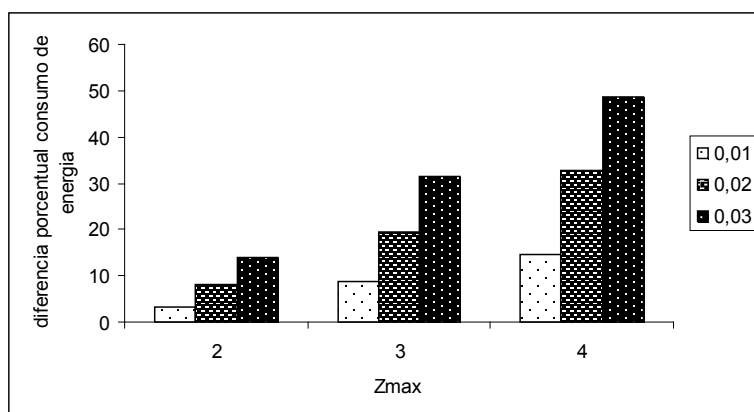


Figura 6.2. Influencia del calentamiento del aire al pasar por el ventilador en la diferencia porcentual en consumo de energía de secado para distintas alturas de lecho y caudales de aire.

Tanto el tiempo de secado como el consumo de energía disminuyen debido al efecto del ventilador, y esta disminución aumenta con el flujo de aire y con la altura del lecho, debido a que ambas variables generan mayor diferencia de presión (ec. 2-75) y por lo tanto mayor (ec. 2-77). La disminución en el tiempo de secado varía entre 2 y 30%, mientras que en el consumo de energía se reduce entre 3 y 48%. Si bien el consumo específico de energía depende directamente del tiempo de secado, es inversamente proporcional a la cantidad de agua evaporada (ec. 2-79). Como la masa de agua evaporada es mayor con una temperatura más alta y una humedad relativa más baja (con calentamiento del aire  $X_{prf}$  es menor), el efecto del calentamiento del aire es mayor en el consumo específico de energía que en el tiempo de secado.

Tabla 6.2. Influencia del calentamiento del aire al pasar por el ventilador. Condiciones del aire constantes.  $Z_{max}=3$  m,  $Q_{vv}=0,02$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> min, para distintas  $T_a$  y  $h_{ra}$  del aire ambiente.

$h_{ra}$ ambiente (dec.)	$\Delta T_a$ (°C)	$h_{ra}$ luego de ventilador (dec)	$X_{prf}$ (dec. b.s.)	$t_s$ (h)	$E_{esp}$ 4J/ kg agua evap.)			
$T_a=10^\circ C$								
			SCa	CCa	SCa	CCa	SCa	CCa
0,40	1,176	0,369	0,1572	0,1514	180,59	159,29	1,087	0,843
0,60	1,173	0,555	0,1622	0,1521	405,06	298,02	2,757	1,599
$T_a=20^\circ C$								
			SCa	CCa	SCa	CCa	SCa	CCa
0,40	1,211	0,371	0,1514	0,145	134,28	121,91	0,7112	0,566
0,60	1,200	0,557	0,1577	0,1502	263,33	212,10	1,601	1,095



El  $\Delta T_a$  depende del nivel de temperatura, alrededor de 1,17°C para 10°C y 1,20 para 20°C, o sea un poco mayor a mayor temperatura. Esto se explica por la densidad del aire ( $\rho_a$ ): a mayor temperatura, menor densidad, y según se observa en la ec.6.4  $\Delta T_a$  es inversamente proporcional al caudal de aire  $G_a$  ( $G_a=V \rho_a$ ). La disminución de la humedad relativa es prácticamente la misma para todos los casos (del orden del 4% en unidades de hr).

Sí se observa un marcada diferencia en los tiempos y consumo de energía, para visualizar ese efecto se graficaron las diferencias porcentuales (Fig. 6.3 y Fig. 6.4).

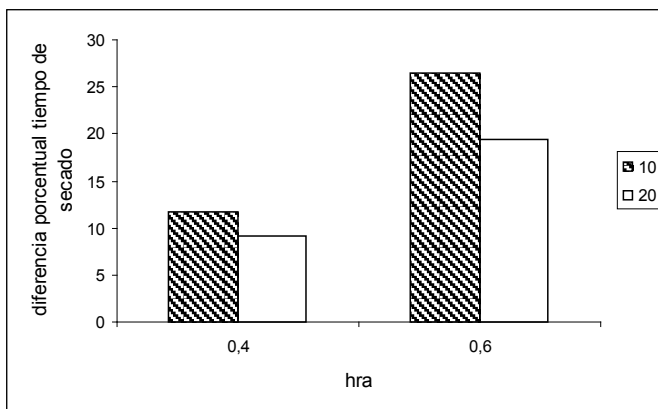


Figura 6.3. Influencia del calentamiento del aire al pasar por el ventilador en la reducción porcentual en tiempos de secado para distintas temperaturas y humedades relativas del aire ambiente.

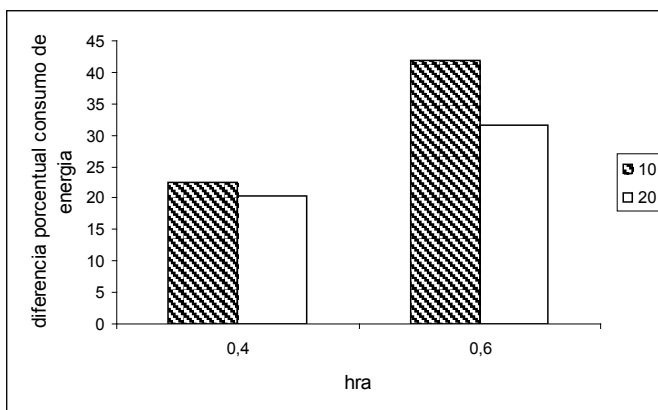


Figura 6.4. Influencia del calentamiento del aire al pasar por el ventilador en la reducción porcentual de consumo específico de energía para distintas temperaturas y humedades relativas del aire ambiente.

Se observa que las mayores diferencias se dan a menor  $T_a$  y mayor  $h_{ra}$ , también que la  $h_{ra}$  influye más que la  $T_a$ . Esto se explica examinando la influencia de esta variable en la velocidad de secado,  $n_w$ , en relación con el equilibrio. De la ecuación

2.70 se observa que la velocidad de secado es proporcional a la diferencia entre la humedad del grano y la humedad de equilibrio:

$$n_w a_p = \rho_s (X - X_e) (K) \left( \frac{t}{3600} \right)^N \frac{N}{t/3600} \quad [2-70]$$

Para el contenido de humedad final deseado,  $X=0,17$  dec. b.s. se muestran en la tabla 6.3 la humedad de equilibrio,  $X_e$  para cada uno de las combinaciones  $h_{ra}-T_a$  consideradas y la diferencia  $X-X_e$  que forma parte de la ecuación de cinética de secado:

Tabla 6.3.  $X-X_e$  para  $X=0,17$  dec. b.s

$T_a-h_{ra}$	$X_e$ (dec. b.s.)	$X-X_e$ (dec. b.s.)
10-0,4	0,1145	0,055
10-0,6	0,1468	0,023
20-0,4	0,1068	0,063
20-0,6	0,1391	0,031

Para  $h_{ra}$  de 0,6  $X-X_e$  es la mitad que para  $h_{ra}$  de 0,4; mientras que la diferencia de valores  $X-X_e$  entre 10 y 20°C, a igual  $h_{ra}$  es mucho menor. Es decir que la humedad relativa del aire ( $h_{ra}$ ) influye mucho más que su temperatura ( $T_a$ ) en la diferencia entre la humedad del sólido y su valor de equilibrio ( $X-X_e$ ).

Por otra parte,  $X_e$  depende de la temperatura y de la humedad relativa, según se observa en la isoterma de sorción obtenida de la ec 2-62 (Fig. 6.5).

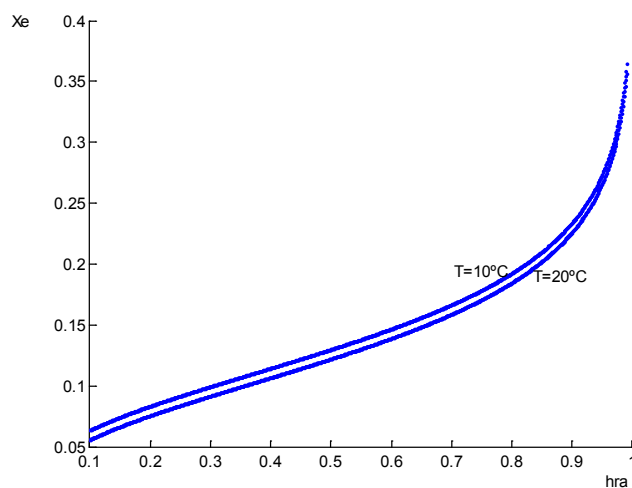


Figura 6.5. Isotermas de sorción.

La dependencia de  $X_e$  con  $h_{ra}$  es más pronunciada a  $h_{ra}$  altas, esto explica que la disminución en  $h_{ra}$  que se produce por efecto del ventilador a  $h_{ra}$  0,6 ocasiona un aumento mayor en  $X-X_e$  y consecuentemente en  $n_w$  y por lo tanto en el tiempo de secado.

#### 6.2.4. Influencia del calentamiento del aire. Condiciones de secado variables.

Se considera altura de lecho y caudal de aire del caso base:  $Z_{m\acute{a}x}=3$  m,  $Q_{vv}=0,03$   $m^3/m^3$  min., y se analiza el efecto del calentamiento en el ventilador sobre el comportamiento del secadero (tiempo de secado, humedad promedio final en el lecho, humedad de la última capa y consumo específico de energía) para los meses de febrero y junio, extremos del período de cosecha, en Río Cuarto (Tabla 6-4).

Tabla 6-4. Influencia del calentamiento del aire al pasar por el ventilador. Condiciones del aire variables. Febrero y Junio Río Cuarto  $Z_{m\acute{a}x}=3$  m.,  $Q_{VV}=0,03$   $m^3/m^3$  s.

Mes	$t_s$		$X_{prf}$		$E_{esp}$		$X_f$	
	(h)		(dec. b.s.)		(MJ/ kg agua evap.)		última capa (dec. b.s.)	
	Sca	CCa	SCa	CCa	SCa	CCa	SCa	CCa
Febrero	670	406,57	0,173	0,162	6,39	2,77	0,175	0,163
Junio	700	720	0,179	0,167	8.40	5.38	0,182	0,171

Para el mes de Febrero se observa que el efecto del ventilador es muy relevante, ya que, para el caso CCa se logra llegar a la humedad deseada ( $X_f$  última capa=0,17 dec. b.s.) en 400 h mientras que en el caso Sca no se logra llegar a la humedad deseada en todo el mes.

El detalle de lo que sucede puede analizarse a través de la evolución de la humedad promedio del sólido y su relación con la temperatura y la humedad del aire de entrada al lecho. En la Fig. 6.6 se presenta la humedad del sólido, se observa que para el caso Sca, a partir de las 500 h la humedad ya no tiene la tendencia descendente y tiende a permanecer constante en un valor superior al deseado.

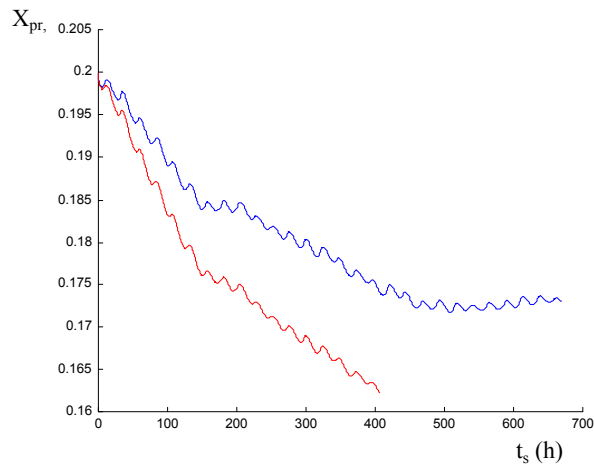
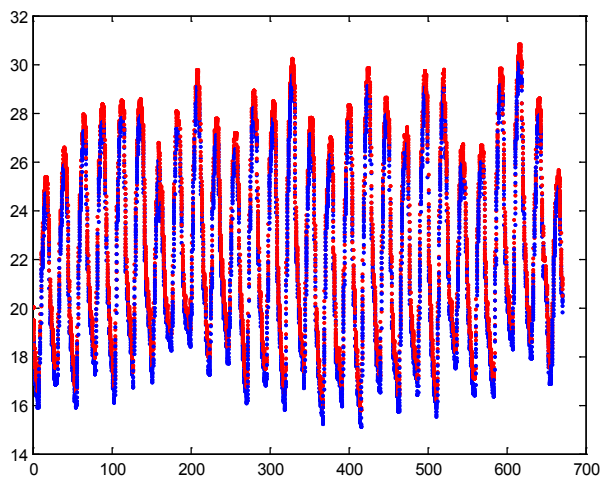
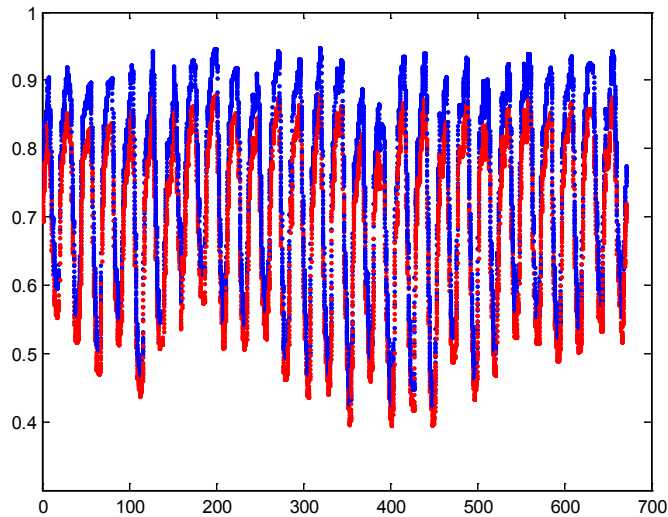


Figura 6.6. Humedad promedio del sólido en el lecho en función del tiempo de secado para Febrero Río Cuarto con calentamiento (líneas rojas) y sin calentamiento (líneas azules) del aire por efecto del ventilador.

Si se observa la humedad relativa del aire de entrada al secadero (Fig. 6.7.b) se aprecia que al final del periodo (500-700 h) el valor superior es del orden de 0,92 para SCa, mientras que para CCa ese valor desciende a aprox. 0,85. En esos altos niveles, la humedad relativa incide mucho sobre la humedad de los granos en equilibrio y por tanto en la disminución de humedad en el secado. El aumento de temperatura del aire que causa tal descenso de humedad relativa, es de aprox.  $1,2^{\circ}\text{C}$ , y se aprecia en la Fig. 6.7.a.



(a)



(b)

Figura 6.7. Temperatura (a) y humedad relativa (b) del aire de entrada al secadero vs. tiempo de secado, para Febrero Río Cuarto con calentamiento (---) y sin calentamiento (---) del aire por efecto del ventilador

Para el mes de junio también se aprecia una diferencia importante en la humedad promedio del lecho por el efecto del ventilador, aunque el efecto parece ser más parejo en todo el mes (Fig. 6-8). Además no se observa tanta diferencia en el tiempo de secado para alcanzar la humedad deseada, al cabo del mes CCa se llega prácticamente al valor deseado de humedad de última capa (0,171) mientras que no en el caso SCa (0,180).

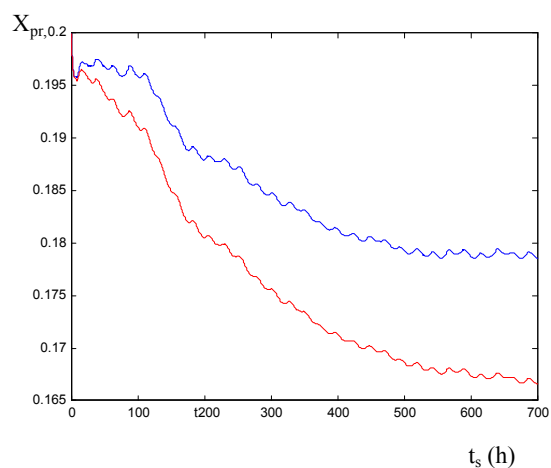
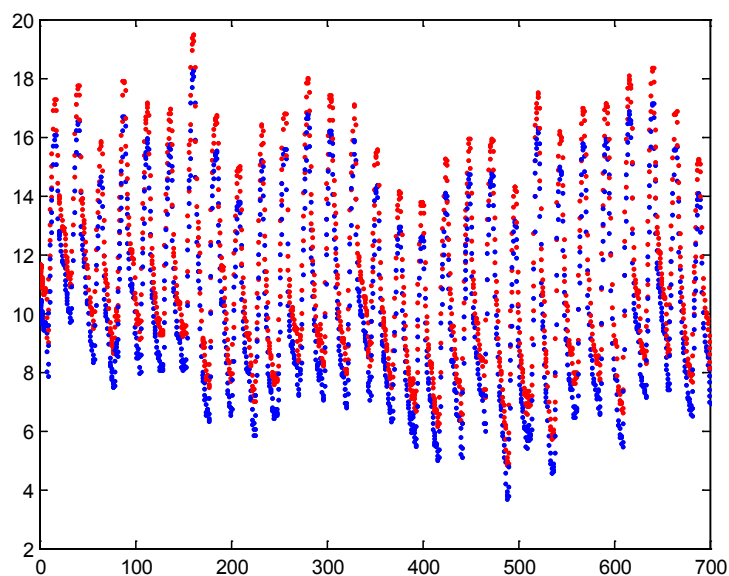
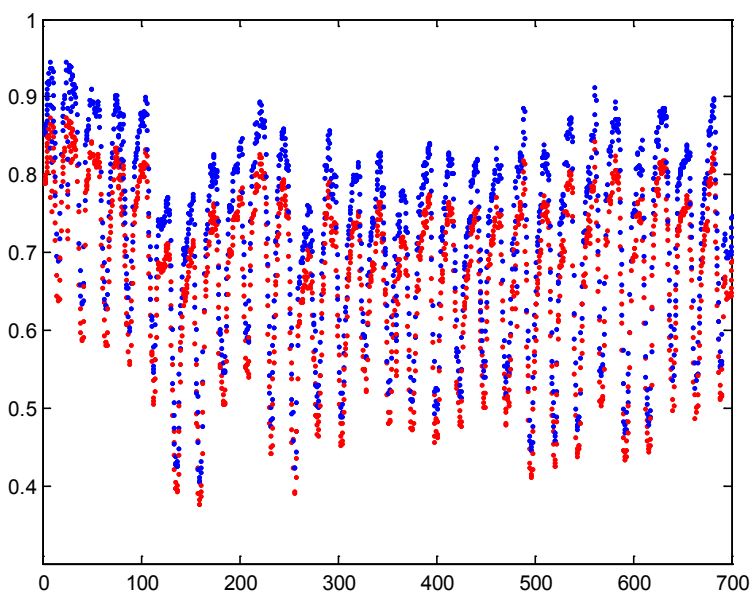


Figura 6-8. Humedad promedio del sólido en el lecho en función del tiempo de secado para Junio Río Cuarto, con calentamiento (---) y sin calentamiento (---) del aire por efecto del ventilador

En la Figura 6-9 se observa la temperatura del aire y la humedad relativa, para SCA y CCa.



(a)



(b)

Figura 6.9. Temperatura (a) y humedad relativa (b) del aire de entrada al secadero vs. tiempo de secado, para Junio Río Cuarto con calentamiento (---) y sin calentamiento (---) del aire por efecto del ventilador

## **6.3 Pérdida de materia seca**

### **6.3.1 Introducción**

El deterioro biológico de los granos (“grain spoilage”) es una variable que debe ser controlada, tanto para el secado como en el almacenamiento. Este deterioro es una función de la respiración de los granos y depende fuertemente de su temperatura y contenido de humedad, así como del tiempo al que los granos son expuestos a esas condiciones. El deterioro biológico puede disminuirse secando los granos hasta humedades inferiores a los valores establecidos como seguros para el almacenamiento y acopiándolos en estructuras adecuadas a temperaturas razonablemente bajas. Los valores de humedad seguros dependen del tipo de grano, de la duración del almacenamiento y de las condiciones climáticas del lugar de acopio, siendo para el maíz en Argentina del 14,5% b.h.

La estimación del deterioro del grano es esencial en la simulación del manejo y operación del secadero, el deterioro del grano es la consecuencia directa de no completar el secado lo suficientemente rápido (Sharp, 1982).

Los modelos matemáticos pueden utilizarse para predecir distintos parámetros relacionados con el deterioro biológico del grano, como el nivel de CO<sub>2</sub> intergranular, que puede dar una medida de la respiración de los granos, de los microorganismos, e incluso de la de los insectos (Jayas y White, 2003).

Es esencial incluir en la simulación el modelado del tiempo seguro; es decir, el lapso de tiempo que transcurre hasta que empieza a aparecer daño en el grano (Sharp, 1984). Los modelos utilizados para el deterioro de maíz se basan en el trabajo de Steele y col. (1969), que proponen el cálculo de pérdida de materia seca debido al metabolismo del grano, estimada a partir de la producción de CO<sub>2</sub>. Thompson (1972) presenta un modelo de almacenamiento para predecir cambios en la temperatura, contenido de humedad y pérdida de materia seca (PMS) de maíz, empleando las ecuaciones propuestas por Steele.

Para el secado, donde las condiciones de temperatura y humedad del grano y del aire cambian con la altura del lecho, el cálculo de PMS se realiza en cada capa para los distintos tiempos, y el valor final (acumulado) se obtiene mediante una sumatoria de las pérdidas ocurridas en cada intervalo de tiempo para esa capa (Bowden y col., 1984; Schoneau y col., 1995).

El valor límite de PMS usado por la mayoría es de 0,5%, aunque Gupta y col. (1999) determinaron que el valor permitido para asegurar la calidad del maíz depende de la humedad del grano y del daño mecánico admitido (Tabla 6.5).

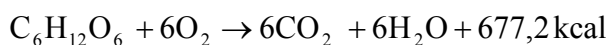
Tabla 6.5. Valores límites de PMS para el maíz.

Daño mecánico admitido, %	Humedad del grano % (b.h.)	PMS Valor límite
0%	18 %	0,5 %
	22 %	0,25 %
30%	18 %	0,5 %
	22 %	0,20 %

### 6.3.2. Cálculo de la pérdida de materia seca

En esta sección se estudiará un parámetro muy importante de desempeño, cual es el efecto de las condiciones de secado y de la cinética de transferencia de calor y masa en el deterioro del grano, a través de la pérdida de materia seca debido al metabolismo del grano (respiración), estimada a partir de la producción de CO<sub>2</sub>.

En la mayor parte de los casos el proceso de respiración se considera como la oxidación completa de carbohidratos para dar dióxido de carbono y agua. La ecuación química que representa el proceso respiratorio es representada por la oxidación de un carbohidrato típico, el azúcar hexosa a dióxido de carbono y agua



El dióxido de carbono y el vapor de agua son los productos de la reacción de respiración y según la estequiometría de la reacción por cada gramo de carbohidrato se producen 1,47 g de CO<sub>2</sub> y 0,6 g de H<sub>2</sub>O.

La pérdida de materia seca (PMS) se define como los gramos de materia perdidos mediante la reacción de respiración por kilogramo de materia seca, expresada en porcentaje, por ej. una PMS del 0,1% indica una pérdida de 1 g. por cada kg.

Teniendo en cuenta la definición de PMS y la relación estequiométrica, se deduce la ecuación que relaciona la PMS y la m<sub>CO2</sub>:



$$\text{masa materia perdida(g)} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{1,47}$$

$$\frac{\text{masa materia perdida(g)}}{1000\text{g}} \times 100 = \text{PMS(\%)}$$

[6-5]

$$\frac{\text{masa materia perdida(g)}}{1000\text{g}} \times 100 = \frac{m_{\text{CO}_2}}{14,7}$$

$$\text{PMS(\%)} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{14,7}$$

Donde  $m_{\text{CO}_2}$  es la masa de dióxido de carbono producido (en g) por kg de materia seca, que en función del tiempo equivalente  $t_{\text{eq}}$  (en horas), según la aproximación de Steele (Thompson, 1972) es:

$$m_{\text{CO}_2} = 1,3(\exp(0,006 t_{\text{eq}}) - 1) + 0,015 t_{\text{eq}} \quad [6-6]$$

El tiempo equivalente ( $t_{\text{eq}}$ ), es decir el tiempo estimado para producir una dada cantidad de dióxido de carbono, se calcula sobre la base del tiempo requerido para producir  $\text{CO}_2$  en condiciones estándar ( $t_{\text{est}}$ ): temperatura de  $15,5^\circ\text{C}$ , 25% de humedad y 30% del granos dañados, corregido por factores que tienen en cuenta condiciones diferentes a las estándar: temperatura ( $C_T$ ), humedad ( $C_M$ ) y % de daño ( $C_D$ ):

$$t_{\text{eq}} = \frac{t_{\text{est}}}{C_M C_T C_D} \quad [6-7]$$

Los factores de corrección dependen de la temperatura y la humedad del sólido, según las Ec. 6-8 (Thompson, 1972):

$$C_D = 1$$

$$0,13 \leq x \leq 0,35$$

$$C_M = 0,103 \exp(455 / X 100)^{1,53} - 0,00845 (X 100) + 1,558$$

$$T \leq 60^\circ\text{F} \quad \text{ó} \quad x \leq 0,19$$

$$C_T = 32,3 \exp(-3,48T/60) \quad T[^\circ\text{F}]$$

$$T > 60^\circ\text{F} \quad \text{y} \quad 0,19 < x \leq 0,28$$

$$C_T = 32,3 \exp(-3,48T/60) + (x100-19)/100)^{0,61(T-60)/60} \quad T[^\circ\text{F}]$$

$$T > 60^\circ\text{F} \quad \text{y} \quad x > 0,28$$

$$C_T = 32,3 \exp(-3,48T/60) + 0,09^{0,61(T-60)/60}$$

Según lo enunciado el valor límite de PMS usado en la mayor parte de los casos es de 0,5%.

Para el caso base ( $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$ ,  $Z_{max}=3$  m,  $Q_{vv} = 0,03$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> s), para las condiciones iniciales del grano ( $T=20^\circ\text{C}$  y  $X=0,20$ ) y para las 263 horas de secado, se obtiene:  $m_{CO_2}=1,18$  y  $\text{PMS}=0,08\%$ .

En el caso del secado en el lecho  $T$  y  $X$  dependen de la posición en el lecho y del tiempo de secado. Por ello, se calcula un tiempo equivalente total para cada una de las capas definidas en la discretización numérica, que será la suma de los  $\Delta t_{eq}$ , cada uno de ellos calculado con los factores de corrección para los valores de  $X$  y  $T$  correspondientes a cada tiempo. Se obtiene así la PMS para cada capa del lecho al finalizar el secado, y el promedio de estos valores da la PMS media del lecho ( $\text{PMS}_{pr}$ ).

En primer lugar se calculó la PMS para condiciones del aire constantes, dos caudales de aire y dos temperaturas del aire. En la tabla 6.6 se presentan los valores promedio y en las figuras 6.10 y 6.11 los valores para las distintas alturas de lecho.

Tabla 6.6. Influencia del caudal y de la temperatura en la PMS. Condiciones de secado constantes

		$t_s$		$X_{prf}$		$\text{PMS}_{pr}$	
		(h)		(dec. b.s.)		(% )	
$\Gamma_a \cdot h_{ra}$	$Q_{vv}$ m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> s)	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03
20°C-0,60		699	263	0,154	0,156	0,05	0,02
10°C-0,60		990	405	0,159	0,162	0,03	0,007

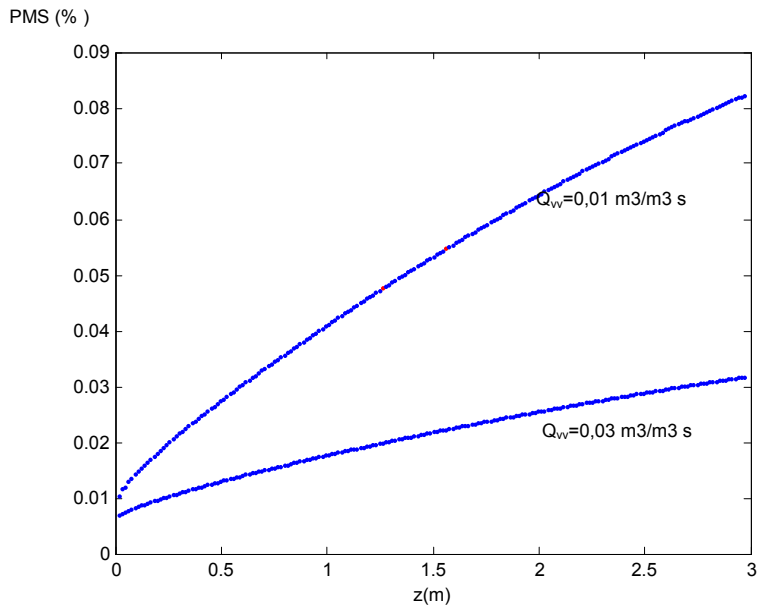


Figura 6.10. PMS para distintas alturas del lecho. Caso base.  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$ .

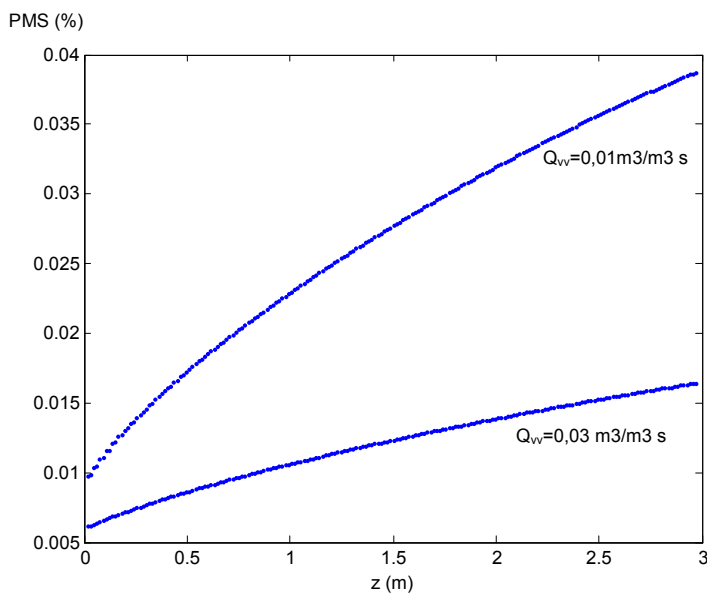


Figura 6.11. PMS para distintas alturas del lecho. Caso base.  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$ .

El mayor valor de PMS se da, tal cual lo esperado, en la última capa (arriba del lecho), que es la que permanece más tiempo sin secarse. A mayor caudal menor es el tiempo de secado y por lo tanto menor la PMS. La temperatura del aire, que condiciona a la del sólido (en el lecho prevalecen condiciones de equilibrio térmico) influye también en la PMS: a menor temperatura menor es la PMS. Teniendo en cuenta estos efectos, se explica la diferencia entre los casos estudiados: a pesar de que  $T_a=10^\circ\text{C}$  implica un mayor tiempo de secado, pesa más la influencia de la menor temperatura en

el factor de cálculo del tiempo equivalente, por lo cual es menor la PMS a  $T_a=10^\circ\text{C}$  que a  $T_a=20^\circ\text{C}$ .

Para condiciones variables se analizó la PMS para  $Z_{\max}=3$  m,  $Q_{vv}=0,02$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> min., para los meses de Febrero y Junio, extremos del período de cosecha, en Río Cuarto. Para junio se obtuvo un valor promedio de 0,035% mientras que para febrero el valor promedio es de 0,1%. Es de destacar la influencia de la temperatura. En las figuras 6.12 y 6.13 se presentan los valores de PMS para distintas alturas del lecho, para Febrero y Junio respectivamente.

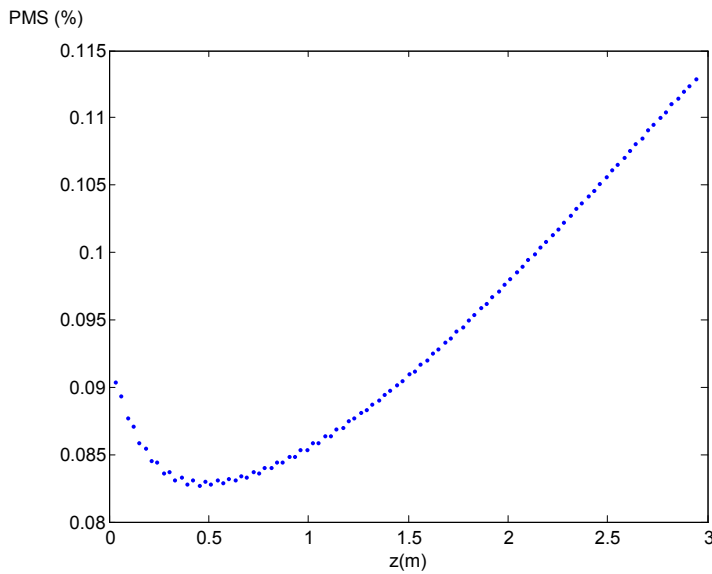


Figura 6.12. PMS para distintas alturas del lecho. Febrero Río Cuarto.

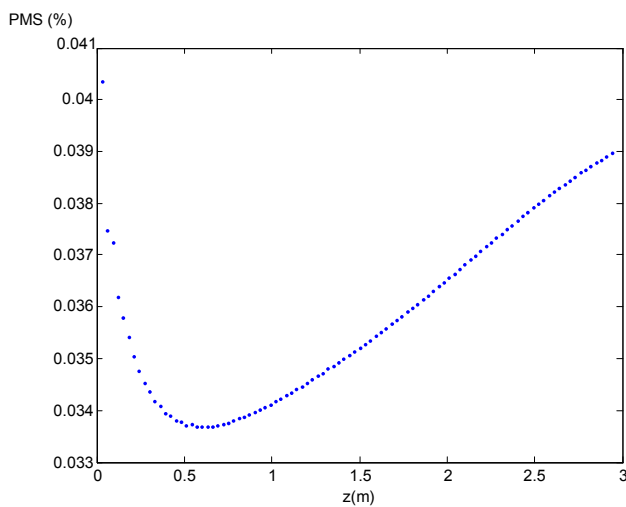


Figura 6.13. PMS para distintas alturas del lecho. Junio Río Cuarto.

En la mayor parte del lecho el comportamiento es similar al de secado en condiciones constantes: la PMS aumenta con la altura del lecho, aunque se observa una disminución cerca de la entrada, comportamiento que se debe a las variaciones de humedad y temperatura del aire de entrada, que en ocasiones producen un rehumedecimiento del sólido.

#### **6.4 Conclusiones**

Los resultados obtenidos indican que el calentamiento que experimenta el aire al pasar por el ventilador produce efectos considerables en los parámetros de secado, por lo cual la disposición de tiro forzado (soplado de abajo hacia arriba) y el uso de un ventilador axial para el secado a bajas temperaturas es recomendable porque reduce el tiempo de secado y, asimismo, el período de permanencia del grano en condiciones no seguras (humedad superior a la segura para el almacenamiento) y conduce a un ahorro energético.

En lo que respecta a la pérdida de materia seca (PMS), en ningún caso supera el valor admisible (0,5%) con lo cual este no sería un problema para implementar el secado natural de maíz en las localidades estudiadas.

## Capítulo 7

---

### Conclusiones

El modelo pseudoestacionario de equilibrio predice una aproximación rápida de los granos al valor de equilibrio con el aire. Si las condiciones del aire son tales que la humedad de equilibrio resulta muy inferior a la humedad final deseada, la humedad final promedio del lecho predicha difiere considerablemente según el modelo de secado que se aplique y tales discrepancias se extienden a otros parámetros de desempeño calculados, tales como el tiempo de secado y el consumo específico de energía. Esto se observa para condiciones del aire constantes. Cuando se analizan series históricas de datos meteorológicos horarios, que resultan altamente variables, la humedad promedio del lecho no difiere de la misma manera entre los modelos para los casos de humedad de equilibrio diferente de la humedad deseada como ocurre con aire en condiciones constantes. Esto se atribuye a las condiciones cambiantes del aire, las cuales hacen variar también la humedad de equilibrio. Los cambios de las condiciones del aire en la oscilación día-noche no permiten que los granos alcancen el equilibrio con las condiciones de entrada del aire, para el modelo pseudoestacionario de equilibrio.

La diferencia entre los resultados predichos por los dos modelos pseudoestacionarios, de equilibrio (PsEst-EQ) y de no equilibrio (PsEst-NEQ) para condiciones del aire constantes depende de las condiciones de secado, siendo mayores las diferencias a altos caudales, altas temperaturas y bajas humedades relativas del aire (condiciones que corresponden a secado rápido). El caudal de aire es el que más incide en la diferencia entre los dos modelos.

Los resultados predichos por los modelos PsEst-EQ y PsEst-NEQ difieren considerablemente para el secado simulado con datos meteorológicos. En este sentido, el uso del modelo PsEst-EQ predice tiempos de secado y consumos de energía menores que el modelo PsEst-NEQ, para todos los caudales de aire analizados, lo cual sugiere procesos más cortos y con menos consumo de energía que los que puede requerir realmente los granos, por lo cual su empleo no resulta prudente. La comparación con datos experimentales indica que el modelo PsEst-NEQ representa mejor el comportamiento del secador.

Se concluye que los modelos de equilibrio sólo pueden usarse para algunos casos (altas humedades relativas y bajos caudales de aire) en el secado con aire en condiciones constantes y no pueden usarse para predecir el comportamiento de un secadero en condiciones variables del aire, resultando entonces más adecuado el empleo del modelo pseudoestacionario de no equilibrio frente al de equilibrio.

Sin embargo, el tiempo de cómputo insumido por el modelo PsEst-NEQ y su método numérico de resolución (método explícito de diferencias finitas) demanda excesivos tiempos de cálculo dado que la relación  $\Delta t/\Delta z$  máxima que puede utilizarse está condicionada por la estabilidad. Esta situación llevó a considerar otros métodos numéricos que podrían resultar más eficientes para resolver el sistema de ecuaciones que constituyen el modelo del secadero: el método de diferencias finitas implícito (DFI) y el método de las líneas (MDL).

Los tres métodos numéricos usados permiten resolver el modelo de secado de maíz a bajas temperaturas de aire. El método de diferencias finitas explícito tiene la limitación de un umbral para el valor máximo del intervalo de tiempo ya que a valores mayores el método es inestable. Y este valor es aún menor para menores  $\Delta z$ , lo que lleva a tiempos de cómputo considerables. El método de diferencias finitas implícito, tal como fue aplicado, no mejora la situación. Si bien permite una discretización con mayores tamaños de paso, éstos ocasionan mayores errores de truncación y no se logra una disminución notable de los tiempos de cómputo, ya que se deben resolver simultáneamente un gran número de ecuaciones no lineales para cada tiempo. Es posible profundizar el tema, analizando otros esquemas de resolución como una meta futura de este trabajo.

El método de las líneas demanda el uso de pequeños  $\Delta z$  para reducir el error de truncación, a pesar de lo cual, el tiempo de cómputo es considerablemente menor que el de los otros dos métodos.

En conclusión, para la simulación del secado de maíz a baja temperatura el MDL se considera el mejor de los tres métodos estudiados y como alternativa se podría considerar el de DFE, que es un método directo que no requiere el uso de una función preprogramada e insume tiempos de cómputo aceptables.

En el modelo pseudoestacionario se despreciaron los términos de acumulación del vapor o la energía en la fase aire respecto de los respectivos aportes convectivos, y considerando que hay evidencias en trabajos publicados acerca de la inexactitud de los

resultados predichos este modelo simplificado, se desarrolló el modelo no estacionario de no equilibrio (NEst-NEQ) y se lo comparó con el modelo pseudoestacionario.

Fue necesario seleccionar el *solver* la rutina adecuado para resolver el modelo más complejo, el NEst, ya que la aplicada para resolver el modelo PsEst insume un tiempo de cómputo prohibitivo cuando se la usa en el NEst. Se encontró que la función más adecuada fue la *ode15s* para condiciones del aire constantes y la *ode23tb* para condiciones del aire variables.

El tamaño de paso espacial  $\Delta z$ , se optimizó teniendo en cuenta que valores pequeños son favorables para disminuir el error de truncación local y desfavorables por aumentar el tiempo de cómputo; para condiciones del aire constantes ese valor óptimo fue de  $\Delta z=0,015$  m y para condiciones del aire variables  $\Delta z=0,03$  m.

Usando el algoritmo apropiado el tiempo de cálculo del modelo más complejo NEst resulta adecuado. La exactitud de los resultados desde el punto de vista computacional es mayor para el PsEst , ya que para el modelo NEst fue necesario aplicar un mayor tamaño de paso en la discretización espacial y una función resolver las odes que tiene más error, para lograr la resolución numérica del sistema en un tiempo razonable. Aunque en el modelo PsEst se han introducido simplificaciones en las ecuaciones que gobiernan el sistema.

Con respecto a los resultados predichos, cualquiera de los dos modelos propuestos podría usarse para predecir el comportamiento del secado de maíz en lecho fijo a baja temperatura, tanto en condiciones del aire constantes como variable, aunque para bajos caudales de aire, situación más común para el secado a baja temperatura, la diferencia entre los resultados predichos por los modelos es más marcada.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se concluye que el modelo NEst-NEQ resulta más apropiado, apto para todos los caudales de aire.

Los resultados obtenidos indican que el calentamiento que experimenta el aire al pasar por el ventilador produce efectos considerables en los parámetros de secado, por lo cual la disposición de tiro forzado (soplado de abajo hacia arriba) y el uso de un ventilador axial para el secado a bajas temperaturas es recomendable porque reduce el tiempo de permanencia del grano en condiciones “no seguras” (humedad superior a la segura para el almacenamiento) y conduce a un ahorro energético.

En lo que respecta a la pérdida de materia seca (PMS), en ningún caso supera el valor admisible (0,5%) con lo cual no representaría un problema para implementar el secado natural de maíz en las localidades estudiadas.



Las conclusiones generales de este trabajo pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

- El secado natural de maíz tanto en condiciones del aire constantes como variables se representa adecuadamente con el modelo no estacionario de no equilibrio másico.
- El algoritmo numérico más apropiado para resolver este modelo es el método de las líneas
- Se obtuvo un simulador del proceso que puede usarse para distintos propósitos
- Resulta relevante el efecto favorable del calentamiento del aire al pasar por el ventilador: conviene usar ventilador axial y tiro forzado
- La pérdida de materia seca no supera los valores admisibles, por lo cual no representaría un obstáculo para la aplicación del secado natural en las localidades estudiadas.

## Notación

---

**a**: área interfacial de las partículas (área de secado) por unidad de volumen de lecho, (1/m).

**a<sub>p</sub>**: área superficial de partículas/volumen de partículas (1/m).

**a<sub>w</sub>**: actividad acuosa.

**C<sub>pa</sub>**: calor específico del aire, [energía aire húmedo /masa aire seco temp.], (J/kg as °C).

**C<sub>pas</sub>**: calor específico del aire seco, [energía aire seco/masa aire seco temp.], (J/kg ss°C).

**C<sub>ps</sub>**: calor específico del sólido, [energía sol. húmedo/masa sólido seco temp.], (J/kg ss°C).

**C<sub>ps</sub>**: calor específico del sólido seco, [energía sólido seco/masa sólido seco temp.], (J/kg ss°C).

**C<sub>pv</sub>**: calor específico del agua vapor, [energía agua /masa agua temp.], (J/kg agua °C).

**C<sub>pw</sub>**: calor específico del agua líquida, [energía agua /masa agua temp.], (J/kg agua °C).

**E**: energía consumida por el ventilador, (Ws)

**E<sub>esp</sub>**: energía específica consumida por el ventilador, (MJ/kg agua evaporada)

**G<sub>a</sub>**: caudal másico superficial del aire, (kg as/s m<sup>2</sup>).

**H<sub>a</sub>**: entalpía del aire húmedo en base seca (J/kg a.s)

**h<sub>ra</sub>**: humedad relativa del aire, dec.

**H<sub>s</sub>**: entalpía del sólido húmedo en base seca (J/kg s.s)

**h<sub>v</sub>**: coeficiente de transferencia de calor, [energía /área partículas tiempo °C], (J/s m<sup>2</sup> °C)

**H<sub>v</sub>**: entalpía del vapor de agua a la temperatura del sólido (J/kg)

**H<sub>va</sub>**: entalpía del vapor de agua a la temperatura del aire (J/kg)

**L<sub>g</sub>**: calor de sorción del agua adsorbida en el grano, (J/kg).

**L<sub>w</sub>**: calor latente de vaporización del agua pura a la T de referencia, (J/kg).

**M<sub>v</sub>**: peso molecular del agua: 18 kg/kmol

**M<sub>a</sub>**: peso molecular del aire: 29 kg/kmol

$n_w$ : velocidad de secado, [ masa de agua/área superficial partícula tiempo], ( $\text{kg}/\text{m}^2$  s).

$P$ : presión total, Pa

$PMS$ : pérdida de materia seca [gr/ kg 100]

$P_{sat}$ : presión de vapor del agua pura, Pa

$P_{vap}$ : presión parcial de vapor en el aire, Pa

$P_o'$ : potencia absorbida por el aire a su paso por el ventilador, (W)

$P_o$ : potencia suministrada al ventilador , (W)

$Q_v$ : caudal volumétrico del aire, [volumen de aire/tiempo], ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$Q_{vv}$ : caudal volumétrico del aire por unidad de volumen de lecho, [volumen de aire/volumen de lecho tiempo], (1/s).

$r_g$ : radio del grano, (m)

$S$ : superficie transversal del lecho, ( $\text{m}^2$ )

$t$ : tiempo, (s).

$T_a$ : temperatura del aire, ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_s$ : temperatura del sólido, ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$v$ : velocidad del aire, (m/s).basada en el área transversal del lecho, S

$V$ : velocidad de secado, (kg agua evaporada/h kg ss)

$x$ : humedad del sólido, base húmeda, (b.h.).

$X$ : humedad del sólido, base seca, (b.s.).

$Y$ : humedad del aire b.s (kg agua/kg as)

$z$ : coordenada altura de lecho

$Z_{máx}$ : altura total del lecho (m).

*Letras griegas:*

$\rho_{sh}$ : densidad del sólido húmedo, [ masa sólido húmedo/volumen sólido ], ( $\text{kg sh}/\text{m}^3$ ).

$\rho_s$ : densidad del sólido seco [masa sol. seco/volumen sólido], ( $\text{kgss}/\text{m}^3$ ).

$\rho_{Lh}$ : densidad del lecho de sólidos, [masa sólido húmedo/volumen lecho], ( $\text{kg sh}/\text{m}^3$ ).

$\rho_L$ : densidad del lecho de sólidos seco, [masa sólido seco/volumen lecho], ( $\text{kg ss}/\text{m}^3$ ).

$\rho_a$ : densidad del aire seco, [masa aire seco/volumen aire], ( $\text{kg a.s}/\text{m}^3$ ).

$\Delta p$ : caída de presión total en el lecho, Pa

$\varepsilon$ : porosidad del lecho, [volumen de huecos/volumen de lecho]

*Subíndices:*

0: inicial

en: entrada

sal: salida

f : final

e: equilibrio

s: secado

pr: promedio

c: cómputo

i: coordenada espacial

j: coordenada temporal

est: estandar

eq: equivalante

## Bibliografía

---

- Aregba, A.W.; Nadeau, J. P. (2007). Comparison of two non-equilibrium models for static grain deep-bed drying by numerical simulations. *Journal of Food Engineering* 78:1174-1187.
- ASAE Standards, (2003). American Society of Agricultural Engineers
- Ashino, R.; Nagase, M. ;Vaillancourt, M. (2000).Behind and Beyond the MATLAB ODE Suite Computers and Mathematics with Applications, 40, 491-512.
- Bartosik, R. (2006). Secado en silo con aire natural o baja temperatura. INTA Balcarce. [www.inta.gov.ar/balcarce](http://www.inta.gov.ar/balcarce).
- Bartosik, R.E. & Maier, D.E. (2004). Evaluation of three Na/LT in-bin drying strategies in four corn belt locations. *Transactions of the ASAE*, 4 (84), 1195-1206.
- Biondi, P. Biscarini, M. y Farina, G. (1988). Simulation of low temperature corn drying in three locations in Italy. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 40, 103-111.
- Bird R., Stewart W. & Lightfoot. (2008). Fenómenos de Transporte. Limusa Wiley.
- Bolsa de Comercio de Rosario. (2013). <http://www.bcr.com.ar/Normas/resumenes/MAIZ.pdf>
- Bowden, P. J., Lamond, W. J. & Smith, E.A. (1983) Simulation of near ambient grain drying I.comparison of simulations with experimental results. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 28, 279-300.
- Brees, M.; Parcell, J. y Giddens, N. (2006). Capturing vs Creating Value. Department of Agricultural Economics.University of Missouri-Extension. <http://extension.missouri.edu/explore/agguides/agecon/g00641.htm> Acceso: 14/11/de 2006.
- Brook, R.C.; Foster, G.H. (1981) Drying cleaning and conditioning. In Handbook of Transportation and Agriculture, vol.II.Fied Crops, E.E.Finney ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. & Hall, C.W. (1992). *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Cirigliano de Junín, Ingeniería en Ventilación. Junin. [www.cirigliano.com.ar](http://www.cirigliano.com.ar). (acceso 22/2/2013).
- Constantinides, A. & Mostoufi, N. (1999). *Numerical Methods for Chemical Engineers with Matlab Applications*. New Yersey: Prentice Hall, Inc.
- Crapiste , G. H. y Rotstein, E.(1997). Design and Performance Evaluation of Dryers. *Handbook of Food Engineering*. CRDC Press Inc. Cap. 4: 125-166.
- Dalpasquale, V.D., Sperandio, D., Monken e Silva, L. & Kolling, E. (2008). Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme. *Applied Mathematics and Computation*, 200, 590.
- Davidson, V. J., Noble, S.D. & Brown, R.B. (2000). Effects of air temperature and humidity on stress cracks and breakage of maize kernels. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 11 (3), 03-308.
- De la Torre, D.; Bartosik, R.; Rodríguez, J.; Maier D. (2008). Natural air/low temperature in-bin drying strategies for three different climatic regions in argentina. 2008 International Grain Quality and Technology Congress. 15-18/7/ Chicago, Illinois, EEUU.

- Eichelberger, L.; Portella, J.A.; Gutkoski, L.C.; Santin, J.A. (2009) Secagem de sementes de milho com ar natural forçado. *Pesq. Agrop. Gaucha*. Porto Alegre 15(2), 159-169.
- Finlayson, B. A. (1992). *Numerical Methods for programs with moving fronts*. Washington: Ravenna Park Publusing Inc.
- Giner, S. A. (1999). Diseño de Secadoras Continuas de Trigo. Simulación de la Transferencia de Calor y Materia y de Pérdidas de Calidad. Tesis de Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. <http://163.10.3.252/>
- Giner, S.A. (2001) An improved cross-flow wheat drying model for equipment design. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 566, 467-476.
- Giner, S.A. y Bruce, D.M. (1998). Two-dimensional simulation model of steady-state mixed flow grain drying. Part 2: Experimental validation. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71(1), 51-66.
- Giner, S.A.; Mascheroni, R.H. & Nellist, M.E. (1996). Cross-flow drying of wheat. A s simulation program with a diffusion-based deep-bed model and a kinetic expression for viability loss estimations. *Drying Technology*, 14 (7&8), 1625-1672.
- Giner, S.A.; Martin Torres Irigoyen, R.; Cicuttín, S.; Fiorentini, C. (2010). The variable nature of Biot numbers in food drying. *Journal of Food Engineering* 101: 214-222.
- Gunasekaran, S y Shove, G. C. (1986). [Dynamic programming optimization of total airflow requirement for low temperature corn drying](#). *Journal of Agricultural Engineering Research* 34(1):41-51
- Gunasekaran, S. & Paulsen, M.R. (1985). Breakage resistance of corn as a function of drying rates. *Transactions of the ASAE* , 28 (6), 2071-2076.
- Gupta, P.; Wilcke, W.F.; Morey, R.V.; Meronuck, R.A. (1999). Efecto of dry matter loss on corn quality. *Applied Engineering in Agriculture*, 15(5), 501-507
- Hansen, R. C.Troyer, E.; Keener, H.M. (2008). Success with natural –air grain drying. ASABE paper Number 084550.
- Heath, M.T. (2002). *Scientific computing, an introductory survey*.(2nd ed.). New York: McGraw-Hill, (Chapter 11).
- Hoffman, J.D. (1992). *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. McGraw-Hill.
- Hossain, M. A., Bala, B.K. & Setter, M. A. (2003). Simulation of natural air drying of maize cribs. *Simulation. Modelling Practice and Theory*, 11, 571-583.
- Hossain, M. A.; Bala, B.K. ; Setter, M. A. (2003). Simulation of natural air drying of maize cribs. *Simulation. Modelling Practice and Theory*, 11, 571-583.
- Informe FAO. (2010). <http://www.fao.org/docrep/x5058s/x5058S00.htm#Contents>, (12/07/10)
- Informe INTA (2008). Actualización Técnica N° 33.
- Informe Maizar (2006) El Futuro del Campo, el Campo del Futuro 09/05/06. <http://www.maizar.org.ar/delicatessen.php>
- Informe INTA. (2010) Actualización Técnica N° 54: Maíz. Cadena de Valor Agregado. Alternativas de transformación e industrialización.
- Jayas, D. S. & White, N. D. G. (2003). Storage and drying in Canada: low cost approaches. *Food Control*, 14, 255-261.
- Kim, T. H., Opara, L.U., Hampton, J.G., Hardacre, A.K. y MacKay, B.R. (2002). The effects of grain temperature on breakage susceptibility in maize. *Biosystems Engineering*, 82 (4),415-421.
- Lamond, W. J. (1982). Thermodynamics of air in deep bed drying at near ambient temperature. *Agricultural Engineering*, 37, 91-93.

- Lee, H. S., Matthews, C. J., Braddock, R. D., Sander, G. C. & Gandola, F. A. (2004). Matlab method of lines template for transport equations. *Environmental modeling & Software*, 19, 603.
- Lezcano, E. Informe de producto Mayo 2012: Cadena de productos de maíz. [http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/farinaceos/Productos/Productos\\_maiz\\_1ra\\_2012\\_05May.pdf](http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/farinaceos/Productos/Productos_maiz_1ra_2012_05May.pdf) (acceso: 14/02/2013)
- Lutfy, O. F. S. B. Mohd Noor, K. A. Abbas, M. H. (2008). Marhaban. Some control strategies in agricultural grain driers: A review. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 6 (2), 74-85.
- Maizar, Asociacion de Maiz Argentino. Estadísticas maíz 2013. <http://www.maizar.org.ar/estadisticas.php>
- Ministerio de Economía, Sec. Industria, Comercio y Pyme, Centro de estudios para la Producción. (2006). Monitoreo del comercio Exterior Argentino. [http://www.industria.gov.ar/cep/pancomexterior/presactcomext/mon\\_comercio\\_exterior.pdf](http://www.industria.gov.ar/cep/pancomexterior/presactcomext/mon_comercio_exterior.pdf)
- Misra M. K & D. B. Brooker. (1980). Thin layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. *Transactions of the ASAE*, 23, 1254.
- Montross, M. D., Bakker-Arkema, F.W. & Hines, R.E. (1999). Moisture content variation and grain quality of corn dried in different high temperature dryers. *Transactions of the ASAE*, 42(2), 427-433.
- Morey, R. V., Cloud, H.A. y Nelson, W.W. (1976). Simulation of solar energy grain drying in corn. Agricultural engineering Department, University of Minnesota.
- Morey, R. V., Cloud, H.A., Gustafson, R.J. y Petersen, D.W. (1979). Evaluation of the feasibility of solar energy grain drying. *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, 22(2), 409-417.
- Naghavi, Z., Moheb, A. & Ziaei-Rad, S. (2010). Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model. *Energy Conversion and Management*, 51, 258-264.
- Pabis, S; Jayas, D.S. y Cenkowski, S. (1998) Grain Drying: Theory and Practice. John Wiley & Sons, Canada.
- Pantanelli, A. (2006). Cereales listos para el desayuno. Dirección Nacional de Alimentos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la Nación, [http://www.alimentosargentinos.gov.ar/03/farina/Cereales/Cereales\\_Listos\\_01.htm](http://www.alimentosargentinos.gov.ar/03/farina/Cereales/Cereales_Listos_01.htm). Acceso 14/09/ 2006.
- Perry's Chemical Engineers' Handbook (1997). 7ma ed. Perry, R.H.; Green, D.W. McGraw-Hill
- Res. Ex SAGyP N° 1075/94 Anexo VII, Norma VII. Normas de Calidad para la Comercialización de Granos y Subproductos. [http://www.cosechaypostcosecha.org/data/postcosecha/basesComercializacion/Res\\_1075\\_ver1.pdf](http://www.cosechaypostcosecha.org/data/postcosecha/basesComercializacion/Res_1075_ver1.pdf) . acceso:15/7/2011)
- Robutti, L. (2000) Calidad y usos del maíz. [www.biblioteca.org.ar/libros/210719.pdf](http://www.biblioteca.org.ar/libros/210719.pdf). (acceso 15/02/2013)
- Ryniecki, A., Nellist, M.E. (1991a). Optimization of control systems for near-ambient grain drying: Part 1, the optimization procedure. *Journal of Agricultural Engineering Research*., 48, 1-17.
- Ryniecki, A., Nellist, M.E. (1991b). Optimization of control systems for near-ambient grain drying: Part 2, the optimizing simulations. *Journal of Agricultural Engineering Research*., 48, 19-35.

- Ryniecki, A.; Gawrysiak-Witulska, M.; Wawrzyniak, J.(2007). Correlation for the automatic identification of drying endpoint in near-ambient dryers: application to malting barley. *Biosystems Engineering*, 98, 437-445.
- Sangkram, U. y Noomhorm, A. (2002). The effect of drying and storage of soybean on the quality of bean, oil and lecithin production. *Drying Technology*, 20 (10), 2041-2054.
- Satorre, E.M.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. (2003) Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires- Argentina.
- Sauer, D. (Editor). (1992). *Storage of Cereal Grains and their Products*, 4<sup>th</sup> Ed. American Association of Cereal Chemists, USA.
- Schoenau, G. J., Arinza, E. A. ; Sokhansanj, S. (1995). Simulation and optimization of energy systems for in-bin drying of canola grain (rapeseed). *Energy Conversion and Management*, 36 (1), 41-59.
- Shampine, L. F.; Gadwey, I., Thompson, S. (2003). *Solving ODEs with Matlab*.Cambridge University Press. U.K.
- Sharp, J. R. (1982). A review of low temperature drying simulation models. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 27, 169-190.
- Sharp, J. R. (1984). The design and management of low temperature grain driers in England-A simulation study. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 29, 123-131.
- Smith, E. A. & Bailey, P.H. (1983). Simulation of near ambient grain drying. II- Control strategies for drying barley in northern Britain. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 28, 301-317.
- Srivastava, V. K. & John, J. (2002). Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management*, 43, 1689-1708.
- Steele, J.L. ;Saul, W.V. ;Hukill, W.V. (1969).Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. *Transactions of the ASAE*.12 (5), 685-689.
- Sun, Y., Pantelides, C.C. & Chalabi, Z. S. (1995). Mathematical modeling and simulation of near ambient grain drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 13, 243-271
- Sun, D.W. (1998). Selection of EMC/ERH isotherm equations for shelled corn based on fitting available data. *Drying Technology*, 16 (3-5),779-797.
- Thompson, T. L., Peart, R.M., Foster, G.H. (1968). Mathematical simulation of corn drying: a new model. *Transactions of the ASAE*, 11(4), 582-586.
- Thompson, T.L.(1972). Temporary storage of high moisture shelled corn using continuous aeration. *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, 15(2), 333-337.
- Tirawanichakul, Y., Prachayawarakorn, S, Varayanond, W. & Soponronnarit, S. (2004). Simulation and grain quality for in-store drying of paddy. *Journal of Food Engineering*, 64, 405-415.
- Valente, D.S.M., Souza, C.M.A.; Queiroz, D.M. Simulação de secagem de milho e arroz em baixas temperaturas. IV Congresso Brasileiro da Sociedade brasileira de Informatica Aplicada à Agropecuaria e Agroindústria. Porto Seguro.(2003)
- Vitorino, R.V., D.S.M., Souza, C.M.A.; Queiroz, D.M. Simulação de secagem de milho safrinha em baixas temperaturas para diferentes umidades de colheita. (2007). <http://www.do.ufgd.edu.br/CristianoSouza/didatico/msafrinha07.pdf> (acceso 28/02/2013)



- Wang, J. J. (1993). Mathematical modelling of the drying process in fixed bed drying. *Numerical Heat Transfer*, Part B, 24, 229-241.
- Wilcke, W, Morey, R.V. & Hansen, D.J. (1993). Reducing energy use for ambient-air corn drying. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol 9(2):241-248.
- Wilcke, W, Morey, R.V. (1997). Natural-air corn drying in the upper midwest. <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC6577.html>
- Zare, D. & Chen, G. (2008). Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68, 78-87.
- Zhu, W., Dong, T., Cao, C. & Li, D. (2004). Fractal modeling and simulation of the developing process of stress cracks in corn kernel. *Drying Technology*, 22 (1&2), 59-69.
- Zimmerman, A. (2006). The greenest green possible: energy that is not consumed. Resource: *Engineering and Technology for a sustainable world* 13(10), 9-1

# ANEXO I

---

## Métodos numéricos aplicados en el trabajo

Las ecuaciones que constituyen los distintos modelos del secadero son ecuaciones diferenciales parciales (EDP) no lineales.

Las EDP lineales (aquellas cuyos coeficientes son constantes) se clasifican (clasificación geométrica) como hiperbólicas, parabólicas o elípticas según el valor del discriminante en el caso de las EDP de segundo orden:

$b^2-4ac < 0$  hiperbólica, tipificada por la ecuación de la onda ( $\partial^2 u / \partial t^2 = \partial^2 u / \partial x^2$ )

$b^2-4ac = 0$  parabólica, tipificada por la ecuación de conducción de calor no estacionaria ( $\partial u / \partial t = \partial^2 u / \partial x^2$ )

$b^2-4ac > 0$  elíptica, tipificada por la ecuación de laplace ( $\partial^2 u / \partial y^2 + \partial^2 u / \partial x^2 = 0$ )

La clasificación de las EDP generales (no lineales y de orden distinto a 2) no está tan definida. Si los coeficientes son variables, un tipo de ecuación puede variar de una región a otra, y si hay más de una ecuación en el sistema, cada ecuación puede ser de un tipo diferente. Sin embargo estos términos se usan a menudo para describir las EDP, aunque el significado no sea tan preciso ni riguroso, de una manera más descriptiva:

-EDPs hiperbólicas: describen un proceso físico conservativo, dependiente del tiempo, tal como la convección que no evoluciona hacia un estado estacionario.

-EDPs parabólicas: describen un proceso físico disipativo, dependiente del tiempo, que evoluciona hacia un estado estacionario.

-EDPs elípticas: describen sistemas que ya han alcanzado el estado estacionario o el equilibrio, y por lo tanto no dependen del tiempo (Heath, 2002).

Las ecuaciones de lecho fijo pueden clasificarse, teniendo en cuenta estos conceptos, en EDP hiperbólicas no lineales de primer orden, constituyendo un problema de valor inicial y con condiciones de borde de primera clase o tipo Dirichlet (el valor de la variable prescrito en el borde).

La aproximación básica de la resolución numérica consiste en el reemplazo del dominio continuo por una malla de puntos discretos y la solución que se obtiene es una solución aproximada, válida sólo en tales puntos de la malla. Además, mediante la

aproximación matemática de la formulación continua, se obtiene una formulación discreta, por ejemplo reemplazando las derivadas por aproximaciones en diferencias finitas. El objetivo de los métodos discretos es transformar las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas aproximadamente equivalentes para la resolución por computadora. Es necesario tener en cuenta que esta aproximación puede tener problemas de adecuación, exactitud, convergencia y estabilidad.

Los métodos de resolución de problemas que dependen del tiempo pueden clasificarse en métodos semidiscretos y métodos completamente discretos. En los métodos semidiscretos se discretiza el espacio, pero no el tiempo, de modo que el sistema de EDP se transforma en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO).

Para un problema de valor inicial, la solución se obtiene comenzando con los valores iniciales y luego marchando paso a paso en el tiempo, generando filas sucesivas en el arreglo de la solución. Este procedimiento “time-stepping” puede ser explícito o implícito, dependiendo si la fórmula para la solución del próximo paso de tiempo involucra solamente información actual o pasada. En principio no hay una distinción real entre métodos discretos o semidiscretos, dado que la variable tiempo finalmente se discretiza en ambos casos, pero hay una distinción práctica importante: en un método semidiscreto es posible delegar la función a resolver a un paquete de software sofisticado adaptativo, que toma siempre el paso de tiempo más grande posible que mantenga la estabilidad y logre la exactitud deseada, mientras que en un método completamente discreto el usuario debe elegir el tamaño del paso de tiempo para cumplir con esos objetivos. En los métodos explícitos la elección del tamaño de paso deberá tener en cuenta la condición de estabilidad mientras que en los métodos implícitos la información que no desea resignar.

Las derivadas parciales pueden aproximarse por diferencias finitas de muchas maneras: diferencias atrasadas, diferencias adelantadas y diferencias centradas.

Todas estas aproximaciones introducen errores, denominados errores de truncación. Las diferencias hacia delante y hacia atrás son aproximaciones de primer orden (error de truncación de primer orden), mientras que la diferencia centrada es una aproximación de segundo orden (error de truncación de segundo orden).

Como la mayor parte de los métodos numéricos, la técnica de diferencias finitas consiste en la utilización de desarrollos de Taylor para aproximar las derivadas de la

función. Para la aplicación práctica se considera un cierto número de términos de la serie de Taylor, es decir, se trunca y el término remanente de mayor orden en la expresión de la serie provee el orden del método.

El **error de truncación** es menor en los métodos de mayor orden y disminuye al disminuir los tamaños de paso de espacio y de tiempo que se usan en el algoritmo de la solución.

El desarrollo de las aproximaciones discretas puede llevarse a cabo por distintos métodos, tales como el método de diferencias finitas explícito (DFE), el método de diferencias finitas implícito (DFI) y el método de las líneas (MDL). Los métodos de diferencias finitas son completamente discretos, esto es, se discretizan tanto las derivadas espaciales como las temporales, de modo que el sistema original de EDP se transforma en un sistema de ecuaciones algebraicas. La distinción entre explícito e implícito depende de cómo se formule el sistema discretizado. Si la solución en un punto avanzado en el tiempo se escribe en términos de la solución en el punto base, el método resulta explícito y las ecuaciones pueden resolverse secuencialmente avanzando en el tiempo. Mientras que si la solución en un punto avanzado en el tiempo se escribe en términos de la solución en el punto avanzado además de los anteriores, el método resulta implícito y las ecuaciones deben resolverse simultáneamente.

Los métodos explícitos son condicionalmente estables y requieren un paso relativamente pequeño en la dirección de la marcha para satisfacer criterios de estabilidad. Los métodos implícitos son, en general, incondicionalmente estables. El tamaño del paso de marcha está restringido por requerimientos de exactitud, no de estabilidad. Para obtener resultados lo más cercanos posible de la predicción de una hipotética solución analítica exacta de la EDP (que no existe para el conocimiento actual) en problemas en estado no estacionario, el intervalo de tiempo no puede ser mucho mayor que el que satisface la condición de estabilidad de los métodos explícitos. Un sistema EDP no lineal puede ser resuelto directamente por métodos explícitos, mientras que cuando se aplican métodos implícitos se debe resolver un sistema de ecuaciones no lineales. La mayor estabilidad de los métodos implícitos permite usar mayores tamaños de pasos de tiempo que para los métodos explícitos, pero requieren más trabajo por paso ya que debe resolverse un sistema de ecuaciones en cada paso (Hoffman, 1992).

El método de las líneas es un método semidiscreto. La idea básica es reemplazar las derivadas espaciales por aproximaciones algebraicas, con lo cual el sistema resultante ya no contiene derivadas espaciales, quedando solamente las derivadas temporales. Resulta así un sistema de EDO como aproximación del sistema de EDP original. El desafío es formular adecuadamente el sistema de EDO. Luego pueden aplicarse algoritmos de solución para integrar EDOs de valor inicial. Entonces, la principal ventaja de este método es la posibilidad de uso de algoritmos existentes y bien establecidos para las EDOs.

Para evaluar la **estabilidad** del método, el criterio más utilizado es el de Von Neumann, y la condición que debe satisfacerse depende del problema.

Por ejemplo, para la ecuación simple de advección (del tipo de las que integran el sistema de ecuaciones del secadero):  $u_t + c u_x = 0$ , (donde  $u_t$  y  $u_x$  son las derivadas primeras con respecto a  $t$  y  $x$ , respectivamente, y  $c$  es una constante) cuando se resuelve con un método numérico explícito, el método resulta estable si se cumple con la siguiente condición:  $\frac{\Delta t c}{\Delta z} \leq 1$ . Este criterio provee un límite superior al tamaño de paso de tiempo

para un dado paso de espacio (Finlayson, 1992). Para el caso del modelo de la secadora se trata de un sistema de ecuaciones, algunas de las cuales son de la forma de esta ecuación de advección, y el coeficiente  $c$  no será único, dependiente de las condiciones operativas.

## **ANEXO II**

---

**Diagramas de bloques modelos PsEst-EQ y PsEst-NEQ.**

**Metodo DFE**

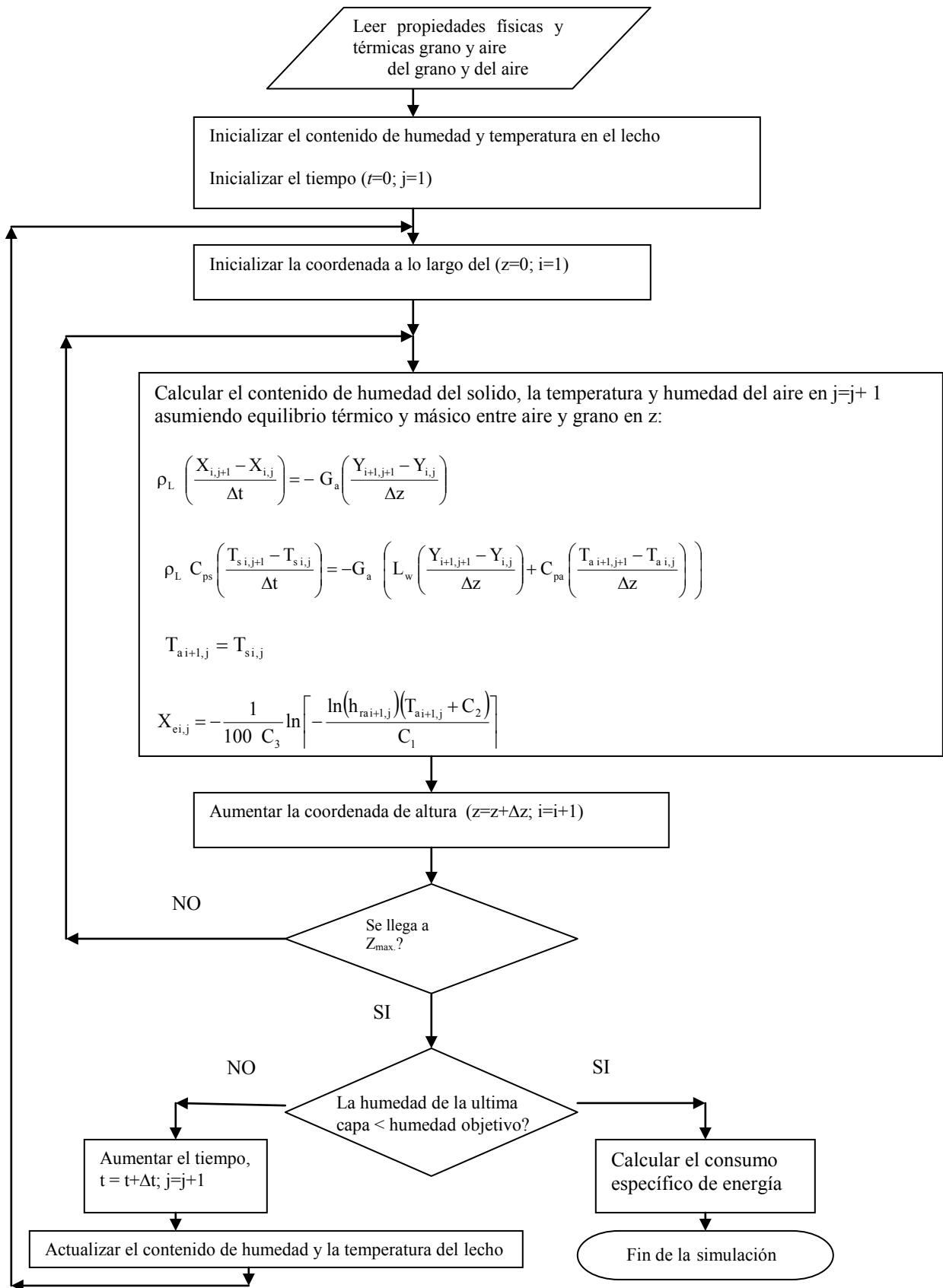


Figura 1. Diagrama de bloques simplificado de la resolución numérica del modelo PsEst-EQ por el método de diferencias finitas explícito

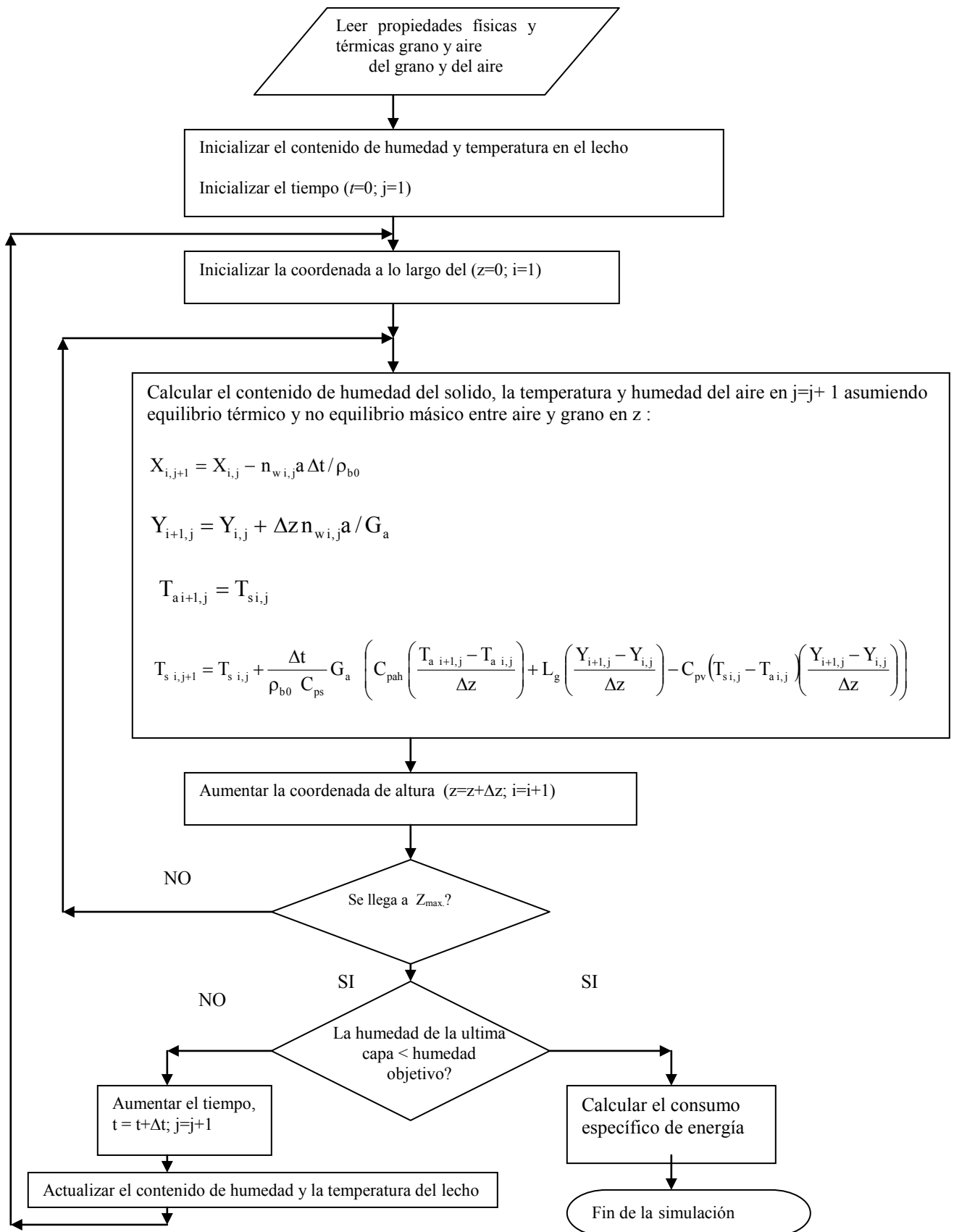


Figura 2. Diagrama de bloques simplificado de la resolución numérica del modelo PsEst-NEQ por el método de diferencias finitas explícito



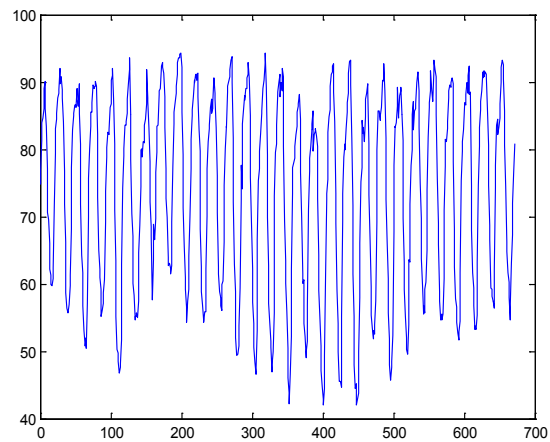
## ANEXO III

---

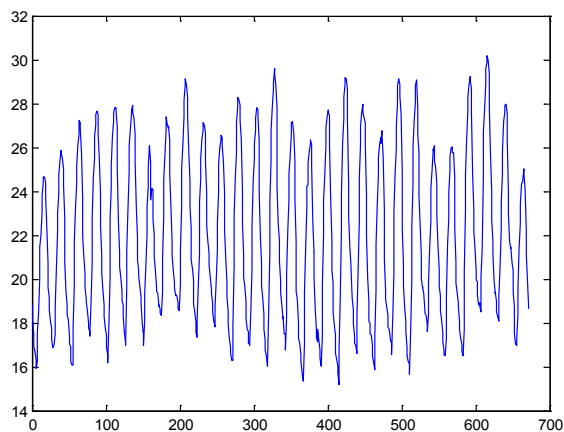
### Humedad relativa y temperatura del aire ambiente. Promedios horarios de 7 años (2000 a 2006).

#### Río Cuarto Febrero

Humedad relativa (%) vs. tiempo (h)

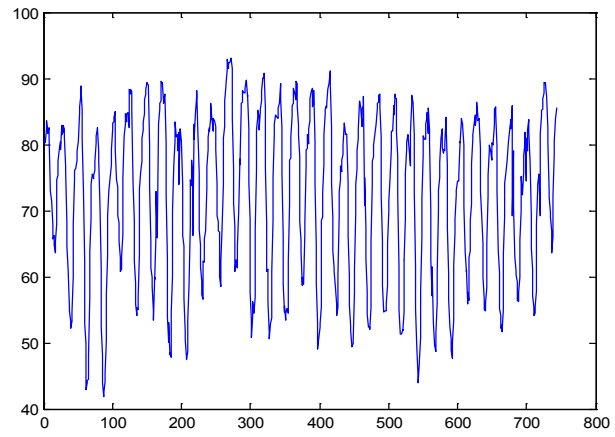


Temperatura  $T_a$  (°C) vs. tiempo (h)

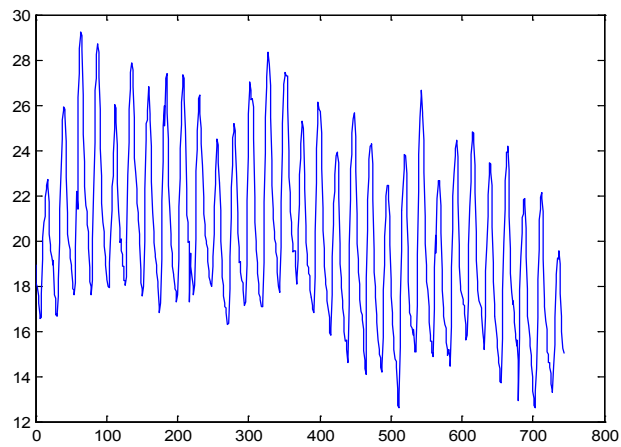


## Río Cuarto Marzo

Humedad relativa (%) vs. tiempo (h)

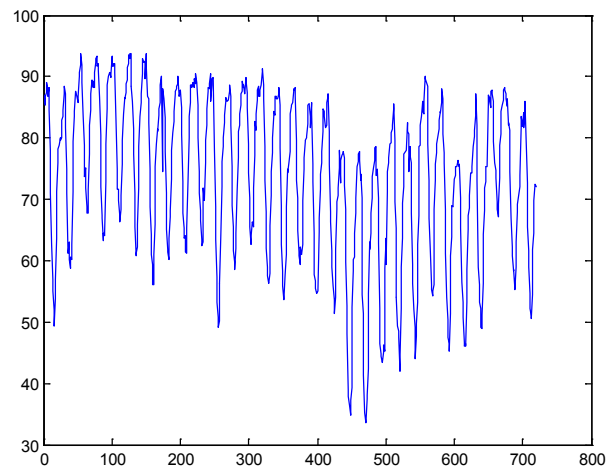


Temperatura  $T_a$  (°C) vs. tiempo (h)

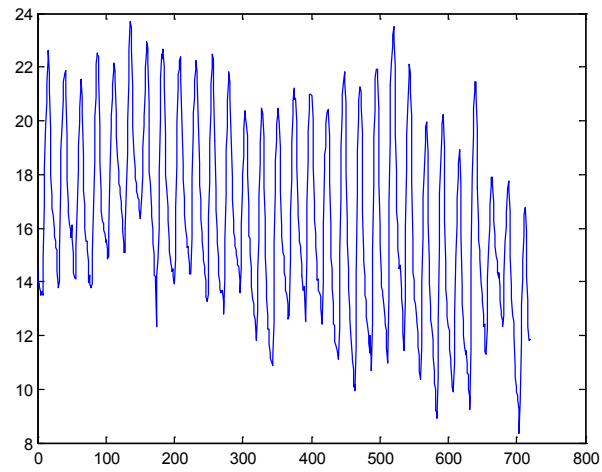


## Río Cuarto Abril

Humedad relativa  $h_{ra}$  (%) vs. tiempo (h)

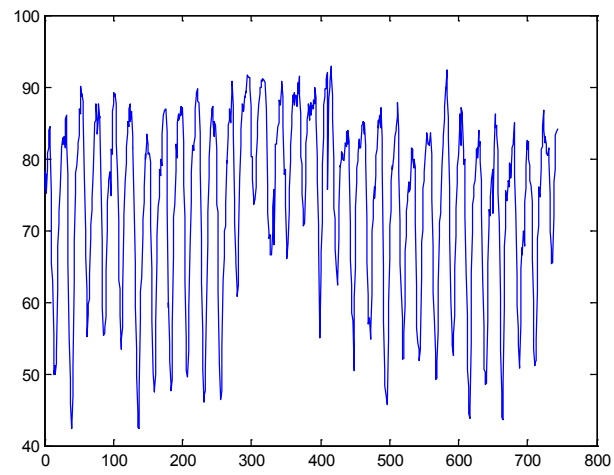


Temperatura  $T_a$  (°C) vs. tiempo (h)

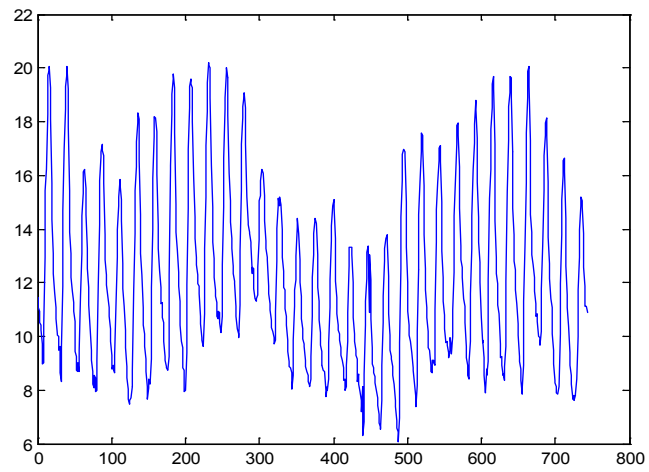


## Río Cuarto Mayo

Humedad relativa  $h_{ra}$  (%) vs. tiempo (h)

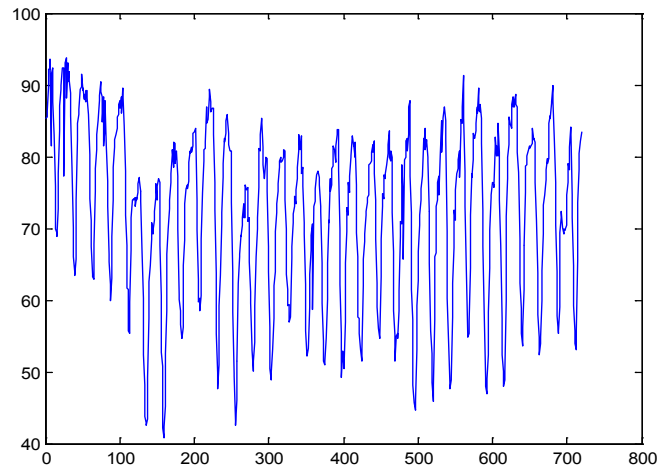


Temperatura  $T_a$  (°C) vs. tiempo (h)

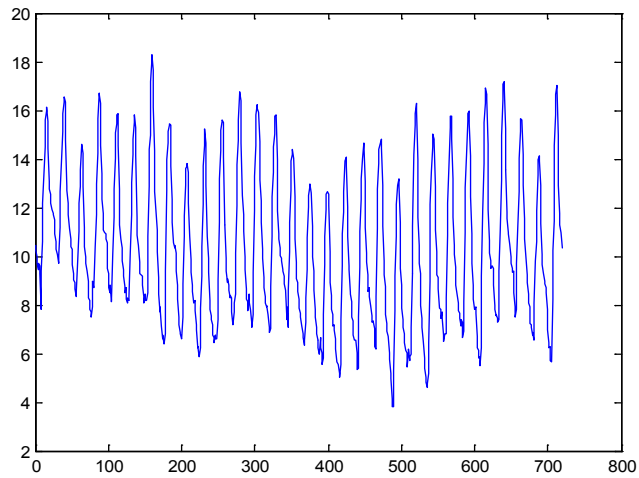


## Río Cuarto Junio

Humedad relativa  $h_{ra}$  (%) vs. tiempo (h)

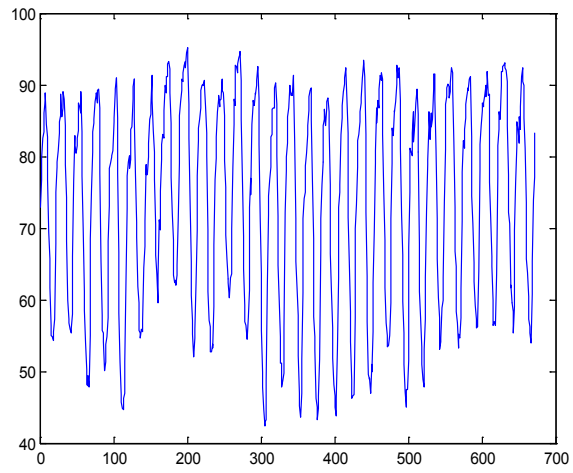


Temperatura  $T_a$  (°C) vs. tiempo (h)

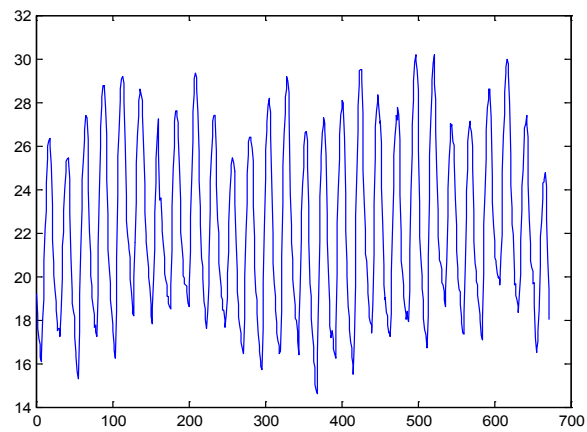


## Junín Febrero

Humedad relativa  $h_{ra}$  (%) vs. tiempo (h)

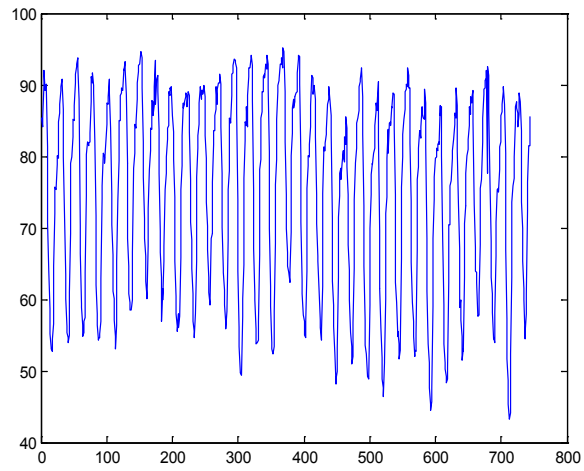


Temperatura  $T_a$  (°C) vs. tiempo (h)

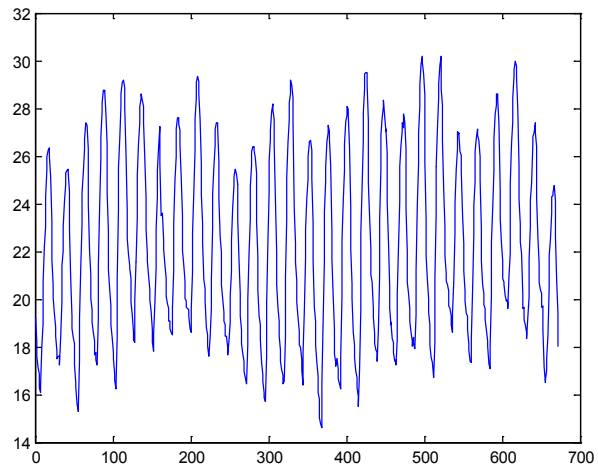


## Junin Marzo

Humedad relativa  $h_{ra}$  (%) vs. tiempo (h)

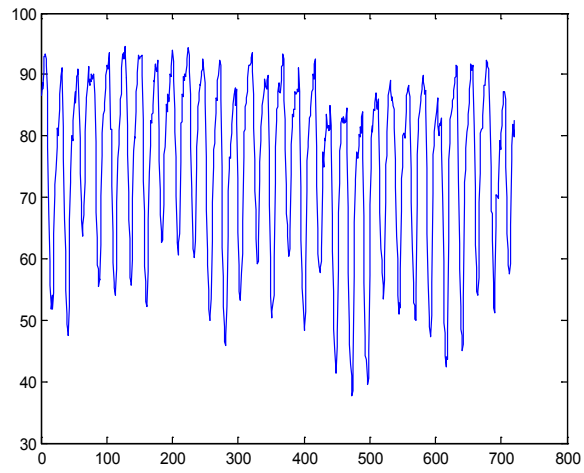


Temperatura  $T_a$  (°C) vs. tiempo (h)

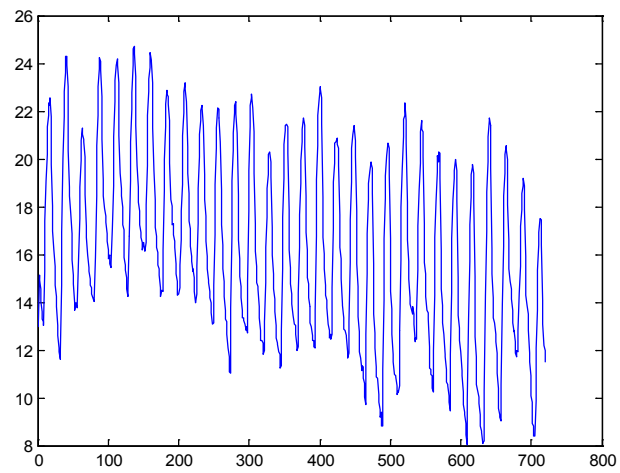


## Junin Abril

Humedad relativa  $h_{ra}(\%)$  vs. tiempo (h)



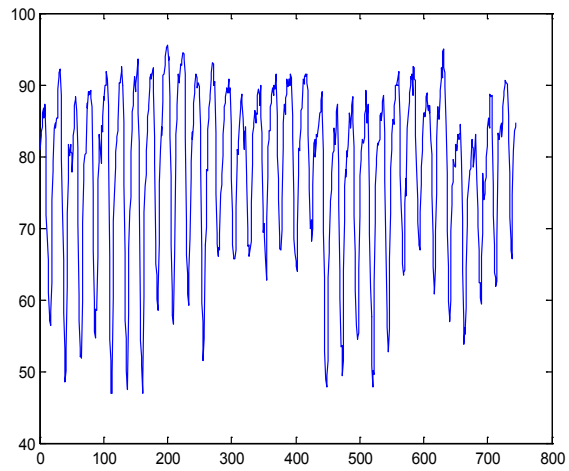
Temperatura  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) vs. tiempo (h)



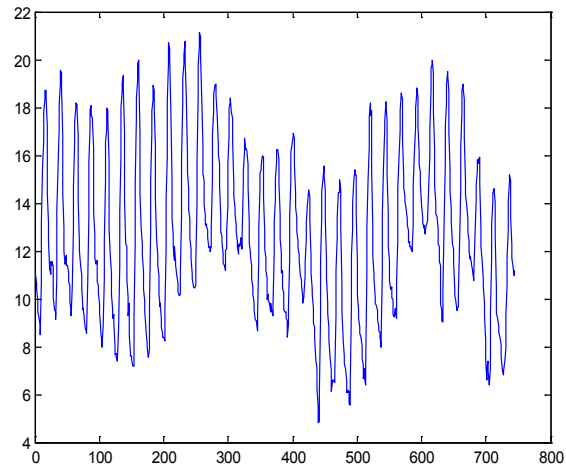


## Junín Mayo

Humedad relativa  $h_{ra}(\%)$  vs. tiempo (h)

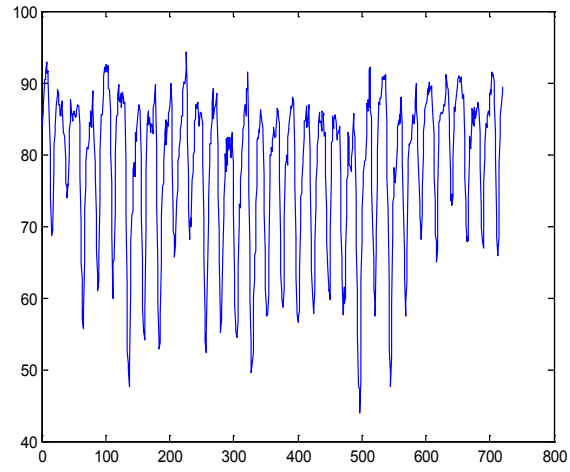


Temperatura  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) vs. tiempo (h)

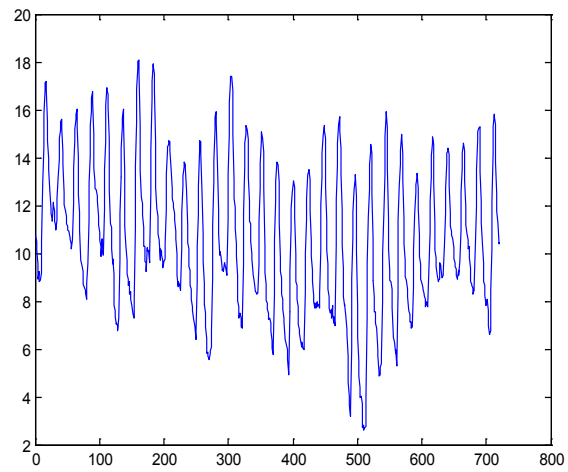


## Junín Junio

Humedad relativa  $h_{ra}$ (%) vs. tiempo (h)



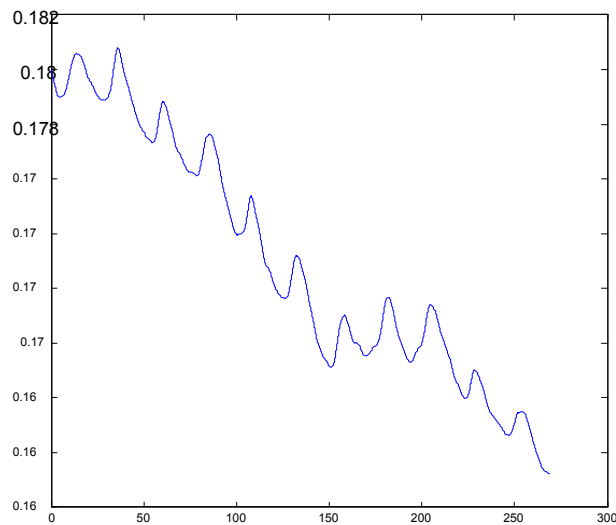
Temperatura  $T_a$  (°C) vs. tiempo (h)



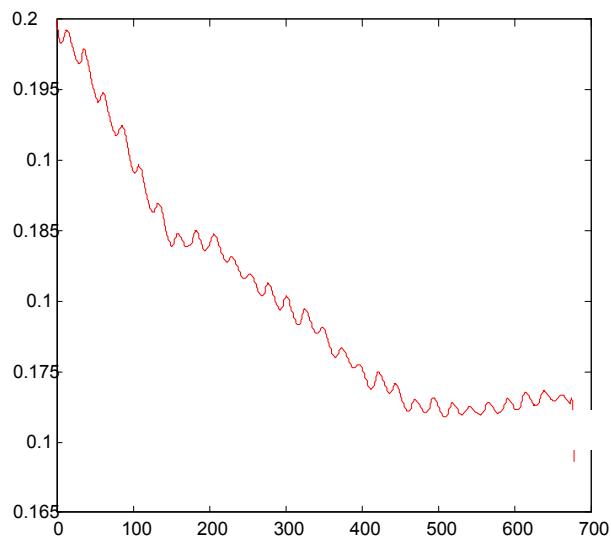
## ANEXO IV

**Comparación de modelos pseudoestacionarios de equilibrio (PsEst-EQ) y no equilibrio (PsEst-NEQ) en condiciones meteorológicas. Humedad promedio en el lecho vs. tiempo. Río Cuarto**  
 $Q_{VV}=0,03\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ ,  $Z_{\text{max}}=3 \text{ m}$ ,  $X_0=0,20 \text{ dec. b.s.}$ ,  $T_0=20^\circ\text{C}$ .

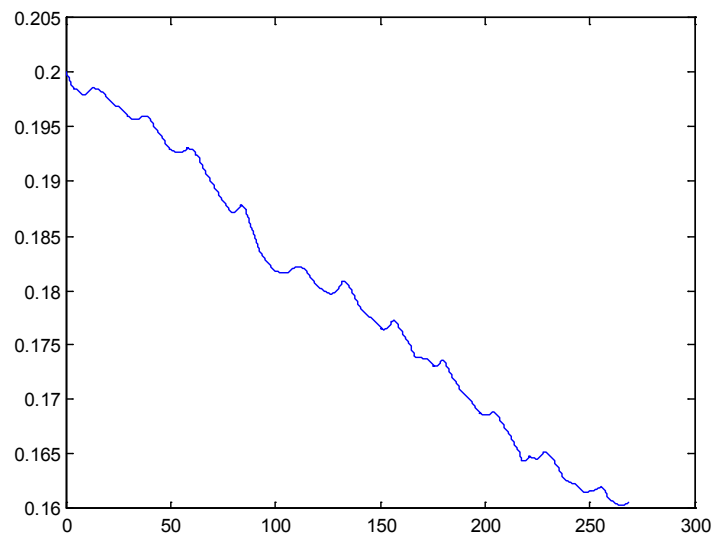
Febrero- Modelo PsEst-EQ.  $X_{\text{pr}}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h).



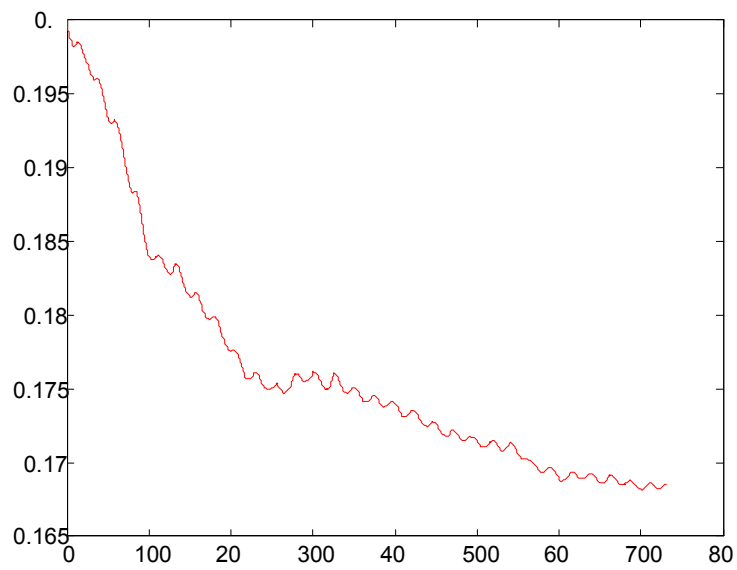
Febrero- Modelo PsEst-NEQ.  $X_{\text{pr}}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h).



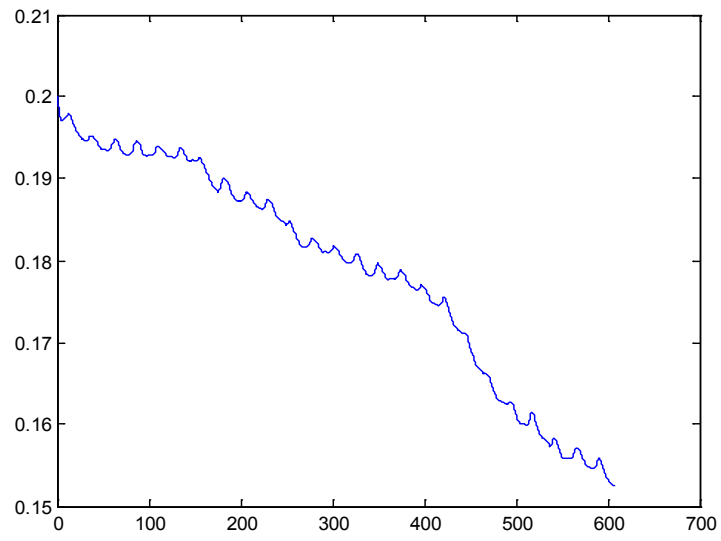
Marzo-Modelo PsEst-EQ.  $X_{pr}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h).



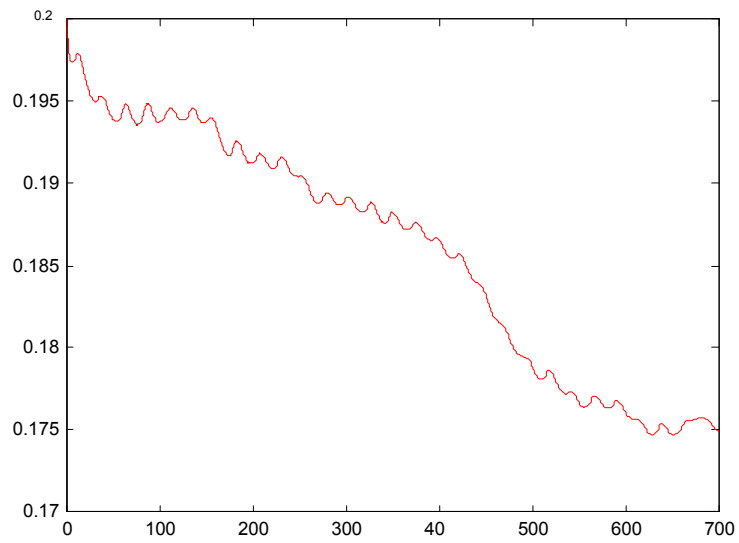
Marzo-Modelo PsEst-NEQ.  $X_{pr}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h).



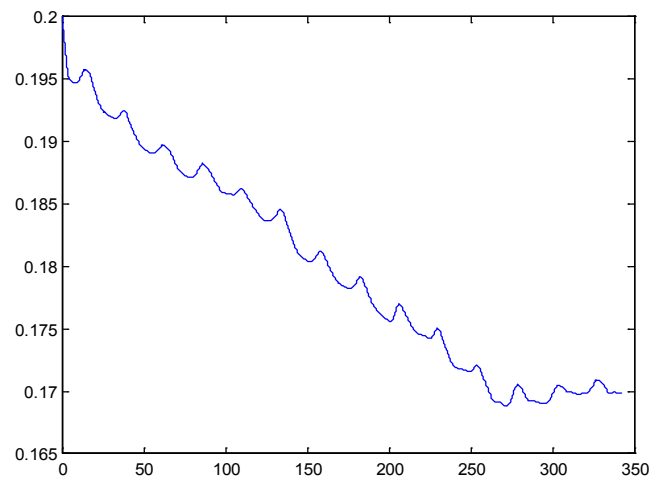
Abril-Modelo PsEst-EQ.  $X_{pr}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h).



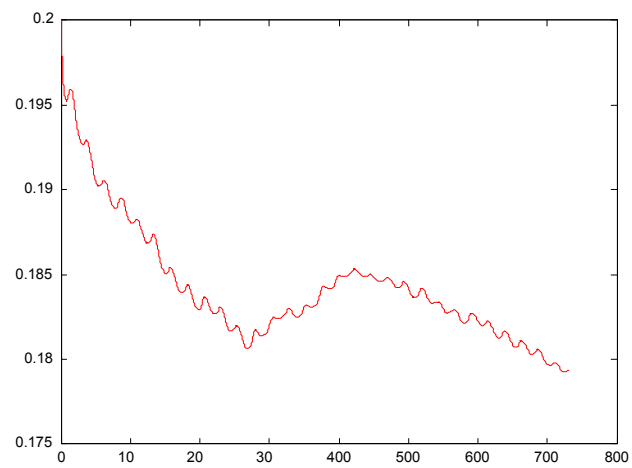
Abril-Modelo PsEst-NEQ.  $X_{pr}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h).



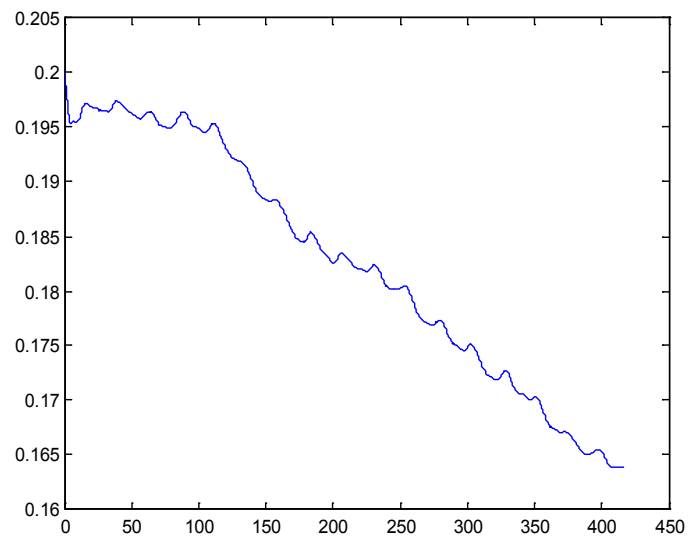
Mayo Modelo PsEst-EQ.  $X_{pr}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h).



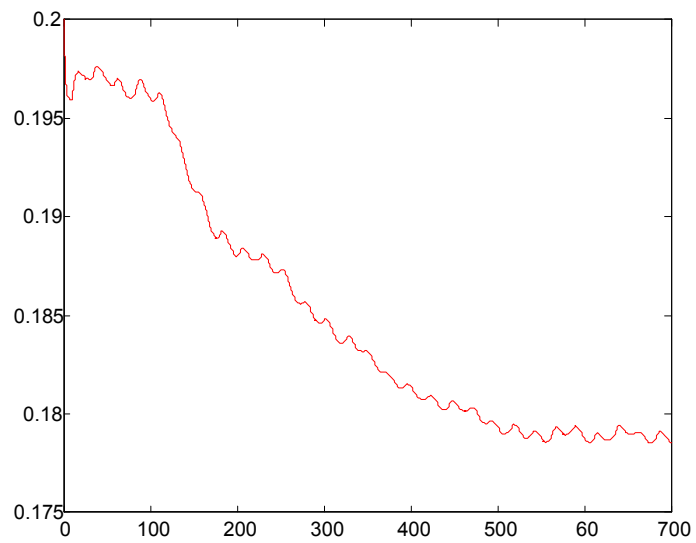
Mayo Modelo PsEst-NEQ.  $X_{pr}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h).



Junio.Modelo PsEst-EQ .  $X_{pr}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h)



Junio-Modelo PsEst-NEQ.  $X_{pr}$  (dec.b.s.) vs tiempo (h).



## ANEXO V

---

**Diagramas de bloques método diferencias finitas implícito (DFI) y método de las Líneas (MDL). Modelo PsEst-NEQ**



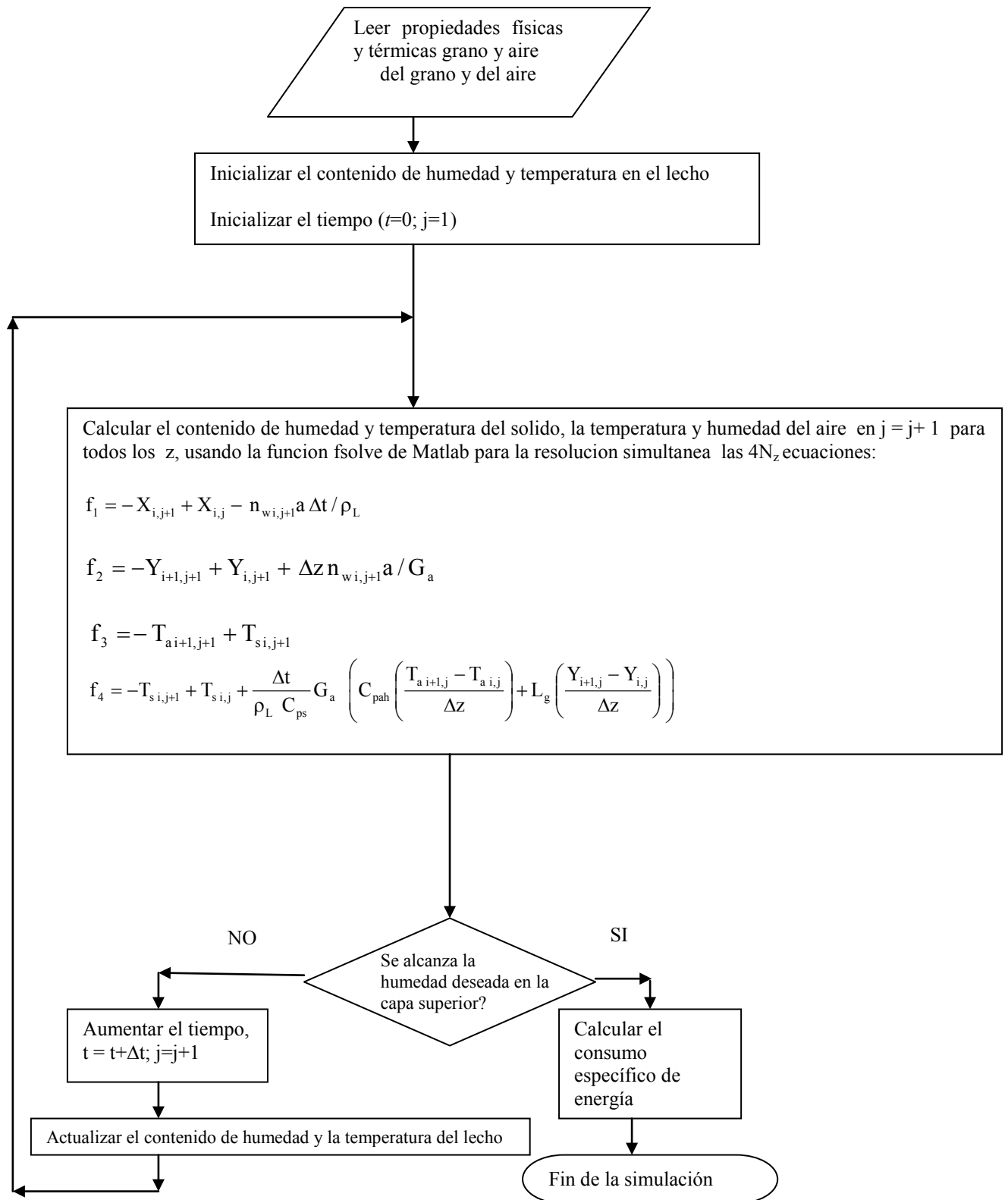


Figura 1. Diagrama de flujo simplificado resolución modelo PsEst-NEQ por el método de diferencias finitas implícito.

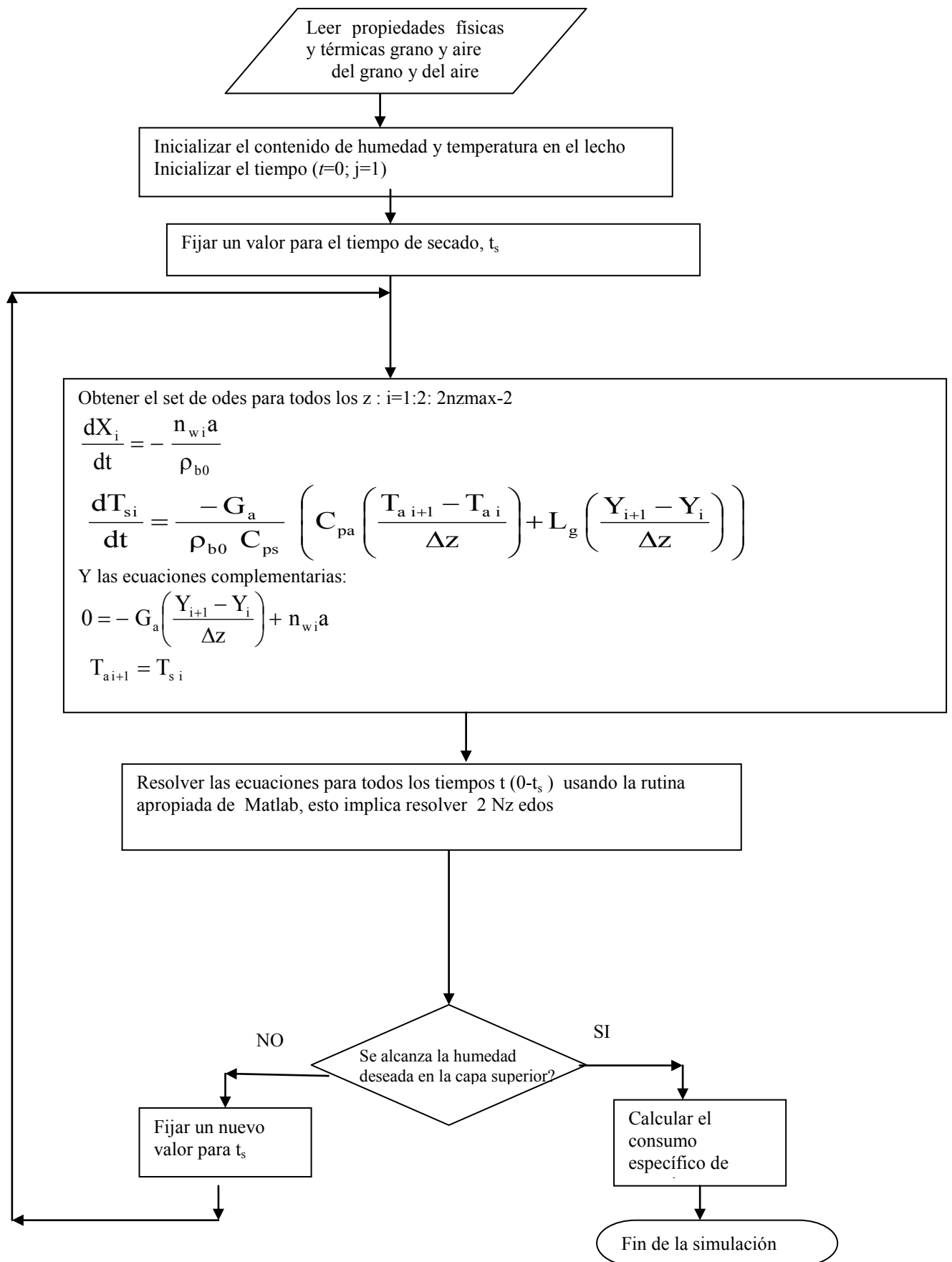
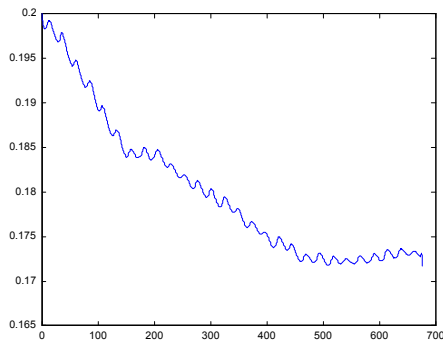


Figure 2. Diagrama de flujo simplificado resolución modelo PsEst-NEQ por el método de las líneas.

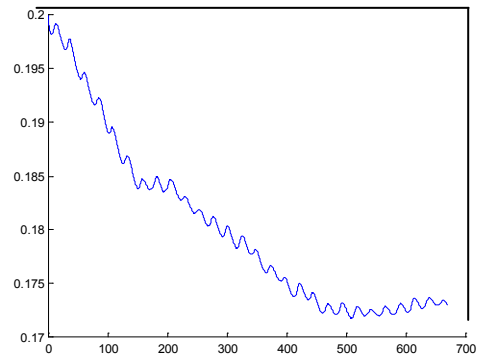
## ANEXO VI

**Comparación de métodos numéricos: método de diferencias finitas explícito (DFE) y método de las líneas (MDL) en condiciones meteorológicas. Humedad promedio en el lecho vs. tiempo. Río Cuarto.  $Q_{VV}=0.03\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ ,  $Z_{\text{max}}=3 \text{ m}$ ,  $X_0=0,20$  dec. b.s.,  $T_0=20^\circ\text{C}$ .**

### Febrero

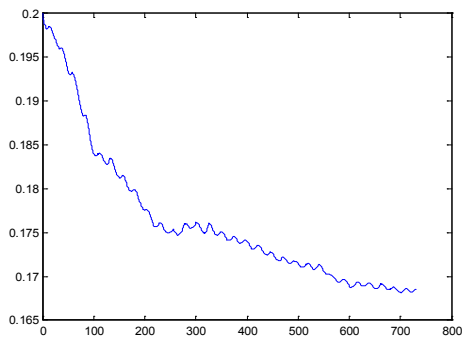


DFE

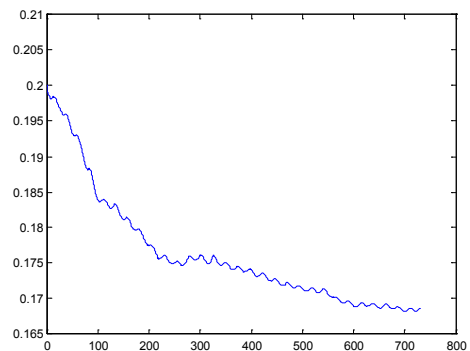


MDL

### Marzo

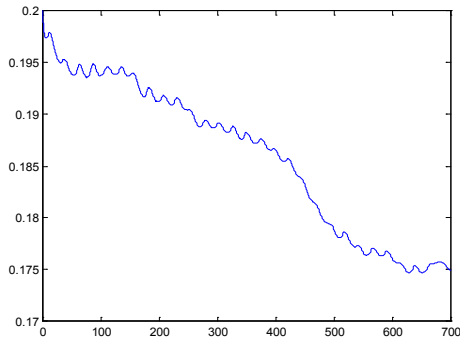


DFE

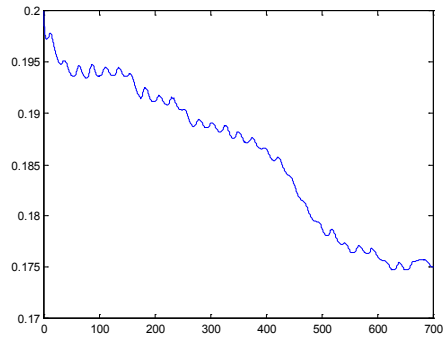


MDL

## Abril

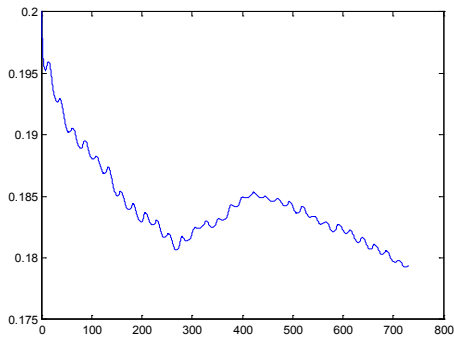


DFE

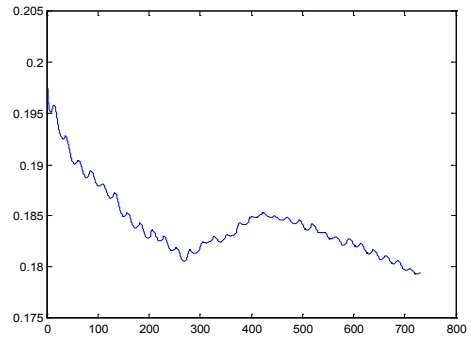


MDL

## Mayo



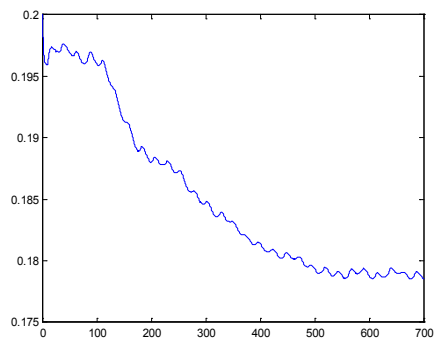
DFE



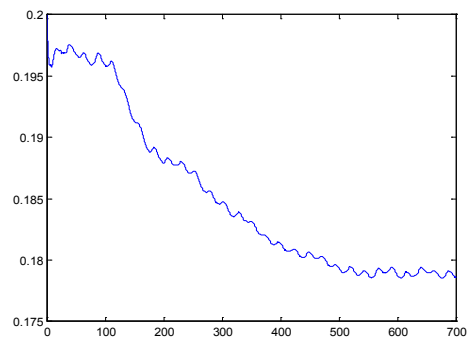
MDL

## Junio

o



DFE



MDL

## **ANEXO VII**

---

### **Diagramas de bloques método de las Líneas (MDL). Modelo NEst-NEQ**

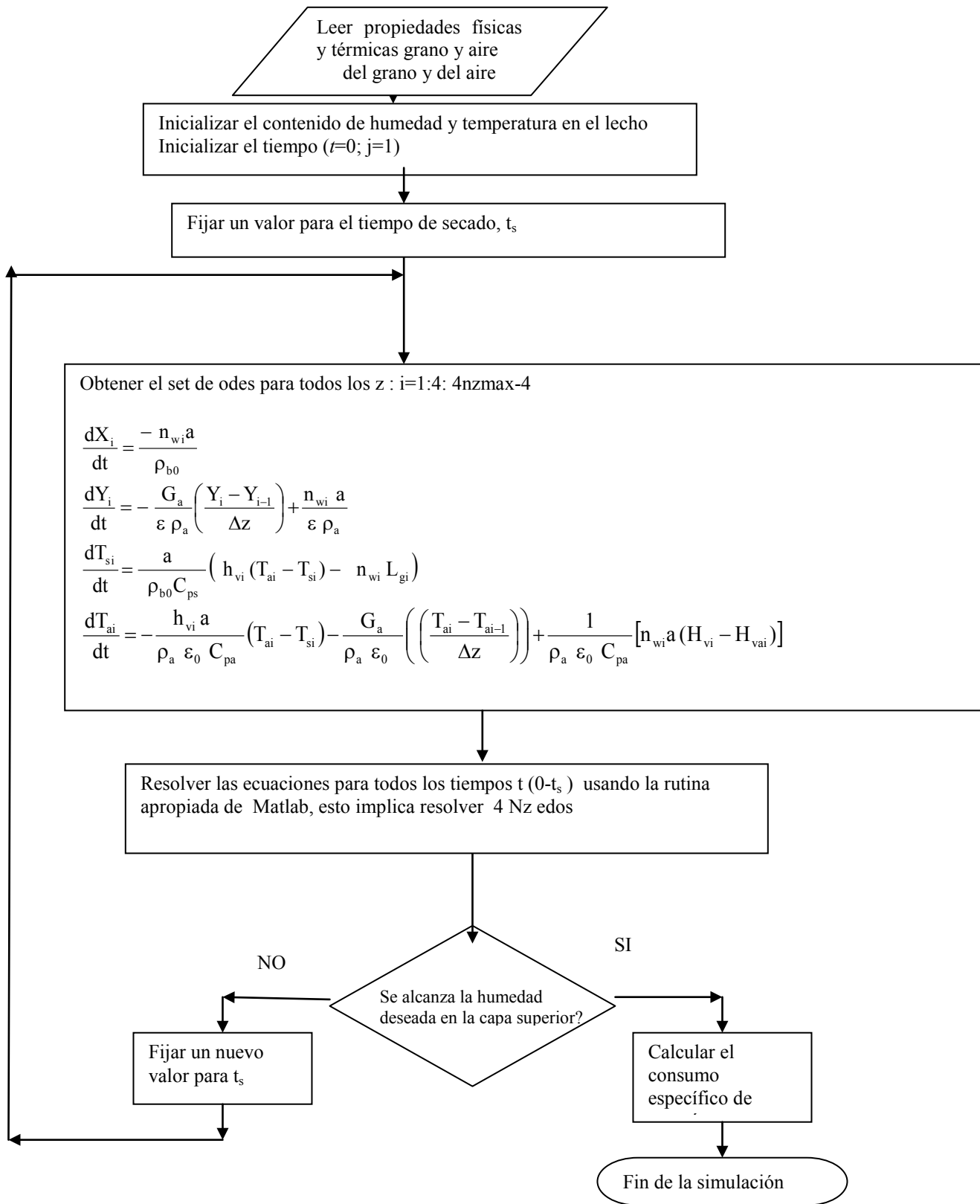


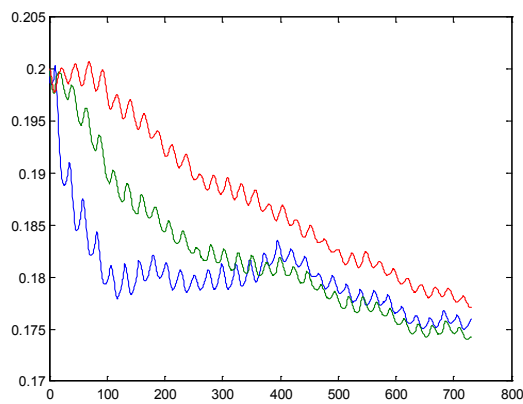
Figure 1. Diagrama de flujo simplificado resolución modelo NEst-NEQ por el método de las líneas.

## ANEXO VIII

**Comparación de modelos pseudoestacionario (PsEst) y no estacionario (NEst) en condiciones meteorológicas. Perfiles de humedad del sólido y humedad promedio en el lecho vs. tiempo.  $Q_{VV}=0,03\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ ,  $Z_{\text{max}}=3 \text{ m}$ ,  $X_0=0,20 \text{ dec. b.s.}$ ,  $T_0=20^\circ\text{C}$ .**

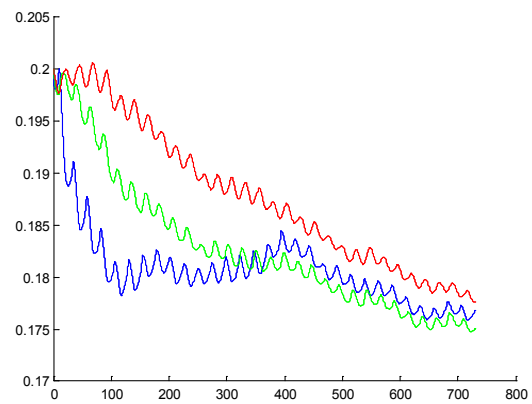
Marzo-Junín

Humedad del sólido vs. tiempo a distintas alturas de lecho



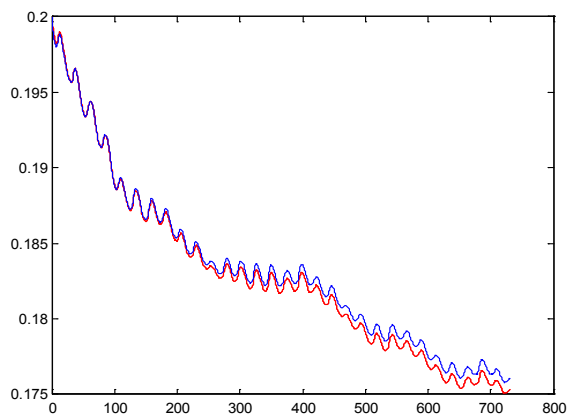
Modelo NEst

--- z=3m --- z=1,5 m --- z=0,1m



Modelo PsEst

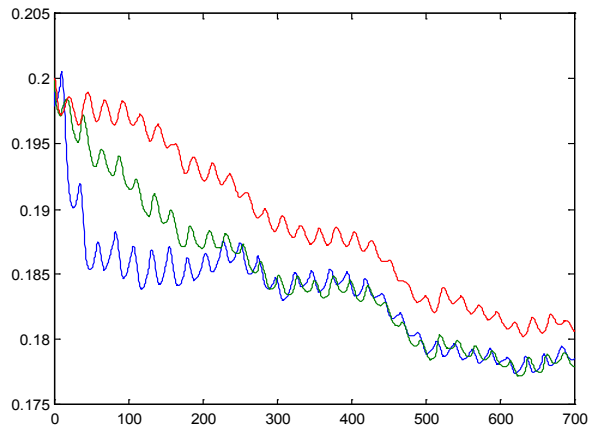
Humedad promedio del lecho vs. tiempo



--- NEst --- PsEst

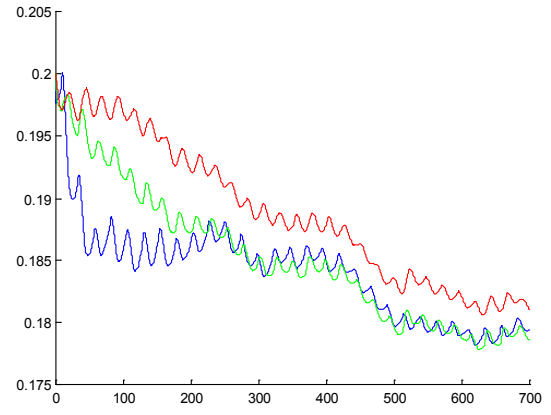
Abril Junín.

Humedad del sólido vs. tiempo a distintas alturas de lecho



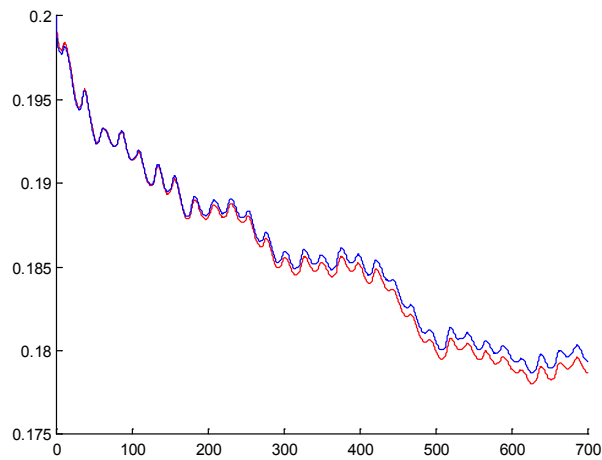
Modelo NEst

--- z=3m --- z=1,5 m --- z=0,1m



Modelo PsEst

Humedad promedio del lecho vs. tiempo.

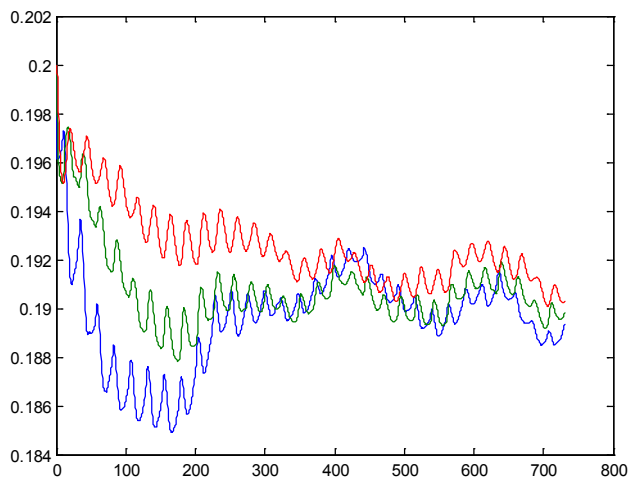


--- NEst --- PsEst



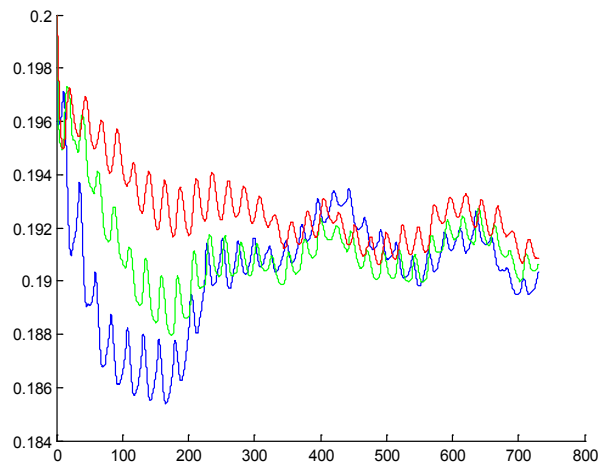
Mayo Junín

Humedad del sólido vs. tiempo a distintas alturas de lecho



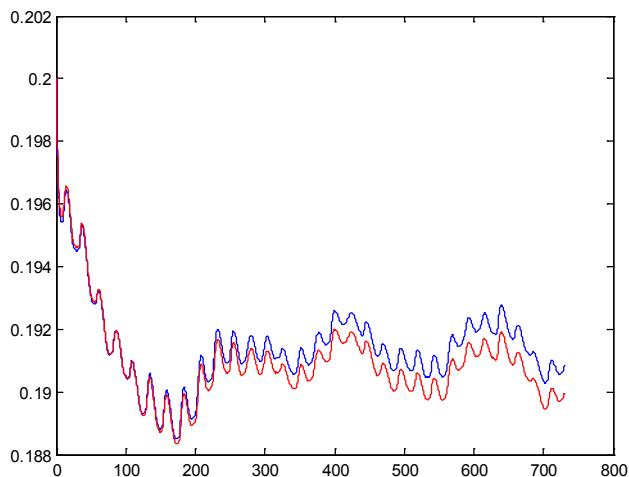
Modelo NEst

--- z=3m --- z=1,5 m --- z=0,1m



Modelo PsEst

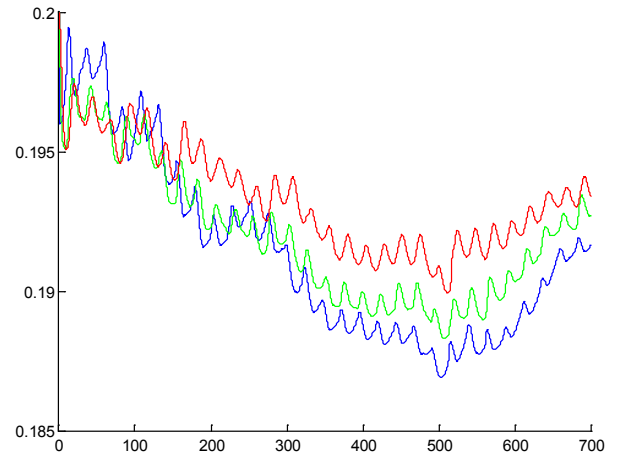
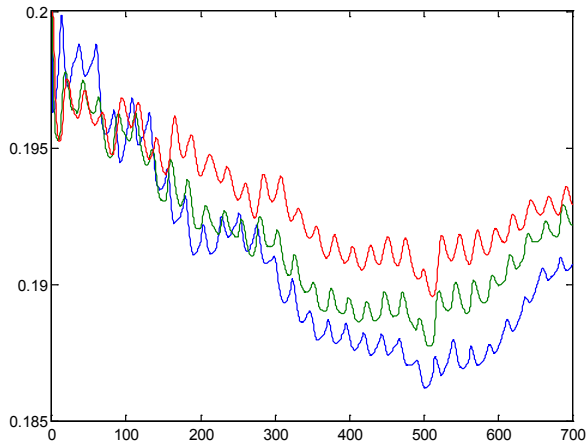
Humedad promedio del lecho vs. tiempo.



--- NEst --- PsEst

Junio Junín.

Humedad del sólido vs. tiempo a distintas alturas de lecho

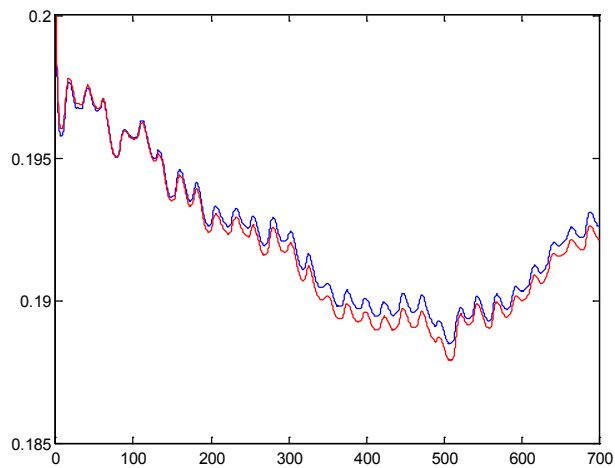


Modelo NEst

--- z=3m --- z=1,5 m --- z=0,1m

Modelo PsEst

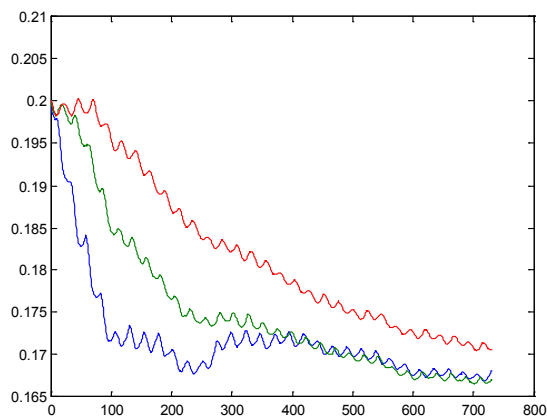
Humedad promedio del lecho vs. tiempo.



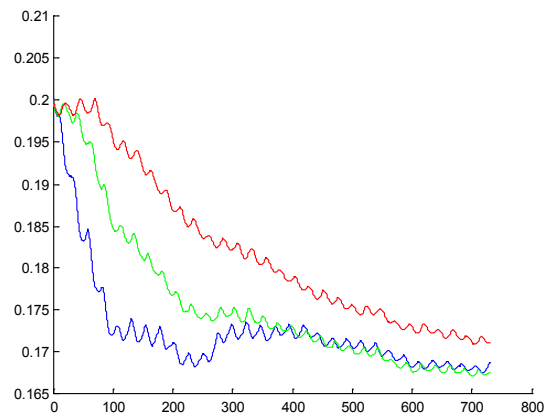
--- NEst --- PsEst

Marzo Río Cuarto.

Humedad del sólido vs. tiempo a distintas alturas de lecho



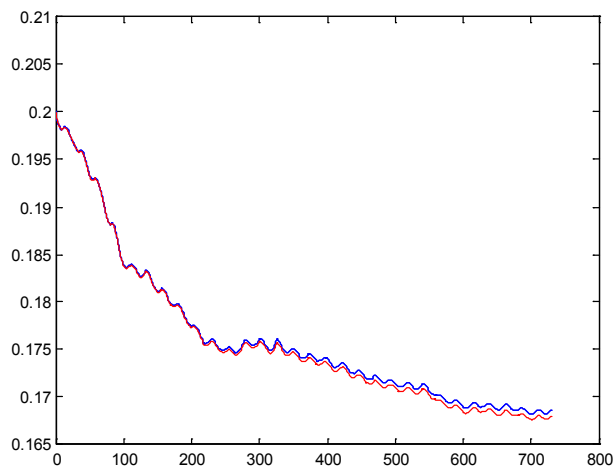
Modelo NEst



Modelo PsEst

--  $z=3m$  --  $z=1,5 m$  --  $z=0,1m$

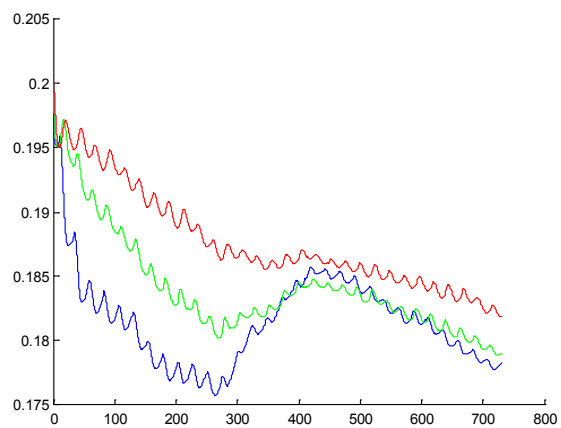
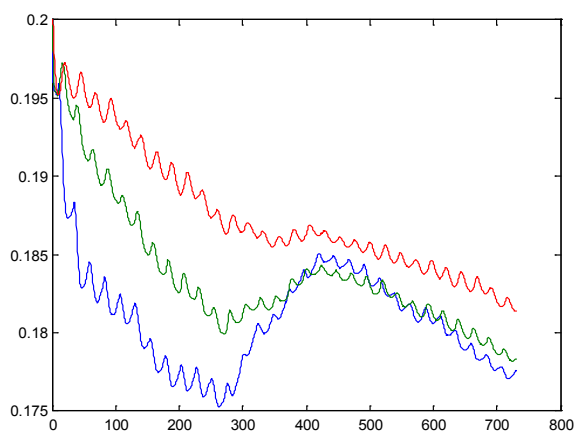
Humedad promedio del lecho vs. tiempo.



-- NEst -- PsEst

## Mayo Río Cuarto.

### Humedad del sólido vs. tiempo a distintas alturas de lecho

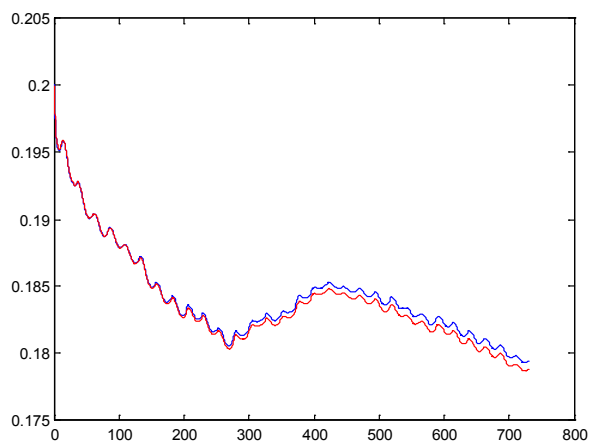


Modelo NEst

Modelo PEst

---  $z=3\text{m}$  ---  $z=1,5\text{ m}$  ---  $z=0,1\text{m}$

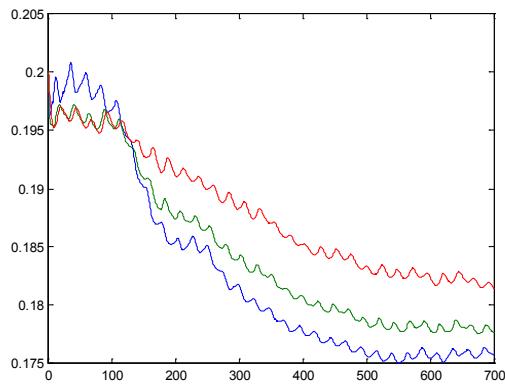
### Humedad promedio del lecho vs. tiempo



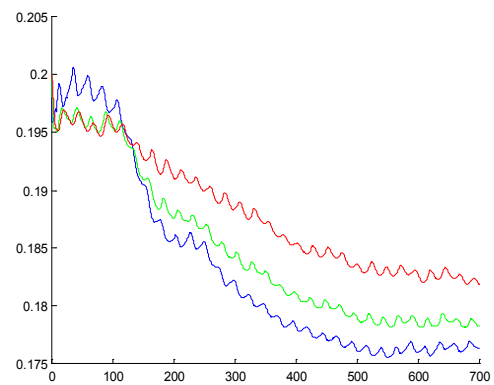
--- NEst --- PsEst

## Junio Río Cuarto.

Humedad del sólido vs. tiempo a distintas alturas de lecho



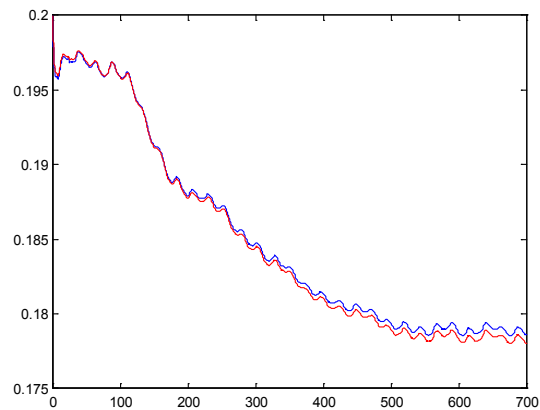
Modelo NEst



Modelo PsEst

---  $z=3\text{m}$  ---  $z=1,5\text{ m}$  ---  $z=0,1\text{m}$

Humedad promedio del lecho vs. tiempo.



--- NEst --- PsEst