

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**MODELO GENERAL DEL TIEMPO DE SECADO
APLICADO A FRUTAS TROPICALES**

TESIS

**PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

POR:

MAX MAURICIO LETONA GALDÁMEZ

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, MAYO 1999

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR



Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**MODELO GENERAL DEL TIEMPO DE SECADO
APLICADO A FRUTAS TROPICALES.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química, con fecha de 8 de agosto de 1998.

Max Mauricio Letona Galdámez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1o	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL 2o	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
VOCAL 3o	Ing. Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana
VOCAL 4o	Br. Dimas Alfredo Carranza Barrera
VOCAL 5o	Br. José Enrique López Barrios
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Héctor Adolfo Ruiz Godoy
EXAMINADOR	Ing. Julio Alberto Rivera Palacios
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

Guatemala, 30 de octubre de 1998

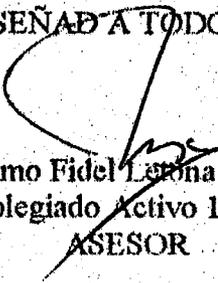
Sr. Director
Julio Chávez Montúfar
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Su Despacho

Señor Director

Me permito sugerir para su aprobación el trabajo de tesis titulado **Modelo General del Tiempo de Secado Aplicado a Frutas Tropicales**, desarrollado por el estudiante Max Mauricio Letona Galdámez. Considero que el trabajo llena los objetivos propuestos en el anteproyecto de tesis.

Atentamente

ID Y ENSEÑAR A TODOS


Ing. Máximo Fidel Letona Estrada
Colegiado Activo 149
ASESOR



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 20 de enero de 1,999.

Ingeniero
Otto de León
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero de León.

Por medio de la presente hago de su conocimiento, que he revisado el Informe Final de Tesis titulado: **MODELO GENERAL DEL TIEMPO DE SECADO APLICADO A FRUTAS TROPICALES** del estudiante **Max Mauricio Letona Galdámez**, de la cual dejo constancia de mi aprobación, para proceder a la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular y agradeciéndole la atención que se sirva dar a la presente, le saluda.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Qco. José Eduardo Calderón García
Colegiado No. 244

REVISOR



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química; Ingeniero Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante Max Mauricio Letona Galdamez, titulado: **MODELO GENERAL DEL TIEMPO DE SECADO APLICADO A FRUTAS TROPICALES**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Raúl de León de Paz
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 4 de mayo de 1,999.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de tesis titulado: **MODELO GENERAL DEL TIEMPO DE SECADO APLICADO A FRUTAS TROPICALES** del estudiante **Max Mauricio Letona Galdámez**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera
DECANO EN FUNCIONES



Guatemala, 4 de mayo de 1,999.

ACTO QUE DEDICO

A MIS PADRES

Máximo Fidel Letona Estrada.

Ana Virginia Galdámez de Letona.

Por su abnegación, amor, apoyo y comprensión.

A MIS HERMANOS

**Rodrigo Alfonso, Eduardo José y Gabriel Alfredo, por
su comprensión cariño y amistad.**

A MI NOVIA

Ana Lucía. Con mucho cariño.

A MIS TIOS Y PRIMOS

Con mucho cariño y respeto.

A LA FAMILIA

Espinosa Orantes, por su amistad.

Y A USTED

Con todo respeto.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES	ii
GLOSARIO	vii
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN	x
1. ANTECEDENTES	01
2. RESULTADOS	04
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	06
CONCLUSIONES	11
RECOMENDACIONES	12
BIBLIOGRAFÍA	13
ANEXO	14
Curvas de secado	15
Datos originales	36
Datos calculados	40
Cálculo de muestra	52

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

No.	Título	pág.
01	Esquematación de las etapas por las que pasa un alimento en un proceso de secado industrial.	11
02	Curvas típicas de secado para un material.	13
03	Método gráfico para determinar la temperatura de la superficie de secado.	57

GRÁFICAS

No.	Título	pág.
01	Peso de la muestra en función del tiempo de secado para un grosor de capa de 11.75 mm.	19
02	Peso de la muestra en función del tiempo de secado para un grosor de capa de 8.05 mm.	20
03	Peso de la muestra en función del tiempo de secado para un grosor de capa de 10.0 mm.	21

04	Peso de la muestra en función del tiempo de secado para un grosor de capa de 9.0 mm.	22
05	Peso de la muestra en función del tiempo de secado para un grosor de capa de 5.0 mm.	23
06	Humedad libre en función del tiempo de secado para un grosor de muestra de 11.75 mm.	24
07	Humedad libre en función del tiempo de secado para un grosor de muestra de 8.05 mm.	25
08	Humedad libre en función del tiempo de secado para un grosor de muestra de 10.0 mm.	26
09	Humedad libre en función del tiempo de secado para un grosor de muestra de 9.0 mm.	27
10	Humedad libre en función del tiempo de secado para un grosor de muestra de 5.0 mm.	28
11	Velocidad de secado en función de la humedad libre para un grosor de capa de 11.75 mm.	29
12	Velocidad de secado en función de la humedad libre para un grosor de capa de 8.05 mm.	30
13	Velocidad de secado en función de la humedad libre para un grosor de capa de 10.0 mm.	31
14	Velocidad de secado en función de la humedad libre para un grosor de capa de 9.0 mm.	32

15	Velocidad de secado en función de la humedad libre para un grosor de capa de 5.0 mm.	33
16	Velocidad de secado en función del tiempo para un grosor de capa de 11.75 mm.	34
17	Velocidad de secado en función del tiempo para un grosor de capa de 8.05 mm.	35
18	Velocidad de secado en función del tiempo para un grosor de capa de 10.0 mm.	36
19	Velocidad de secado en función del tiempo para un grosor de capa de 9.0 mm.	37
20	Velocidad de secado en función del tiempo para un grosor de capa de 5.0 mm.	38
21	Coefficiente de transferencia de calor en función de la relación peso-área.	39

TABLAS

No.	Título	pág.
I	Ecuaciones del tiempo de secado en la etapa de secado constante en función de la relación peso-área y del espesor de las muestras.	04
II	Coefficiente de transferencia de calor (h) en función de la relación peso-área y espesor de las muestras analizadas.	05
III	Características iniciales de las muestras.	36
IV	Variación del peso de las muestras a través del tiempo de secado.	36
V	Humedad del medio de secado a 50°C a través del tiempo.	38
VI	Humedad absoluta de las muestras a través del tiempo de secado.	40
VII	Humedad al equilibrio de las muestras a las condiciones de secado.	41
VIII	Humedad libre de las muestras a través del tiempo de secado.	42
IX	Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del tiempo de secado para un grosor de capa de 11.75 mm.	43

X	Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del tiempo de secado para un grosor de capa de 8.05 mm.	45
XI	Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del tiempo de secado para un grosor de capa de 10.0 mm.	46
XII	Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del tiempo de secado para un grosor de capa de 9.0 mm.	48
XIII	Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del tiempo de secado para un grosor de capa de 5.0 mm.	49
XIV	Velocidad de secado en la etapa de secado constante y coeficiente de transferencia de calor en función del la relación peso-área para las muestras analizadas.	51

GLOSARIO

Base de peso húmedo

Expresa la cantidad de agua de un material como porcentaje del peso de sólido mojado.

Base de peso seco

Expresión de contenido de humedad de sólidos mojados en kilogramos de agua por kilogramos de sólidos completamente secos.

Contenido crítico de humedad

Contenido de humedad promedio cuando concluye el periodo de velocidad constante.

Contenido de humedad de equilibrio

Humedad limitante a la cual un material dado se puede desecar en condiciones específicas de temperatura y humedad del aire.

Distribución inicial de la humedad

Distribución de humedad en todo un sólido al iniciarse el proceso de secado.

Gradiente de humedad

Distribución de agua dentro de un sólido en un momento determinado del proceso de secado.

Humedad libre

Líquido que se puede separar a una temperatura y humedad del medio de secado. Este valor llega a incluir tanto la humedad ocluida como la no ocluida.

Humedad ocluida

Líquido que se encuentra en un sólido y que ejerce una presión de vapor inferior a la del líquido puro, a una temperatura dada. El líquido puede quedar ocluido por retención en capilares diminutos, por solución en celdas o paredes fibrosas, por solución homogénea a lo largo del sólido y por adsorción química o física en las paredes del sólido.

Material higroscópico

Material que puede contener humedad ocluida.

Periodo de velocidad constante

Lapso de desecado durante el cual la velocidad de eliminación de agua por unidad de superficie desecada es constante o uniforme.

Periodo de velocidad decreciente

Lapso de desecación en el cual la velocidad instantánea de desecado disminuye en forma continua.

RESUMEN

Para la determinación de un modelo de análisis en el secado de fruta a nivel industrial se llevó a cabo la deshidratación de piña. Dicho modelo permite calcular los tiempos de secado necesarios para la deshidratación de la piña en el período de velocidad de secado constante. Además, se determinaron las curvas de secado para la piña con una velocidad de aire fija y con una temperatura de 50 °C del medio de secado, en este caso aire, en un secador de bandejas.

Las ecuaciones obtenidas para el tiempo de secado no pueden considerarse en cuanto al tiempo necesario al que debe secarse una muestra. Pues, éstas son válidas únicamente en la etapa de secado constante y no guardan ninguna relación con las otras etapas de secado. Para determinar el tiempo óptimo de secado deberá recurrirse a las curvas de secado del material a las condiciones del proceso. En este caso, se determinó que la muestra que representa un menor tiempo de secado es la que tiene un grosor de 5.0 mm.

INTRODUCCIÓN

El proceso de secado se lleva a cabo desde hace miles de años. El propósito principal del secado, en el caso específico de los alimentos, es el de preservarlos de la manera más natural posible. El secado conlleva deshidratación en los alimentos, los cuales al no tener un contenido de humedad significativo inhiben el crecimiento bacteriano. Los alimentos deshidratados adecuadamente pueden durar meses sin que su almacenamiento en refrigeración sea necesario.

La mayoría de alimentos pueden deshidratarse, y las frutas y los vegetales son los más populares para este propósito. Para llevar a cabo un secado óptimo, deben tomarse en cuenta dos factores: la calidad del alimento y el proceso de secado en sí. Es necesario conocer el proceso de secado para así determinar las condiciones óptimas de operación.

La caracterización del proceso de secado se lleva a cabo mediante curvas que relacionan las variables: contenido de humedad, tiempo y velocidad de secado. Además, existen relaciones matemáticas que permiten establecer la manera en que otros factores afectan el proceso, siendo estos: la velocidad y temperatura del medio de secado y el área del material a secar.

El presente trabajo se centra en el secado de una fruta tropical, en este caso piña, en un secador de bandejas con una velocidad de aire fija. El propósito es establecer las curvas de secado de este material y a través de las debidas relaciones matemáticas establecer el respectivo coeficiente de transferencia de calor para el período de velocidad de secado constante. Dicho coeficiente

permitirá conocer los tiempos óptimos de secado dentro de un rango de humedad determinado.

Se presenta un modelo de análisis que puede aplicarse a cualquier proceso de secado y que puede optimizar el proceso de secado de piña a nivel industrial. Para tal efecto se presentan las diferentes curvas de secado de la piña a condiciones fijas de temperatura y velocidad del medio de secado, así como la ecuación del tiempo de secado para la piña en la etapa de secado constante.

Todo este análisis sirve para comprobar que la velocidad de secado de un material en la etapa de secado constante determina el tiempo necesario para este proceso.

1. ANTECEDENTES

El secado es un proceso de amplio uso en la industria nacional y extranjera. Es necesario conocer este proceso para que el mismo se lleve a cabo eficientemente. La mayoría de trabajos que hasta la fecha se han llevado a cabo en la Escuela de Ingeniería Química sobre este tema, se limitan al análisis de curvas que relacionan el contenido de humedad como función del tiempo. Dentro de estos trabajos pueden mencionarse los siguientes:

1. Maaz Och. **Deshidratación de zanahoria por el método de aire forzado en un secador de gabinete.** Tesis. USAC, 1995.
2. Espinoza Nájera, Carlos Humberto. **Deshidratación de papa.** Tesis. USAC, 1972.
3. Cáceres Cifuentes, Jorge Antonio. **Deshidratación de frutas tropicales por el método de aire forzado y vacío.** Tesis. USAC, 1976.

Se debe determinar el contenido de humedad crítico para las condiciones del proceso, ya que este parámetro cuantificará la cantidad de agua que será imposible remover en las condiciones del proceso. Además, es necesario establecer la relación de velocidad de secado respecto a la humedad libre, ya que esta curva permite un mejor análisis del proceso, diferenciando cada una de las etapas de secado.

También, se han llevado a cabo estudios para la obtención de títulos de maestría y doctorado en el área de secado de alimentos. Dentro de los trabajos revisados que contienen información relacionada con el presente proyecto se encuentran:

1. **Maté, Juan. Effects of Structural Changes During Processing on Textural Quality of Dried Food Products.** PhD-projects of the OSPT-1996. Sponsor Wageningen Agricultural University.
2. **Willenberg, Barbara. Quality for Keeps: Food Preservation - How to Use Dried Foods.** M.S. Department of Food Science and Human Nutrition, University of Missouri-Columbia. Human Environmental Science Publication GH1564. Reviewed October 1993.

Existe una serie de artículos y libros publicados que también tratan sobre este importante proceso:

1. **Templeton, Ellen. Selection Features of Electric Food Dehydrators.** University of Florida, 1981.
2. **Taylor, Sandra. Drying Foods in Coastal Florida.** The National Food Safety Database. Home Economics Department, Florida Cooperative Extension Service, University of Florida. Publication date: June 1983. Revised: April 1995.
3. **Geankoplis, Christie. Procesos de transporte y operaciones unitarias.** Segunda edición. Editorial Cecsa, 1995. Mexico DF, México. Pp.435-486.

4. Perry. **Manual del Ingeniero Químico**. Sexta edición. Tomo V. Editorial McGraw Hill, 1993. México DF, México. Pp. 20-4 a 20-26.

5. The Chase Data group. **Questions on Dehydration**. 1998.

http://www.chasedata.com/storage/dehydrate_what.html

2. RESULTADOS

1.

Tabla I

Ecuaciones del tiempo de secado para la etapa de secado constante en función de la relación peso-área y del espesor de las muestras.

Muestra	Relación peso sólido seco - área	Espesor de la muestra (mm)	Ecuación del tiempo de secado*
1	0.8302	11.75	$t=2.5568(X_1-X_2)$
2	0.5635	8.05	$t=2.2579(X_1-X_2)$
3	0.7580	10.0	$t=2.4049(X_1-X_2)$
4	0.6061	9.0	$t=2.3107(X_1-X_2)$
5	0.4630	5.0	$t=3.0993(X_1-X_2)$

* donde: t = tiempo de secado (hr)

X_1 =humedad inicial (Kg H₂O/Kg sólido seco)

X_2 =humedad final (Kg H₂O/Kg sólido seco)

2. Las curvas de secado para la piña a 50 °C y velocidad de aire fija, para cada una de las diferentes muestras con las que se trabajó se encuentran en la sección de curvas de secado del Anexo (p. 15-34).

3.

Tabla II
Coefficiente de transferencia de calor (h) en función de la relación
peso-área y espesor de las muestras analizadas*

Muestra	Relación peso sólido seco-área (Kg/m ²)	Grueso capa (mm)	h (KJ/hr*K*m ²)
1	0.8302	11.75	74.77
2	0.5635	8.05	57.47
3	0.7580	10.0	72.58
4	0.6061	9.0	60.40
5	0.4630	5.0	34.40

*Ver gráfica en página 35.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el proceso de secado de fruta influyen una serie de factores que determinan la rapidez de secado y la calidad del producto. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que los alimentos contienen sustancias termolábiles y que generalmente existen limitaciones en cuanto a las condiciones de secado. En la figura 1 pueden observarse las etapas de este proceso.

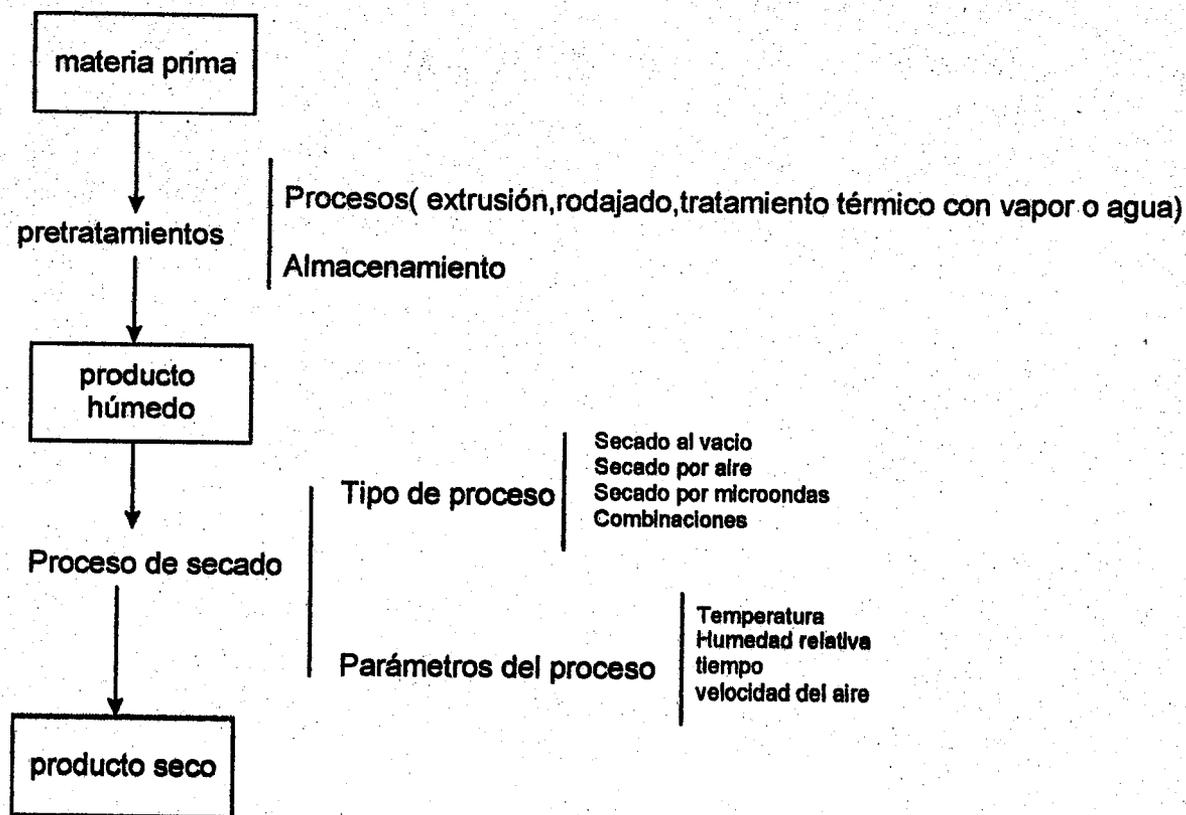


Figura No. 1: Esquematización de las etapas por las que pasa un alimento en un proceso de secado industrial.

Los pretratamientos que se utilizan en los alimentos tienen el propósito de acondicionarlos para el proceso de secado. Esto se hace con el fin de tener una buena presentación en el producto final. En el caso de los tratamientos térmicos, estos se llevan a cabo exponiendo el alimento a agua caliente o vapor por determinado tiempo, desnaturalizando enzimas que causan que, tanto las frutas como los vegetales adquieran un color oscuro en el proceso de secado.

Debido a las limitaciones que tienen ciertos alimentos en cuanto a la temperatura a la cual deben secarse, debe escogerse una temperatura que minimice el cambio de las propiedades nutricionales del producto. Para el caso de la piña se trabajó con una temperatura de 50 °C .

Para llevar a cabo la recopilación de datos se pusieron diferentes muestras de piña, pelada y rodajada, a secar en un secador de bandejas. Cada una de las muestras con las que se trabajó poseía un arreglo geométrico diferente (Ver tabla No. 3, p. 36). El secador que se utilizó fue un secador Cramer de 13 bandejas el cual trabaja con flujo de aire constante, suministrado por un ventilador que maneja 960 CFM a 1030 RPM.

Con los diferentes datos obtenidos durante el proceso, se elaboraron las diferentes curvas de secado para la piña. Las curvas que se encuentran en la sección Anexos (p. 15-34) son:

1. peso de la muestra en función del tiempo,
2. humedad libre de la muestra en función del tiempo,
3. velocidad de secado en función del tiempo; y
4. velocidad de secado en función de la humedad libre de la muestra.

El comportamiento teórico de estas relaciones puede observarse en la figura No. 2. Éste no difiere considerablemente del obtenido con los datos de secado, los cuales al ser manipulados debidamente permiten conocer el coeficiente de transferencia de calor y la ecuación del tiempo de secado en la etapa de secado constante.

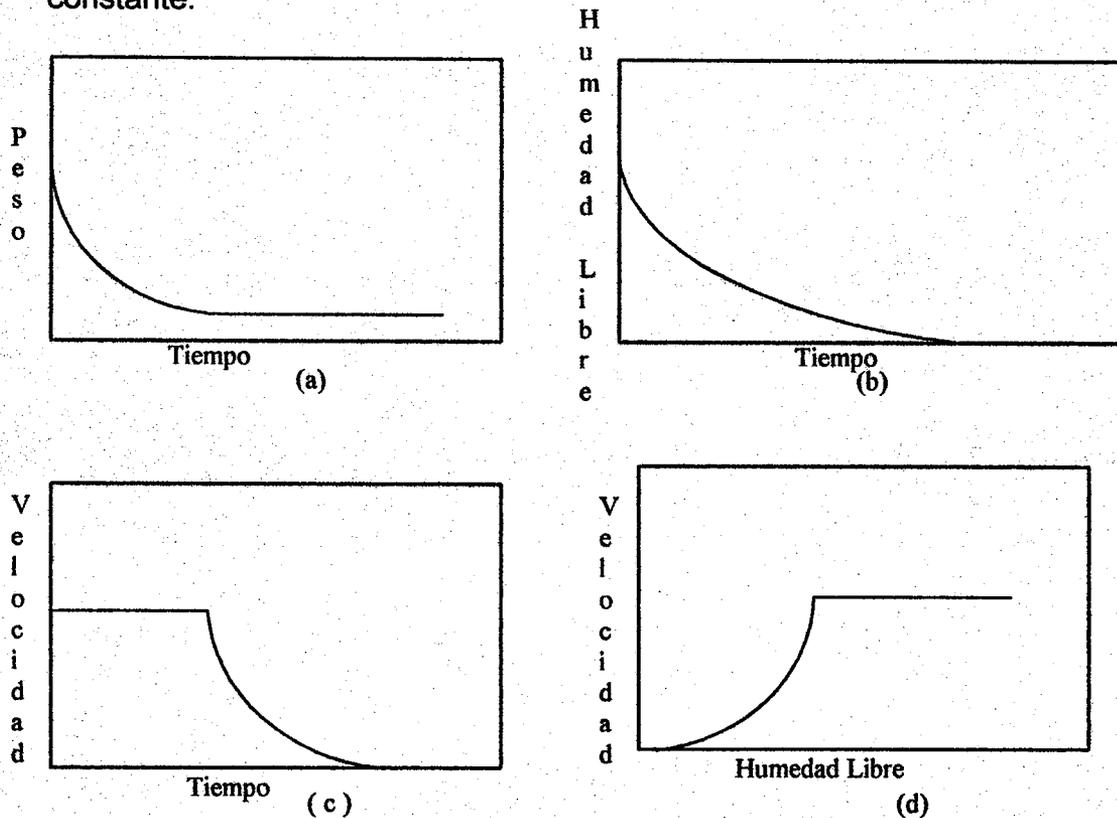


Figura No. 2 Curvas típicas de secado para un material. (a) gráfica del peso del sólido húmedo en función del tiempo. (b) gráfica de la humedad libre del sólido en función del tiempo. (c) gráfica de la velocidad de secado en función del tiempo. (d) gráfica de la velocidad de secado en función de la humedad libre.

En la etapa de velocidad de secado constante, la superficie del sólido que se encuentra en contacto con el medio de secado, se encuentra húmeda. En las gráficas que relacionan la velocidad de secado con la humedad libre (cantidad de agua que puede ser removida en un proceso de secado por unidad de sólido

seco) y con el tiempo de secado, puede observarse una etapa en la que la velocidad de secado permanece relativamente constante. Puede decirse pues, que esta etapa es el período de velocidad constante. El hecho de que el valor de la velocidad no haya sido constante para todo el proceso se debe a que, la velocidad de evaporación de la humedad bajo ciertas condiciones de aire, es independiente del tipo de sólido y es casi igual a la evaporación de líquido puro bajo las mismas condiciones. Sin embargo, la porosidad e irregularidades de la superficie del sólido pueden afectar el valor de la velocidad.

Aún teniendo las variaciones en la velocidad de secado, fue posible determinar una etapa de secado en la que la velocidad permaneció relativamente constante, obteniéndose así los valores de la tabla No. 14 (p. 51).

El hecho de que exista una etapa de velocidad de secado constante se debe a que existe un momento en el secado en el que el sólido está tan mojado, que el secado se lleva a cabo como que si este no existiera. Este fenómeno es el mismo que ocurre cuando se determina la temperatura de bulbo húmedo, en que la evaporación del líquido es constante.

El secado de un material cualquiera ocurre por transferencia de masa del vapor de agua en la superficie del material (la cual está saturada) a través de una película de aire hasta que llega al ambiente circundante. La velocidad del movimiento de agua dentro del sólido en la etapa de secado constante permite que la superficie se mantenga saturada. La velocidad a la cual se elimina el vapor de la superficie del sólido, se encuentra controlada por la velocidad de transferencia de calor, hasta la superficie de evaporación, que suministra el calor latente de evaporación del líquido. Cuando se opera en estado estable, la velocidad de transferencia de masa es equivalente a la velocidad de transferencia de calor. Esta es la razón por la que es útil conocer el coeficiente de

transferencia de calor, ya que éste se relaciona directamente con la transferencia de masa que ocurre en un proceso de secado estable.

Para determinar las ecuaciones del tiempo de secado, se determinó la temperatura de superficie del sólido. Para su determinación se escogió un método de iteración gráfica utilizando la carta psicométrica, el cual puede verse en la sección del cálculo de muestra del anexo (p. 53).

Las ecuaciones del tiempo de secado para la etapa de velocidad constante, obtenidas para cada una de las muestras, determinan que la muestra en la cual

ocurre un secado en menor tiempo en esta etapa es la que posee un espesor de 8.05 mm. Sin embargo de las curvas de secado es obvio que la muestra que se deshidrata más rápidamente es la que posee un espesor de 5.0 mm. Esto se debe a que las ecuaciones de tiempo que se obtuvieron son únicamente para determinar tiempos dentro de la etapa de secado constante y no pueden predecir tiempos totales de secado, por lo menos en cuanto a la piña se refiere.

En la gráfica No. 21 (p. 35) se encuentra la dependencia que se determinó entre la relación peso de sólido seco-área y el coeficiente de transferencia de calor para la piña. Sin embargo, no se puede llegar a una conclusión sobre esta relación ya que las muestras analizadas todas tuvieron diferentes espesores. Para poder llevar a cabo una conclusión sobre esta relación se deben hacer varias pruebas con los mismos espesores y comprobar si esta relación se mantiene. Por lo tanto, esta relación no puede ser utilizada como un parámetro confiable en el cálculo de datos de secado para la piña.

CONCLUSIONES

1. El espesor óptimo de la piña para su deshidratación en un secador de bandejas a una temperatura de 50°C y velocidad de aire constante es de 5.0 mm.
2. En el caso de la piña, la ecuación del tiempo de secado para la etapa de velocidad de secado constante, no puede utilizarse para determinar tiempos óptimos de secado, en su lugar debe recurrirse a las curvas de secado que relacionan humedad libre con tiempo de secado.

RECOMENDACIONES

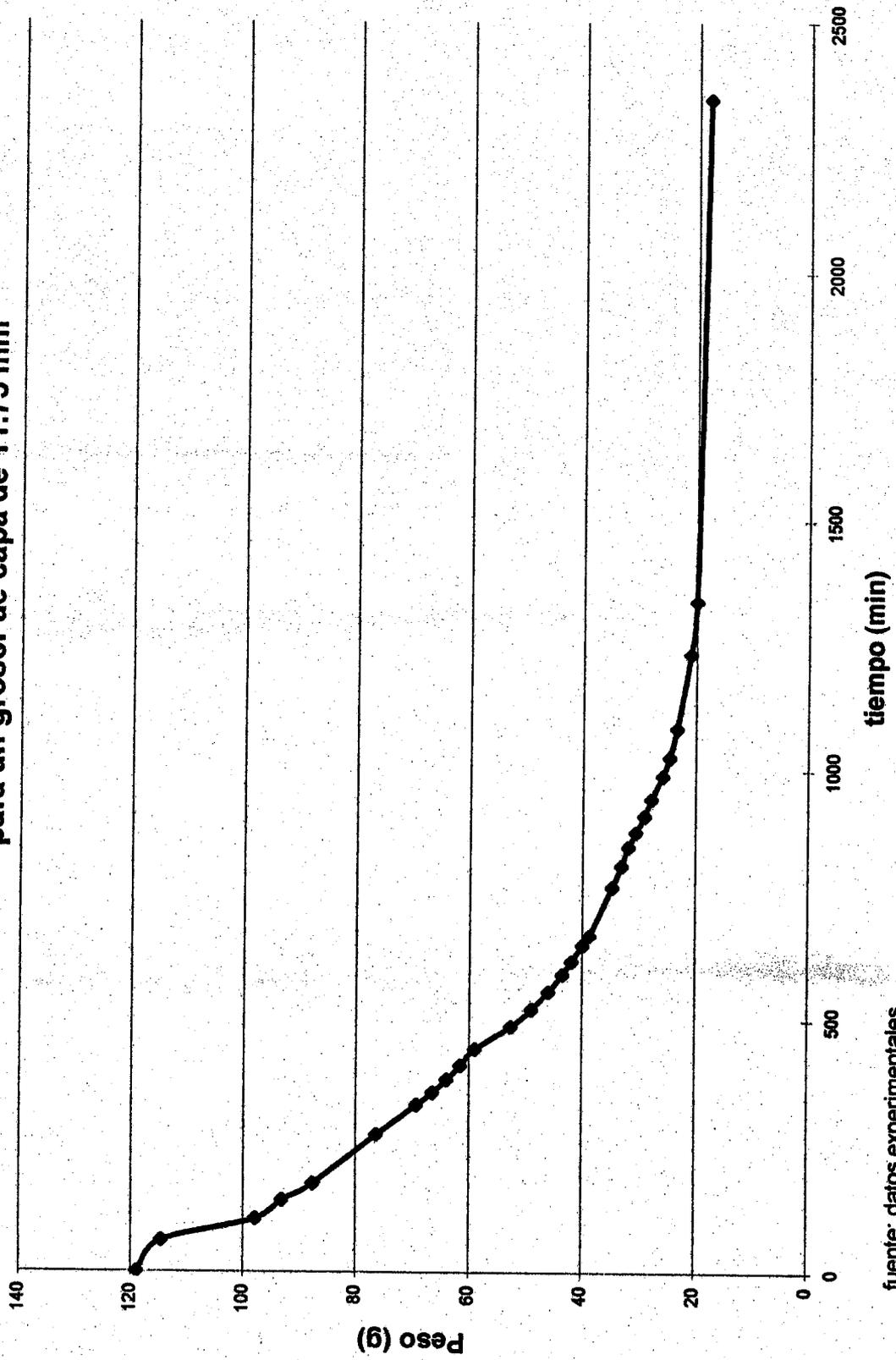
1. Llevar a cabo estudios que determinen la adaptabilidad de la ecuación del tiempo de secado en la etapa de secado constante para determinar tiempos de secado para otro tipo de frutas y vegetales.
2. Es posible planificar prácticas de secado con el mismo grosor de capa y diferentes relaciones de peso-área y así determinar con confianza la relación entre esta última y el coeficiente de transferencia de calor.

BIBLIOGRAFÍA

1. Geankoplis, Christie. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. Traducido por Jorge Rodríguez González. Segunda edición. Editorial Cecsca, 1995. México DF, México. Pp. 435-486.
2. Maté, Juan. **Effects of structural changes during processing on textural quality of dried food products**. PhD-projects of the OSPT-1996. Sponsor Wageningen Agricultural University.
3. Perry, Robert. **Manual del ingeniero químico**. Traducido por Fernando Corral. Sexta edición. Tomo V. Editorial McGraw Hill, 1993. México DF, México. Pp 20-4 a 20-26.
4. Taylor, Sandra. **Drying foods in coastal Florida**. The National Food safety Database. Home Economics Department, Florida Cooperative Extension Service, University of Florida. Publication date: June 1983. Reised: April 1995.
5. Templeton, Ellen. **Selection features of electric food dehydrators**. University of Florida, 1981.
6. The Chase Data Group. **Questions on dehydration**. 1998.
http://www.chasedata.com/storage/dehydrate_what.html
7. Willenberg, Barbara. **Quality for keeps: food preservation-How to use dried foods**. M.S. Department of food science and human nutrition, University of Missouri-Columbia. Human Enviromental Science Publication GH1564-
Reviewed October 1993.

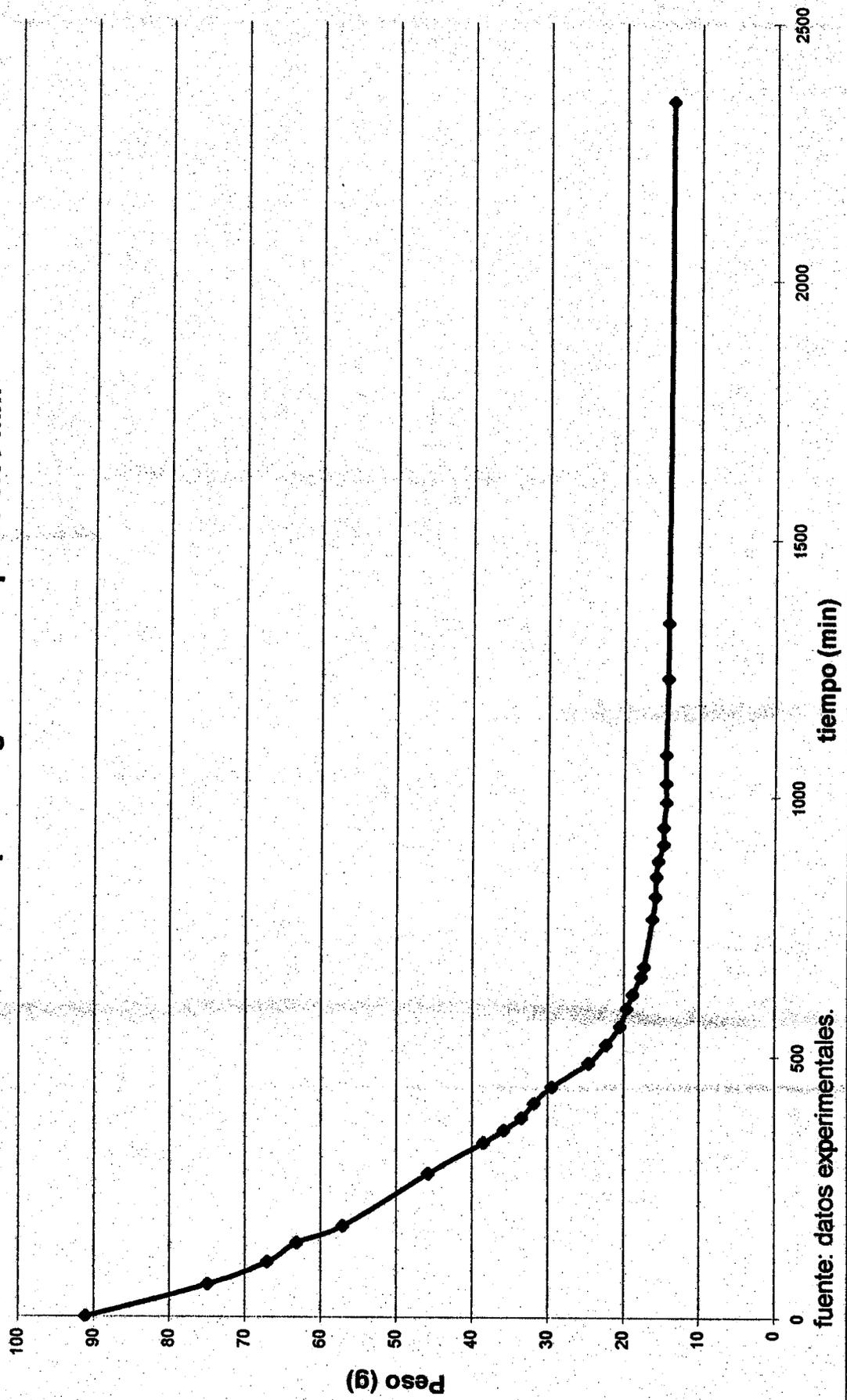
ANEXOS

Gráfica No. 1
Peso de la muestra en función del tiempo de secado
para un grosor de capa de 11.75 mm

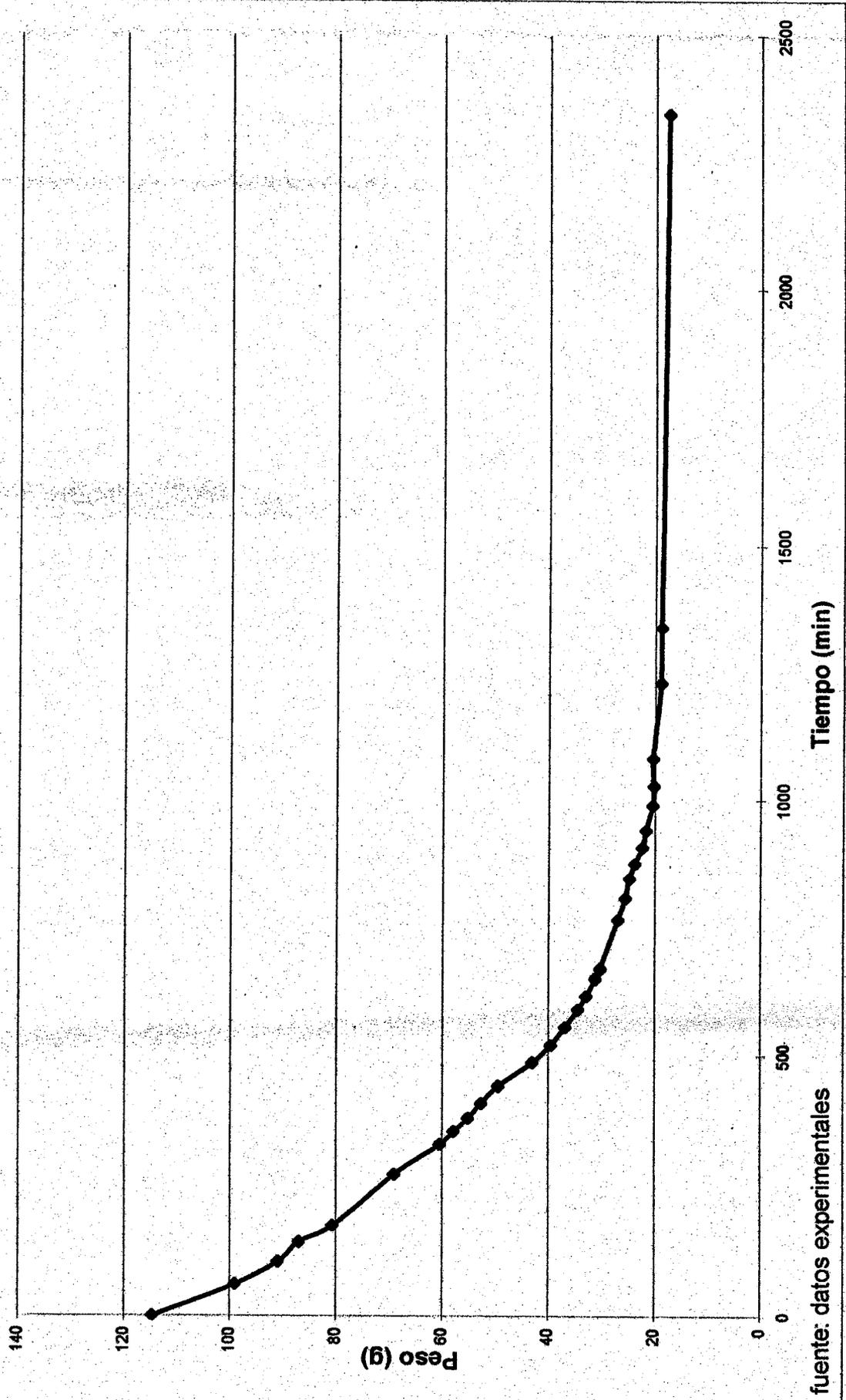


fuelle: datos experimentales.

Gráfica No. 2
Peso de la muestra en función del tiempo de secado
para un grosor de capa de 8.05 mm

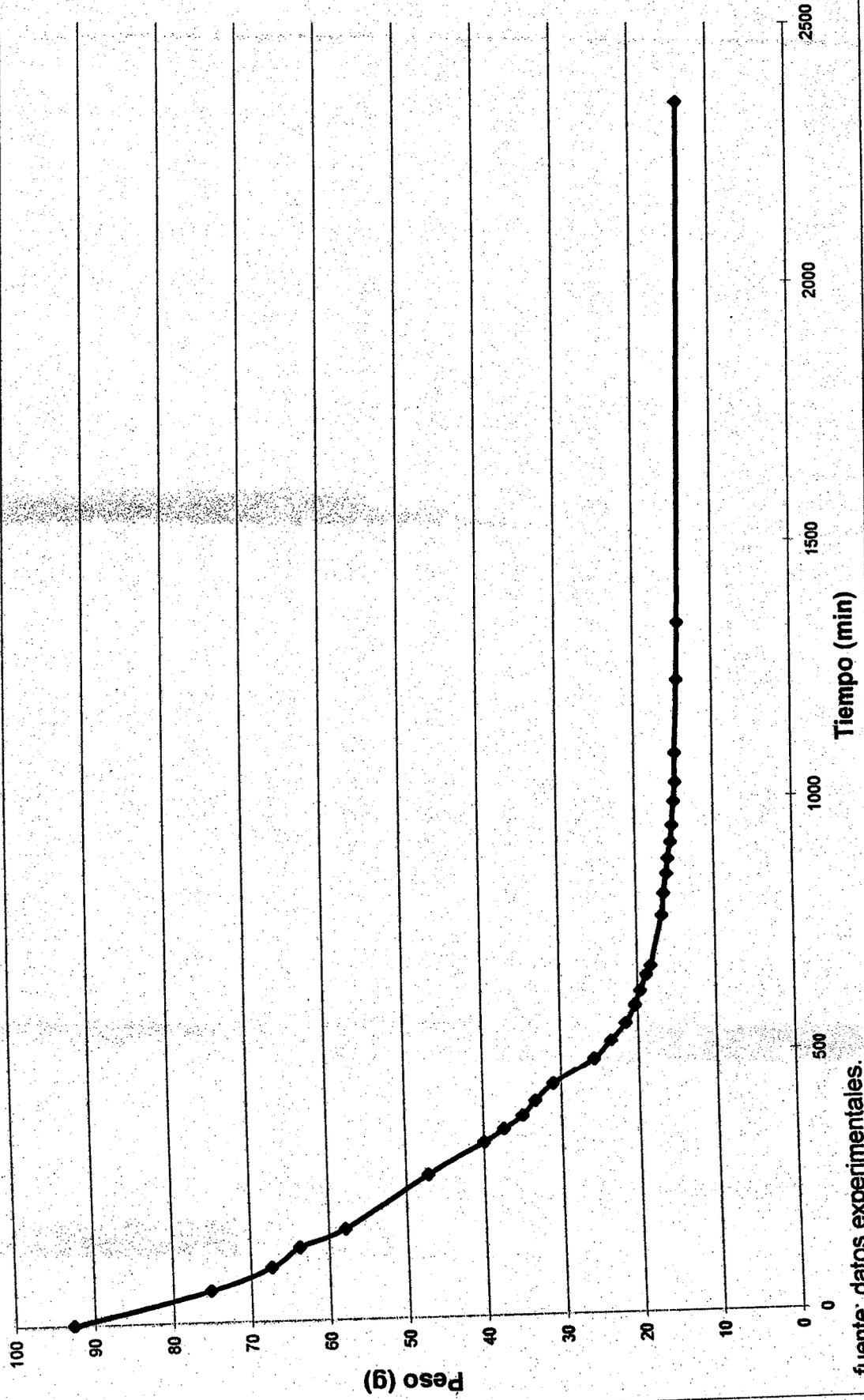


Gráfica No. 3
Peso de la muestra en función del tiempo de secado
para un grosor de capa de 10.0 mm



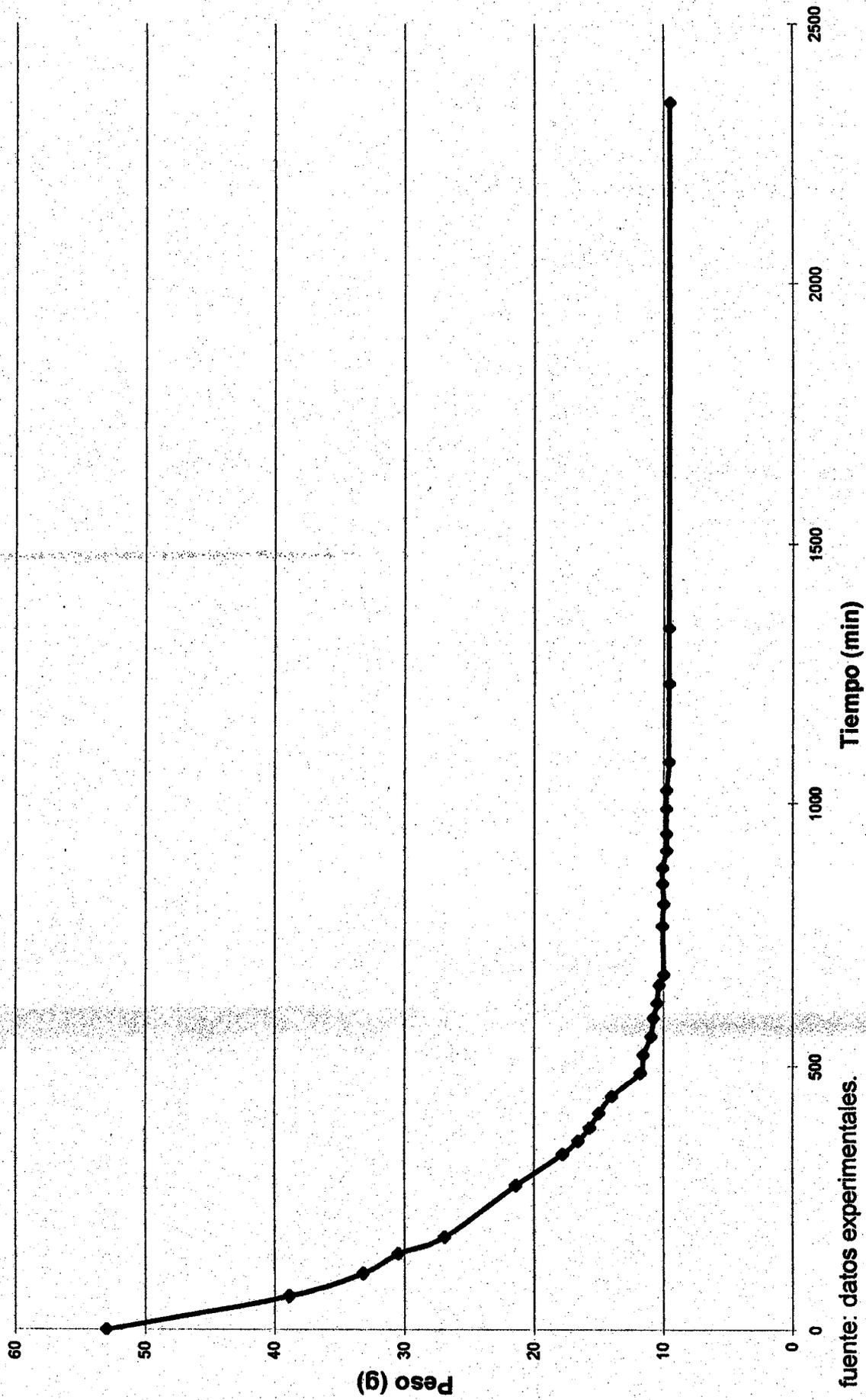
fuelle: datos experimentales

Gráfica No. 4
Peso de la muestra en función del tiempo de secado
para un grosor de capa de 9.0 mm



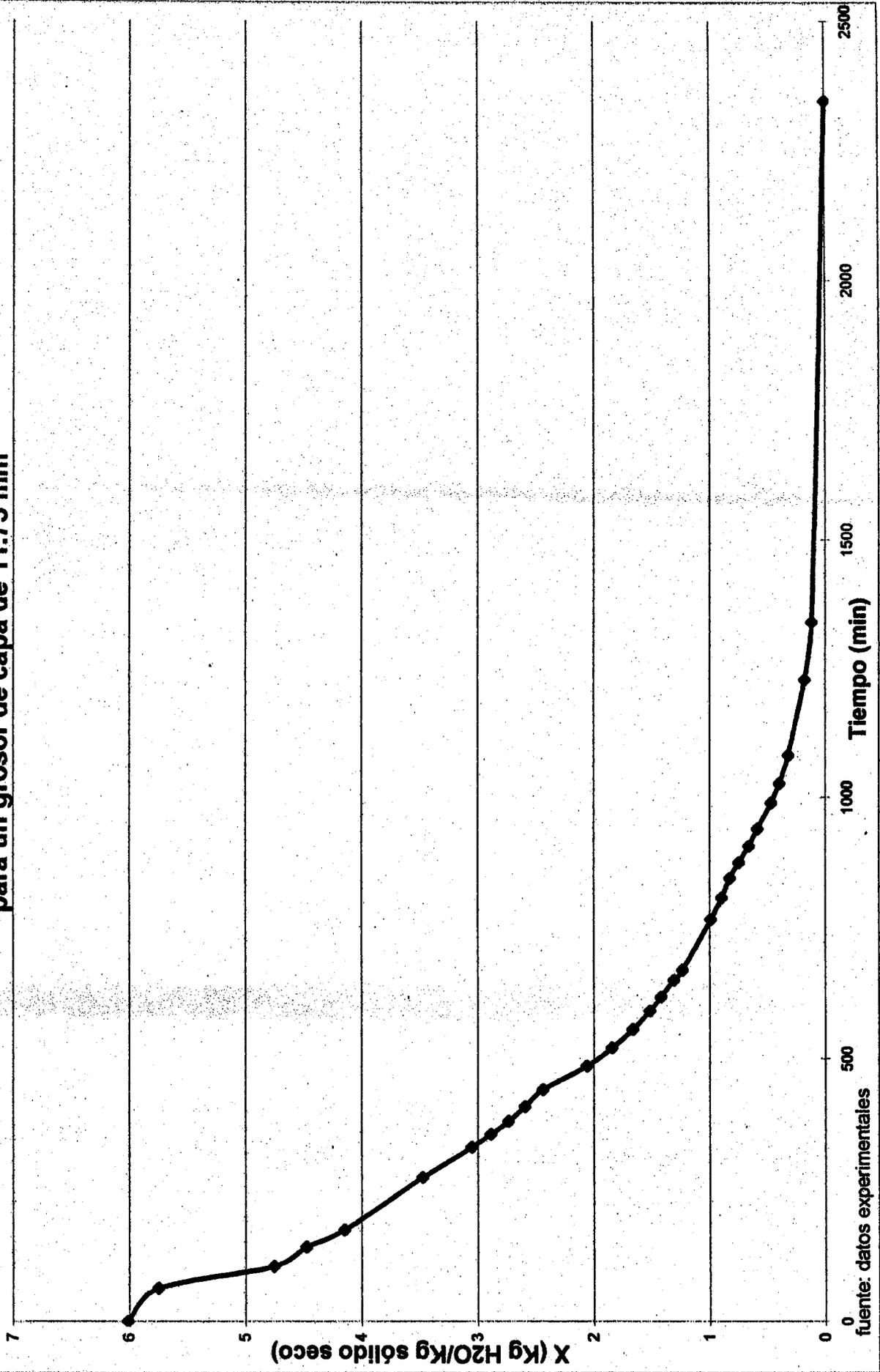
fuentes: datos experimentales.

Gráfica No. 5
Peso de la muestra en función del tiempo de secado
para un grosor de capa de 5.0 mm



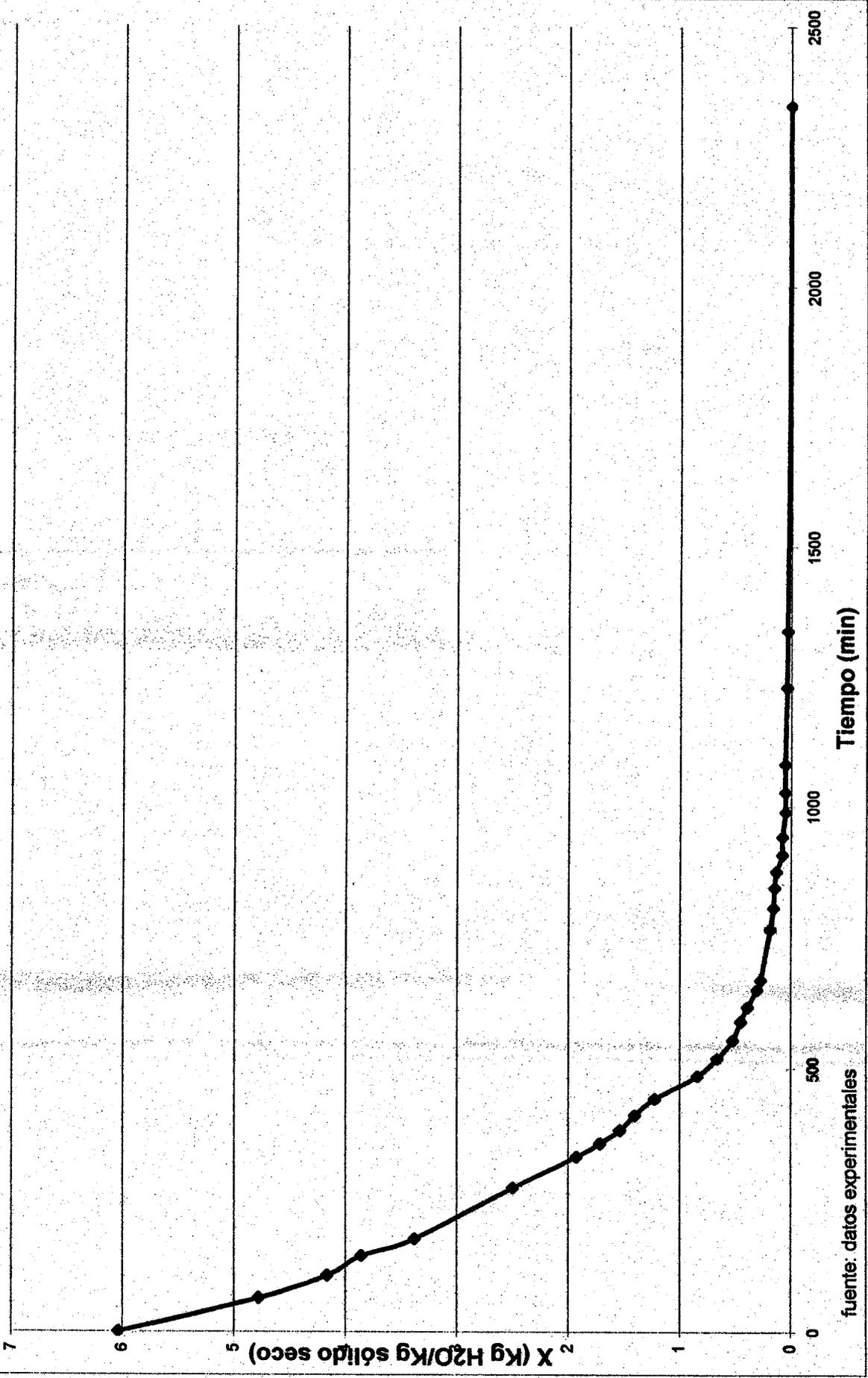
fuelle: datos experimentales.

Gráfica No. 6
Humedad libre en función del tiempo de secado
para un grosor de capa de 11.75 mm



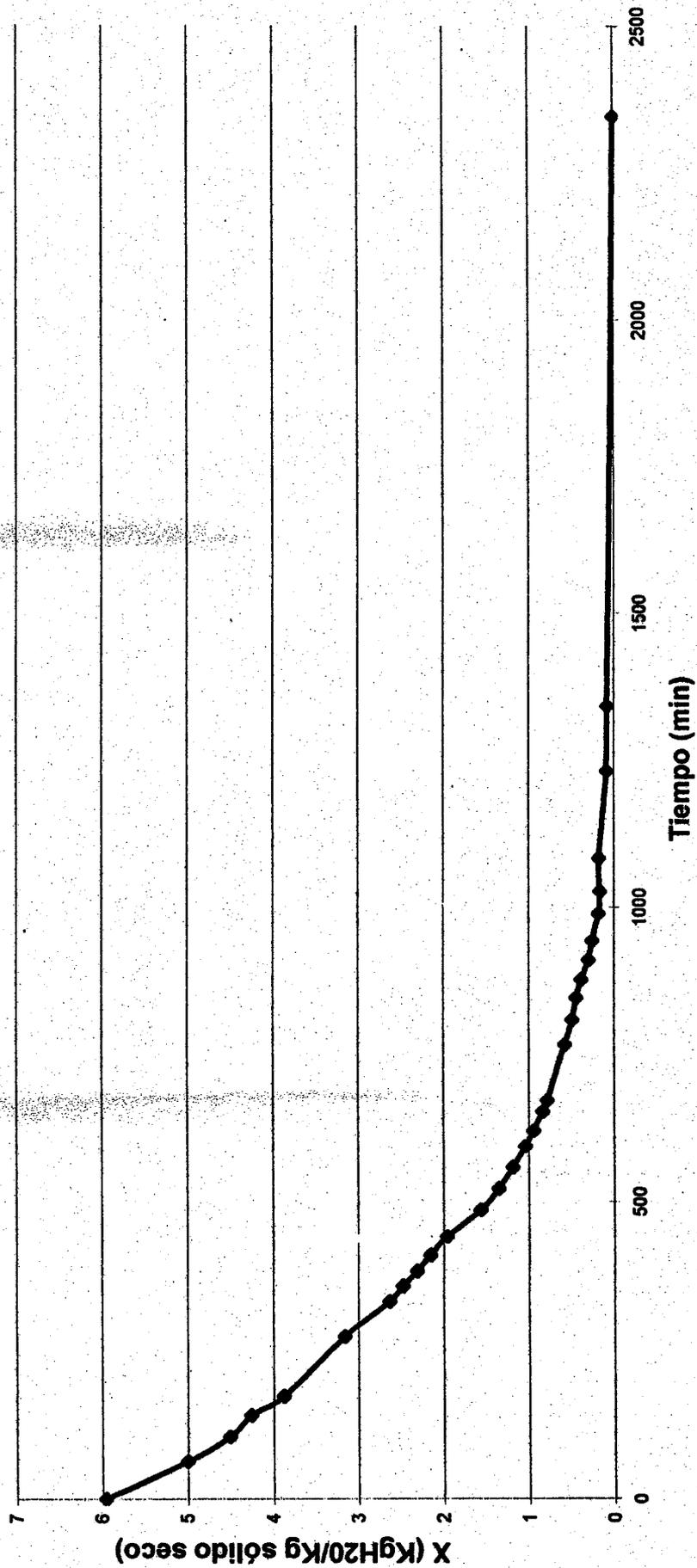
fuelle: datos experimentales

Gráfica No. 7
Humedad libre de la muestra en función del tiempo de secado
para un grosor de capa de 8.05 mm



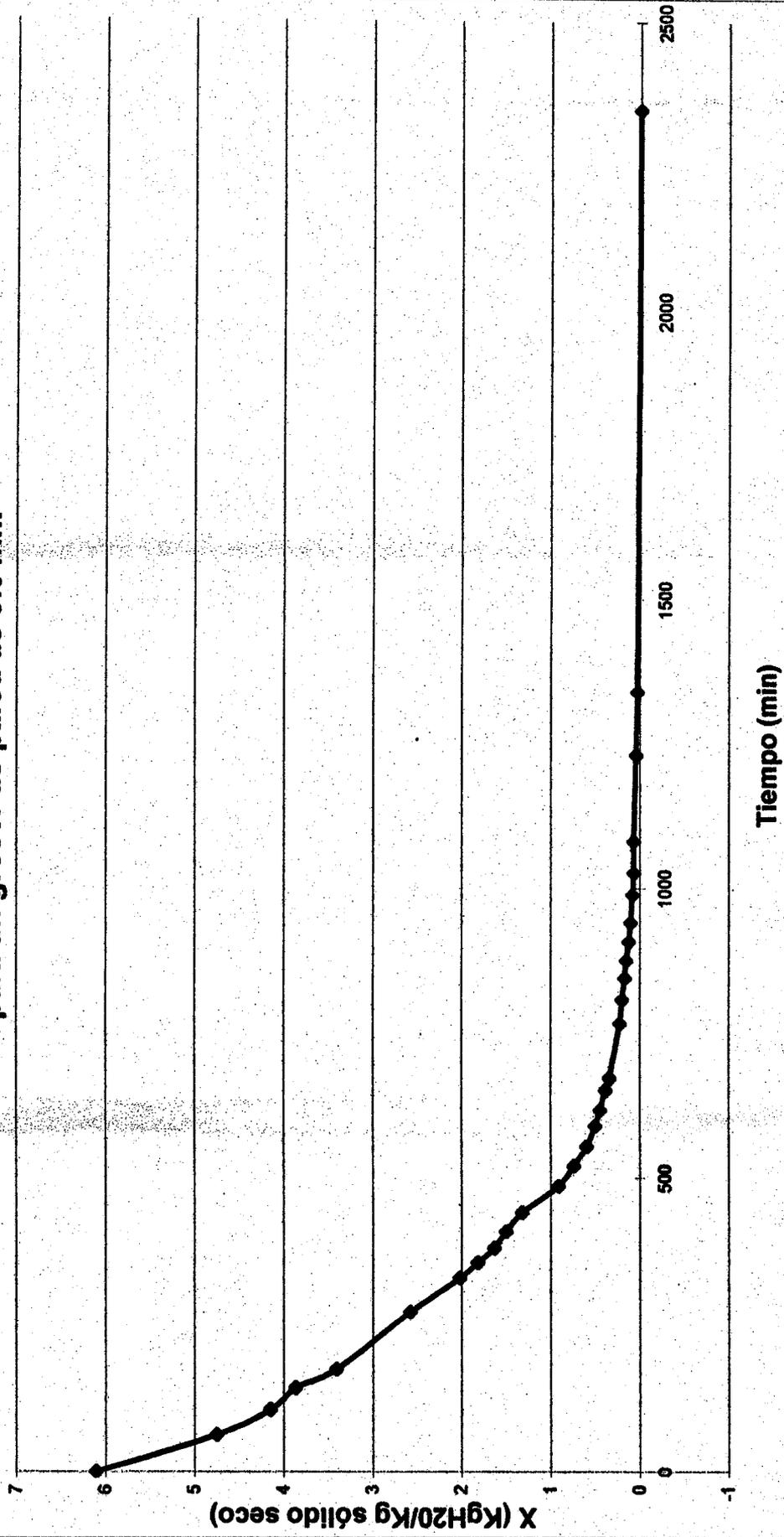
fuerite: datos experimentales

Gráfica No. 8
Humedad libre de la muestra en función del tiempo de secado
para un grosor de pared de 10.0 mm



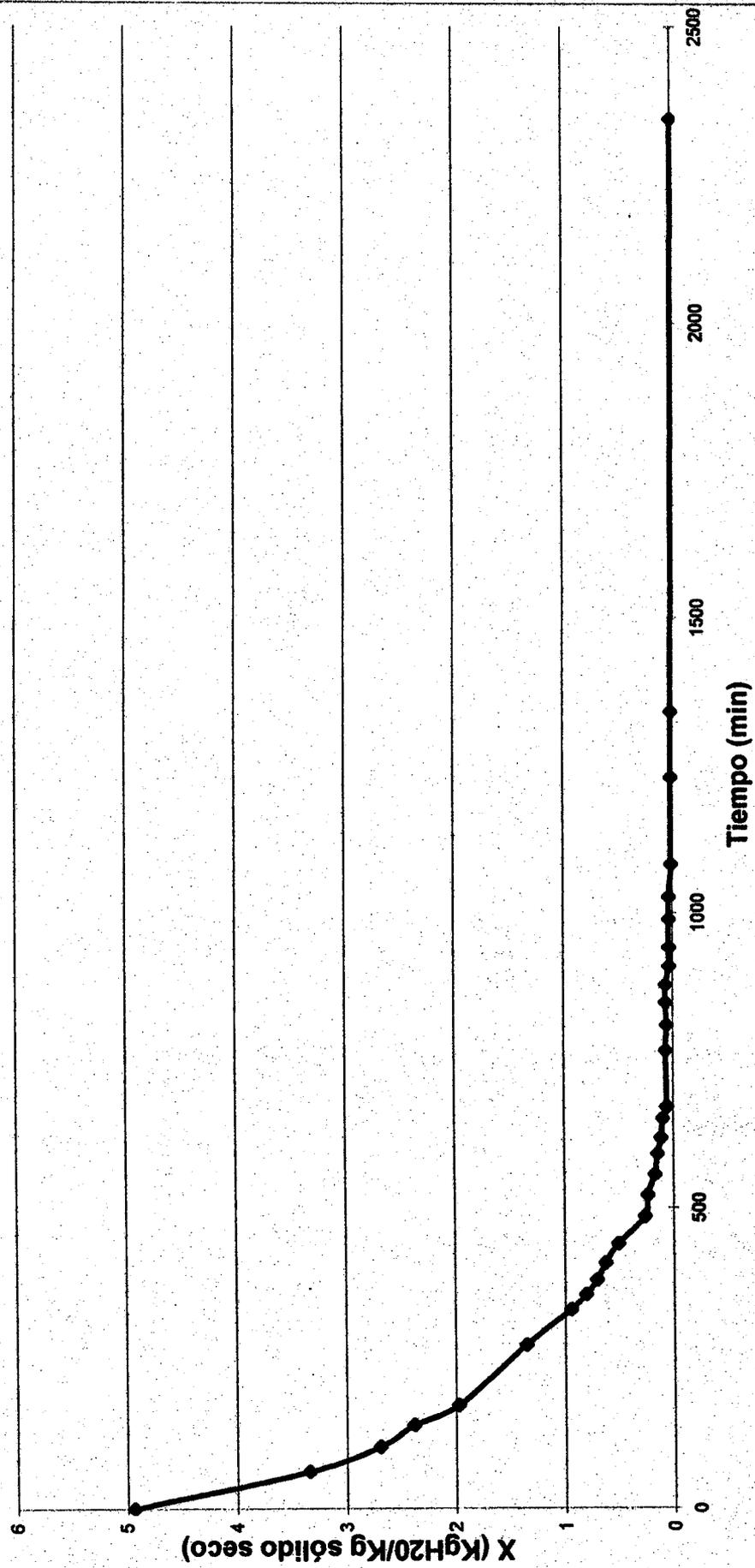
fuelle: datos experimentales

Gráfica No. 9
Humedad libre en la muestra en función del tiempo de secado
para un grosor de pared de 9.0 mm



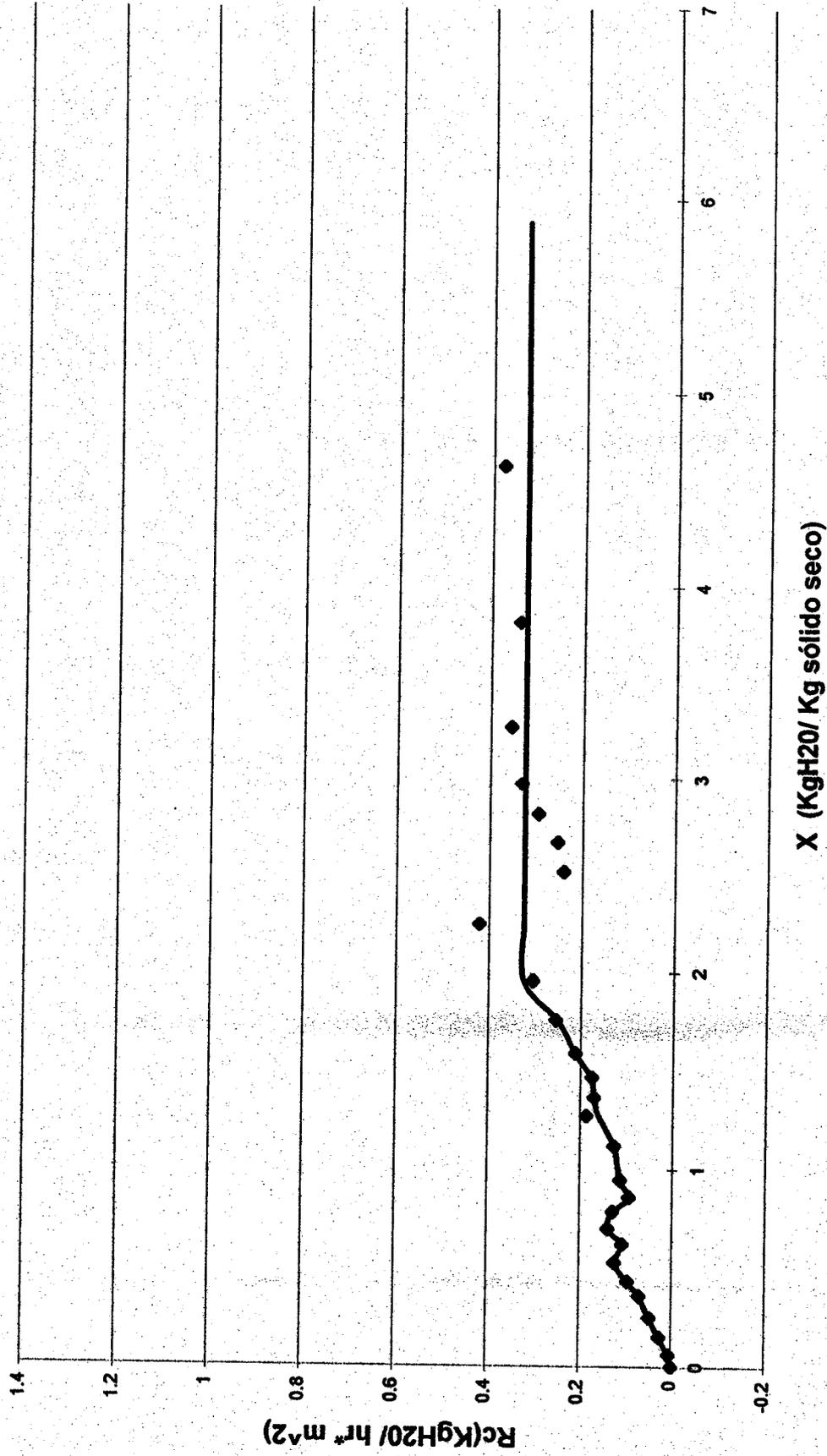
fuate: datos experimentales

Gráfica No. 10
Humedad libre de la muestra en función del tiempo de secado
para un grosor de capa de 5.0 mm



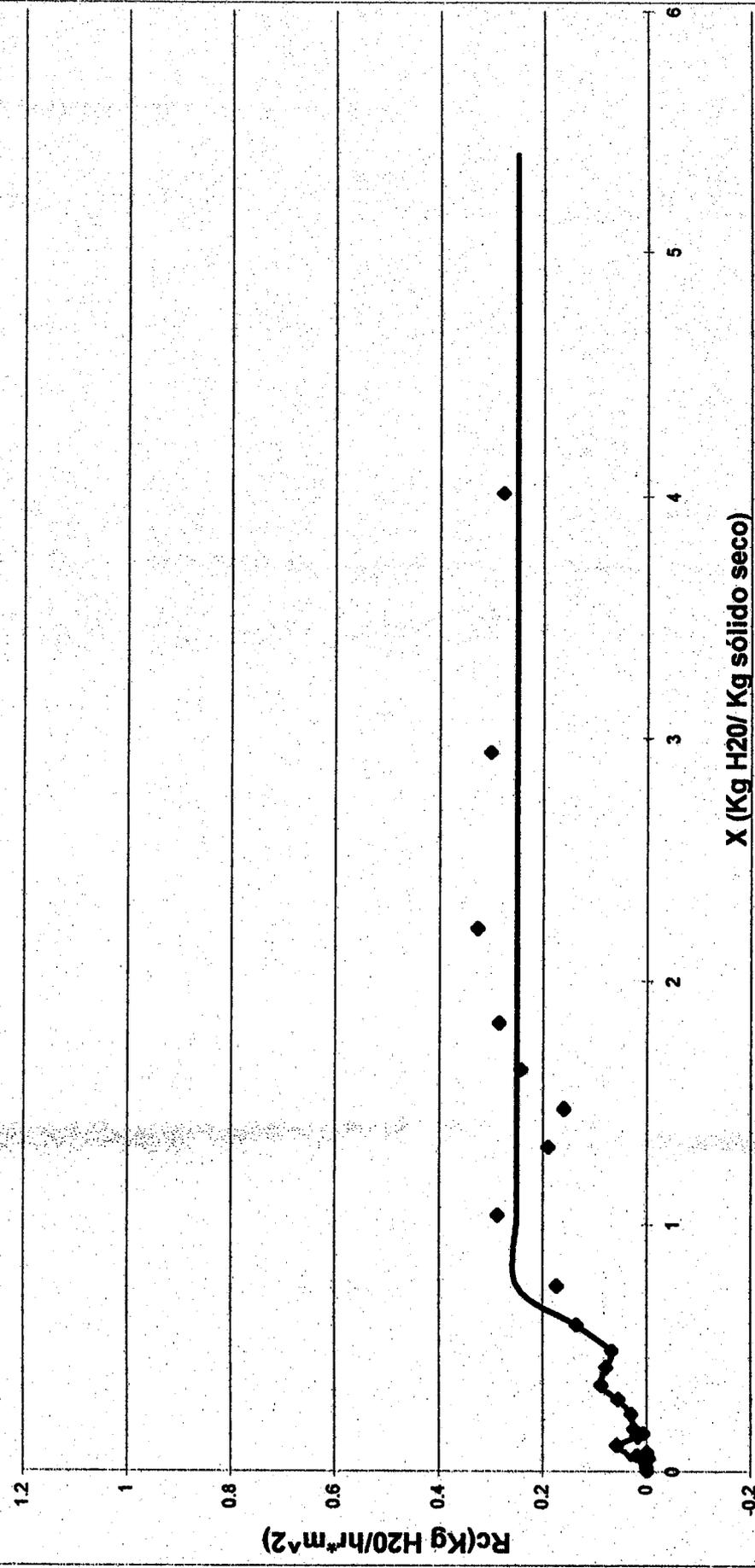
fuelle: datos experimentales

Gráfica No. 11
Velocidad de secado en funcion de la humedad libre
para un grosor de capa de 11.75 mm



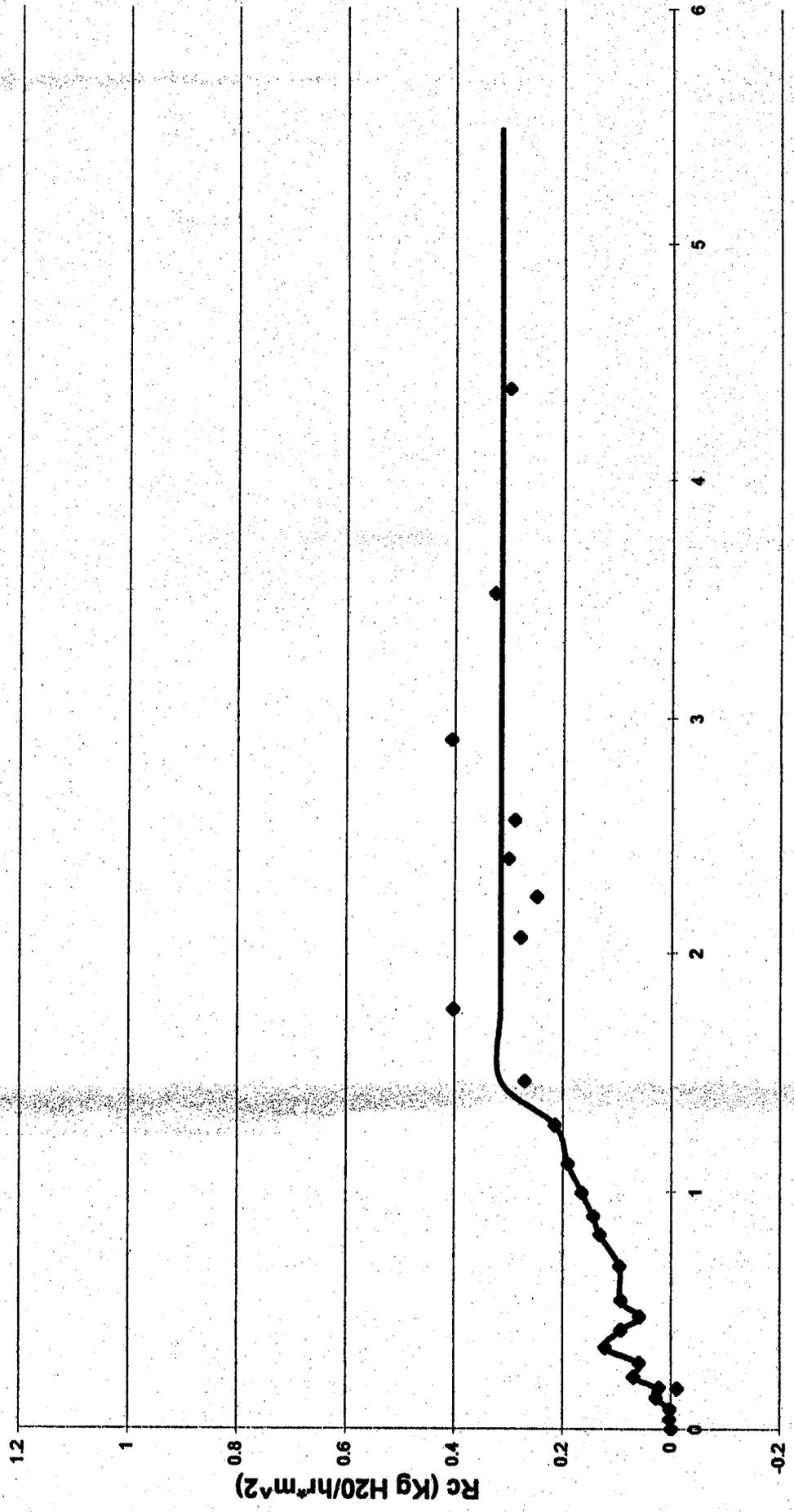
fuentes: datos experimentales.

Gráfica No. 12
Velocidad de secado en función de la humedad libre
para un grosor de capa de 8.05 mm



fuelle: datos experimentales

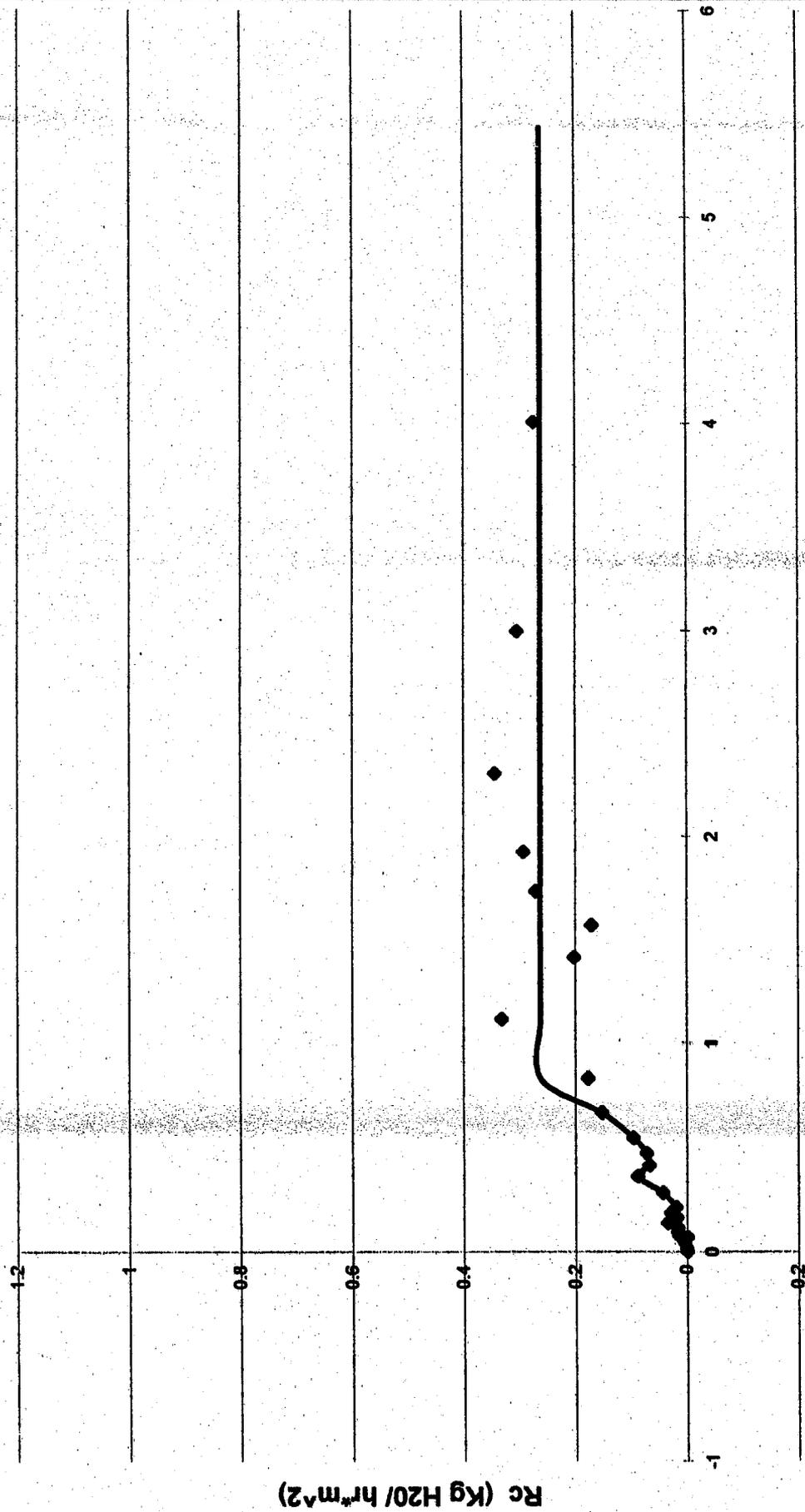
Gráfica No.13
Velocidad de secado en función de la humedad libre
para un grosor de capa de 10.0 mm



fuelle: datos originales

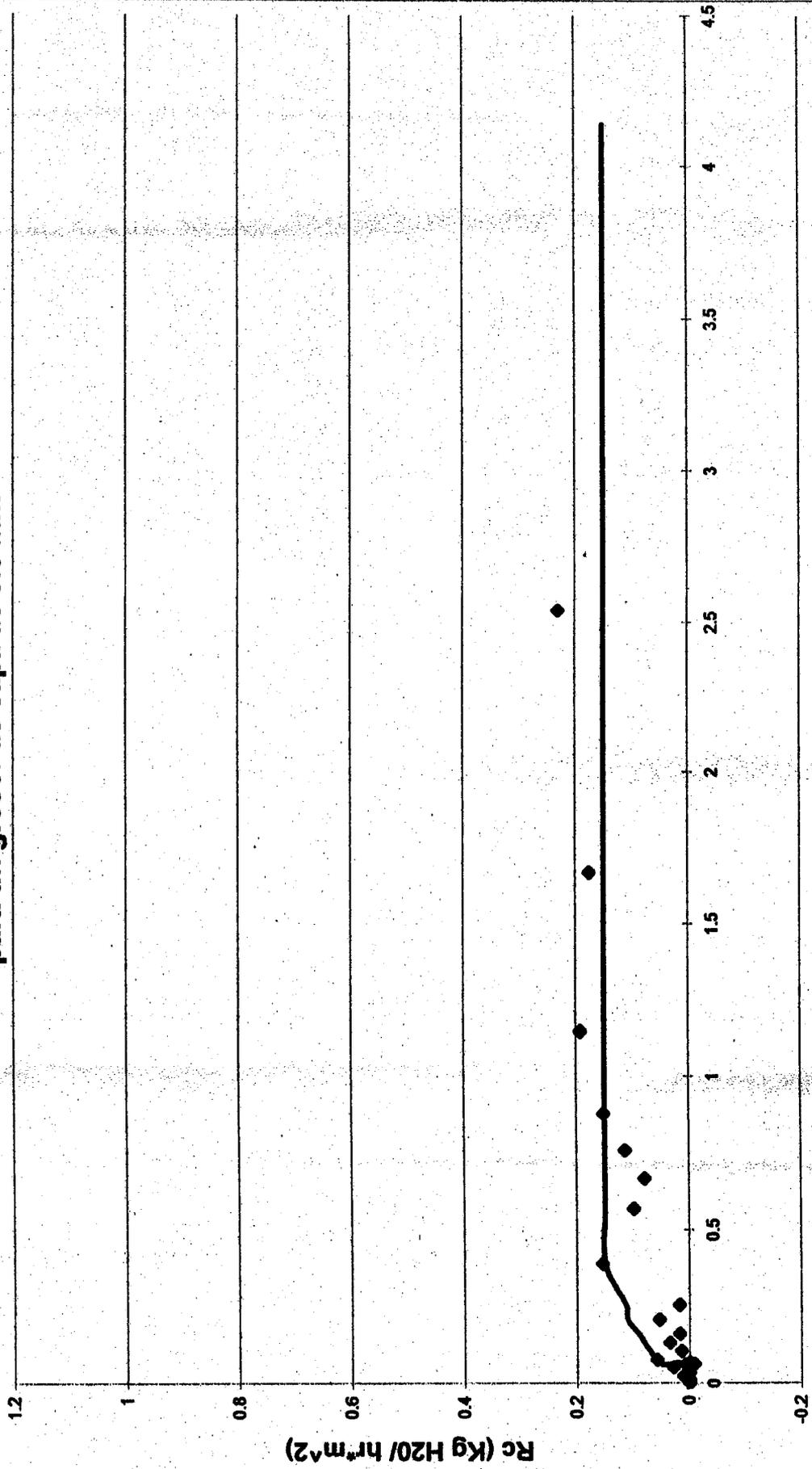
X (Kg H₂O/Kg sólido seco)

Gráfica No. 14
Velocidad de secado en función de la humedad libre
para un grosor de capa de 9.0 mm



fuelle: datos originales.

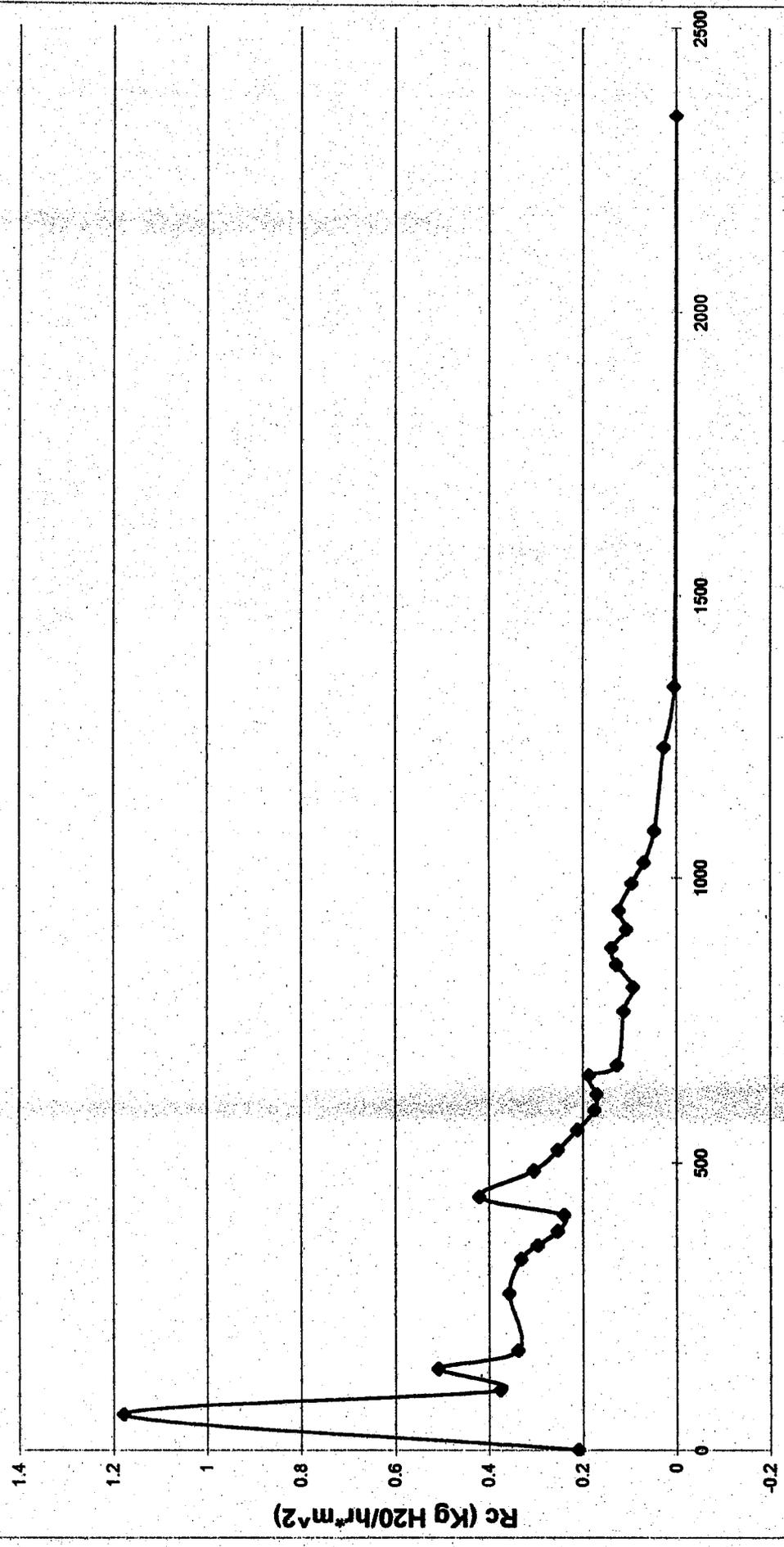
Gráfica No. 15
Velocidad de secado en función de la humedad libre
para un grosor de capa de 5.0 mm



X (Kg H2O/Kg sólido seco)

fuelle: datos originales

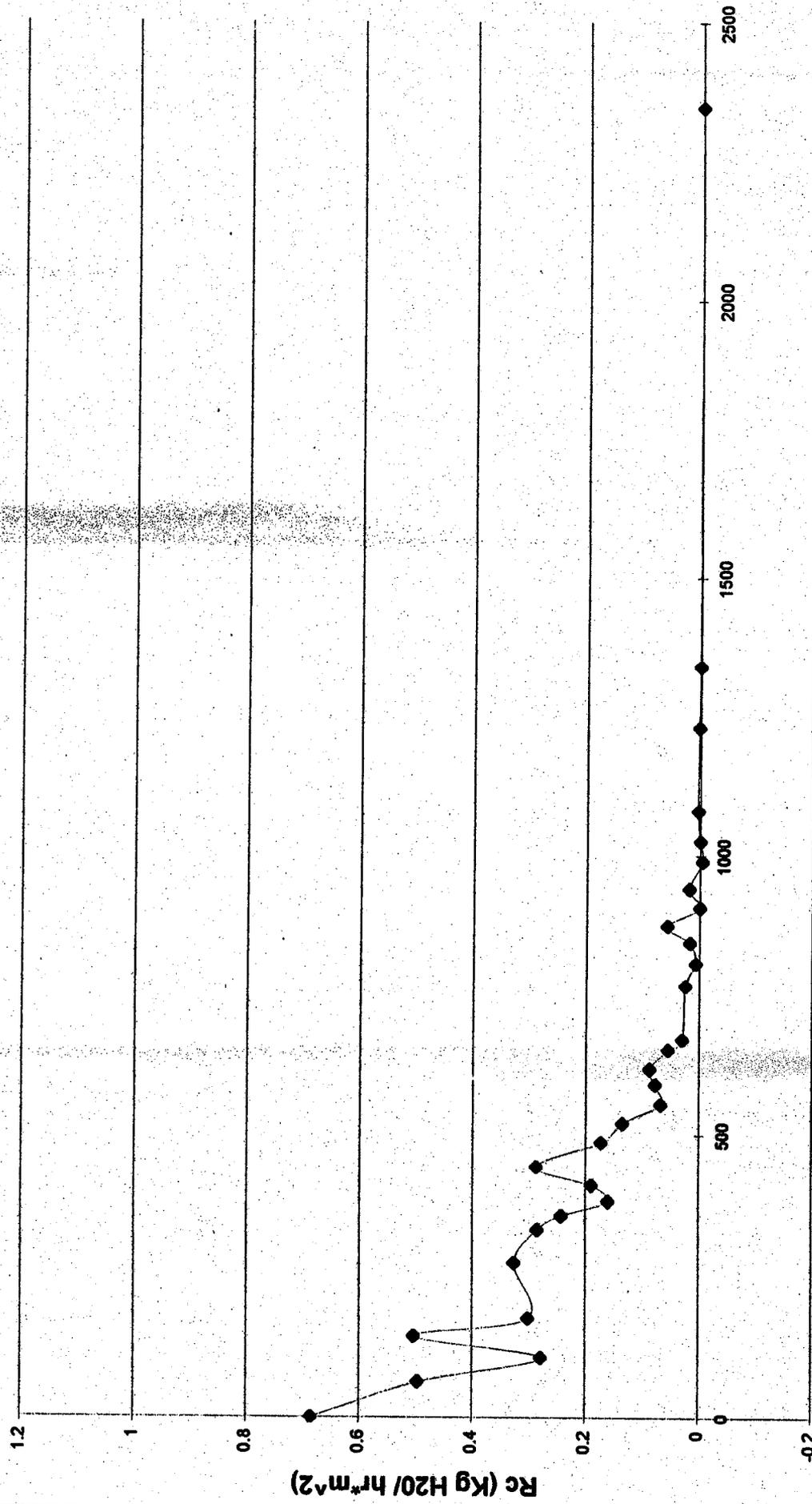
Gráfica No. 16
Velocidad de secado en función del tiempo
para un grosor de capa de 11.75 mm



Tiempo (minutos)

fuerite: datos experimentales

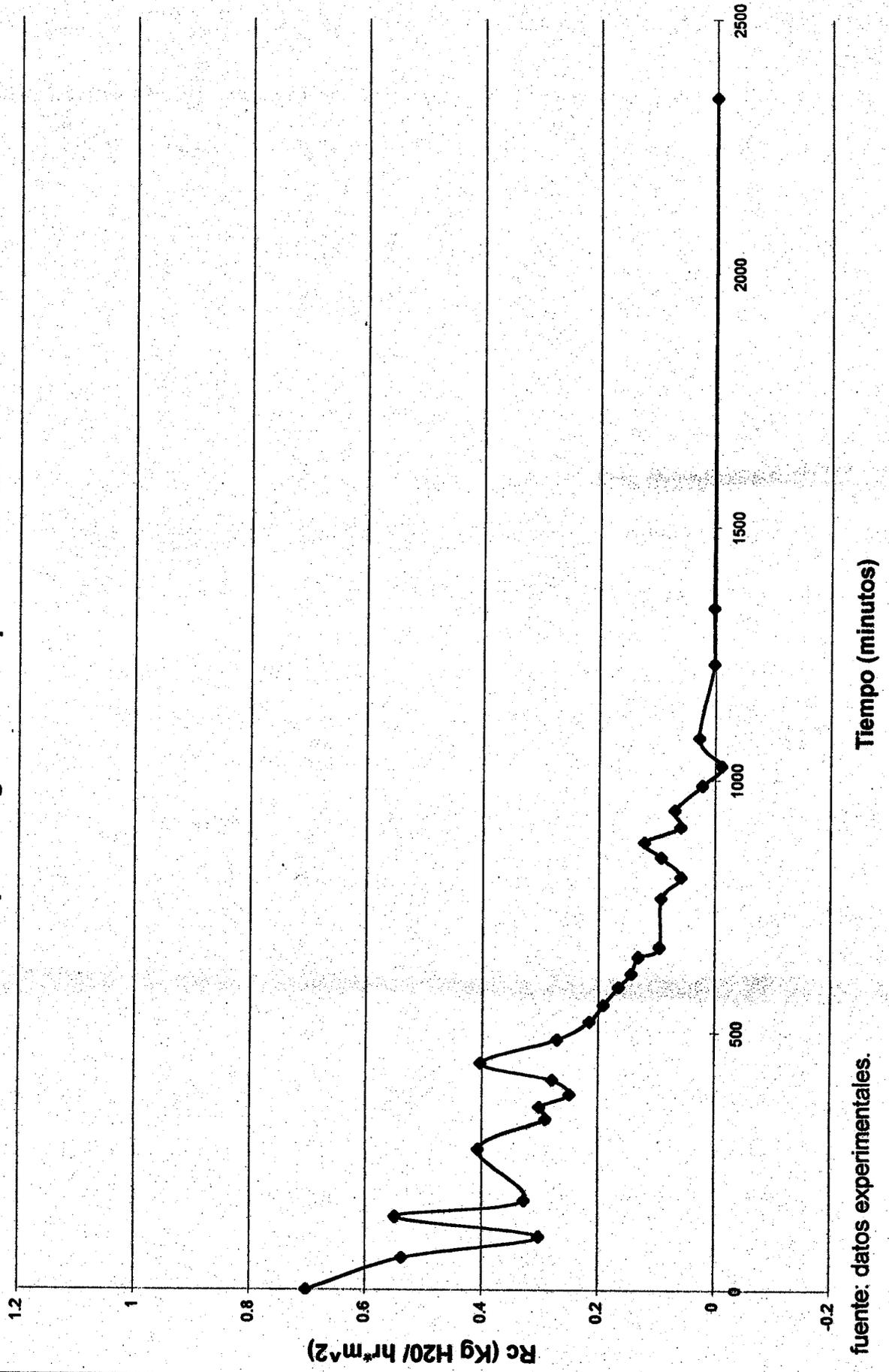
Gráfica No. 17
Velocidad de secado en función del tiempo
para un grosor de capa de 8.05 mm



fuentes: datos experimentales.

Tiempo (minutos)

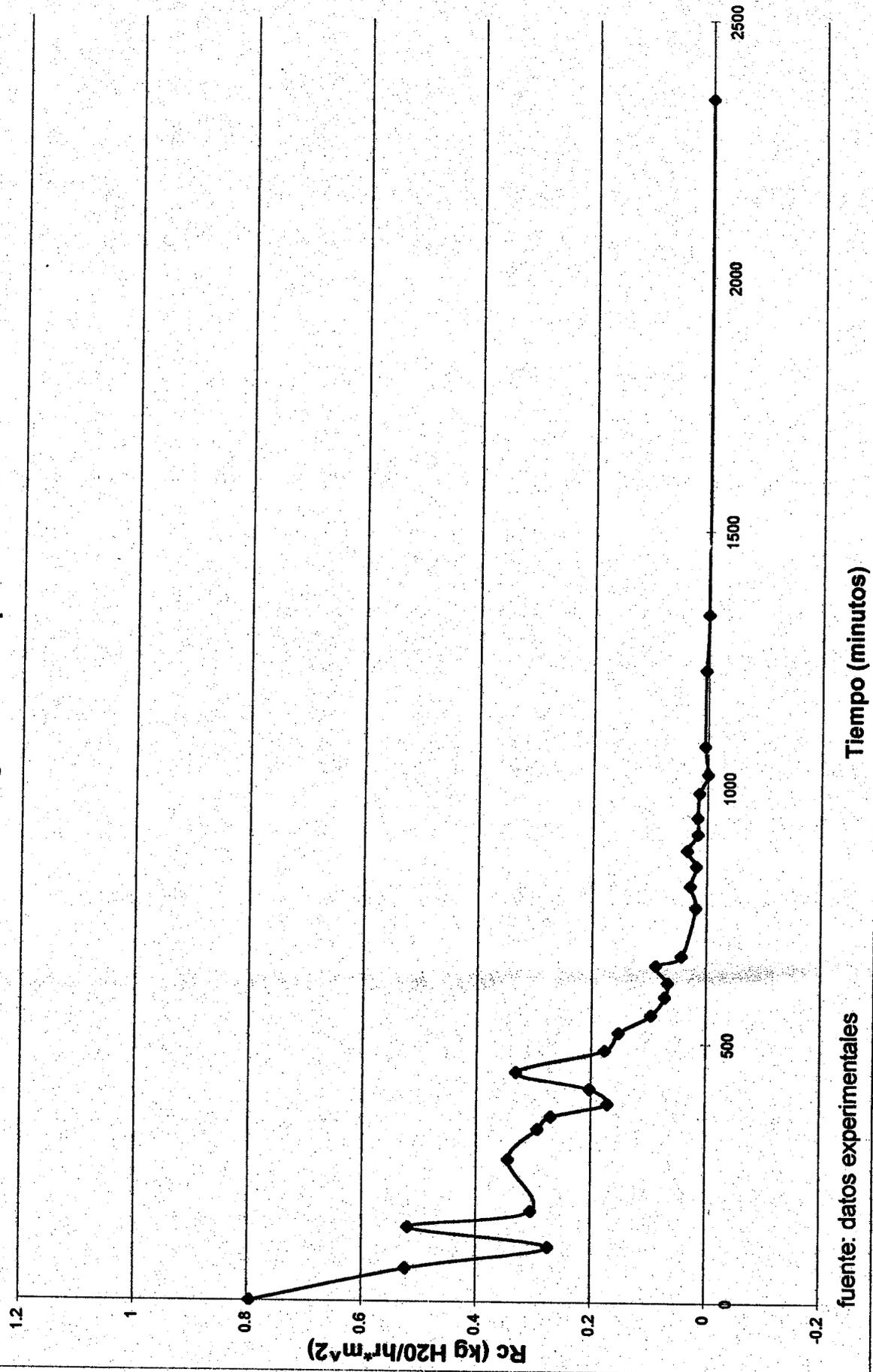
Gráfica No. 18
Velocidad de secado en función del tiempo
para un grosor de capa de 10.0 mm.



fuelle: datos experimentales.

Tiempo (minutos)

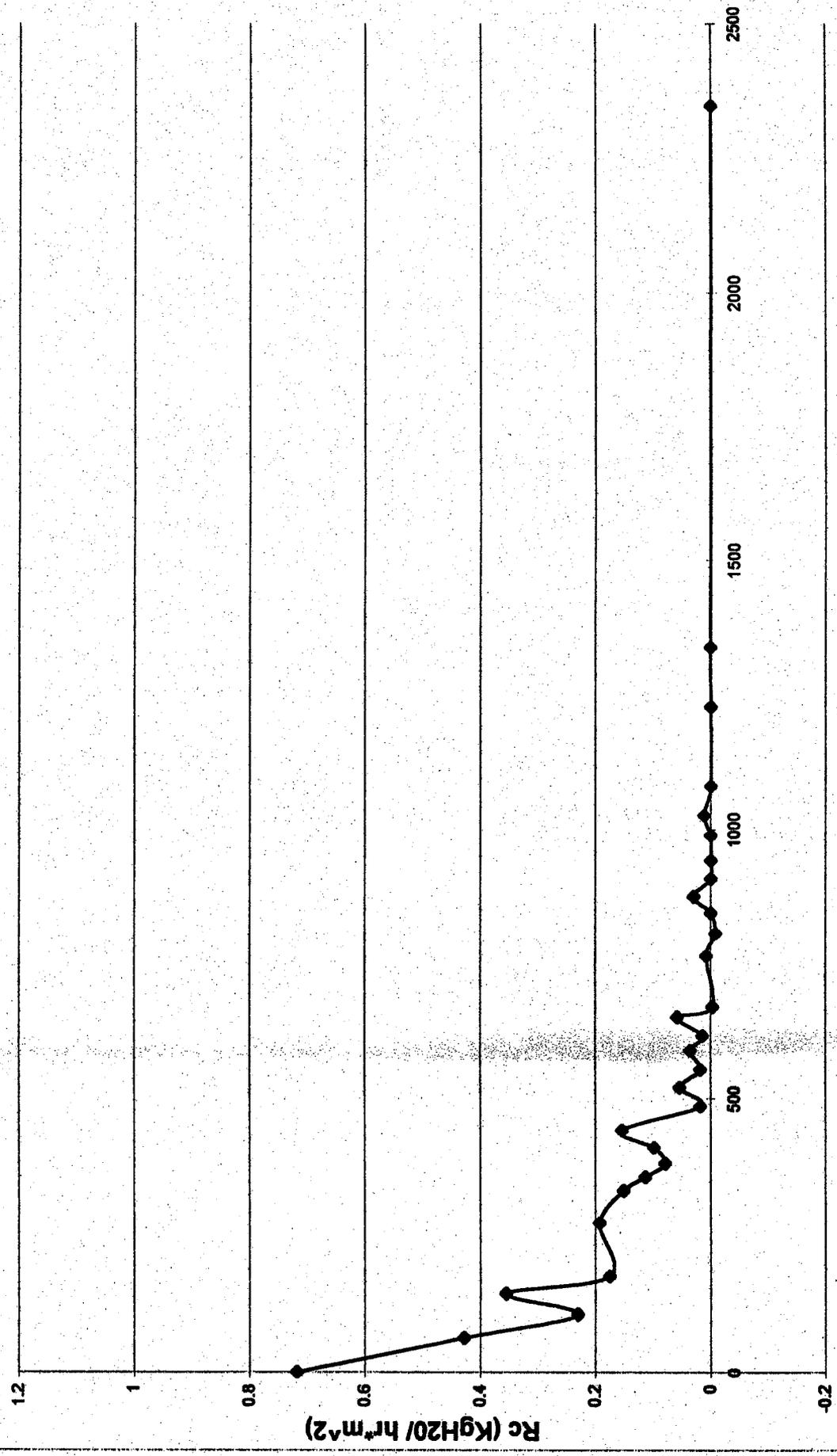
Gráfica No. 19
Velocidad de secado en función del tiempo
para un grosor de capa de 9.0 mm



fuelle: datos experimentales

Tiempo (minutos)

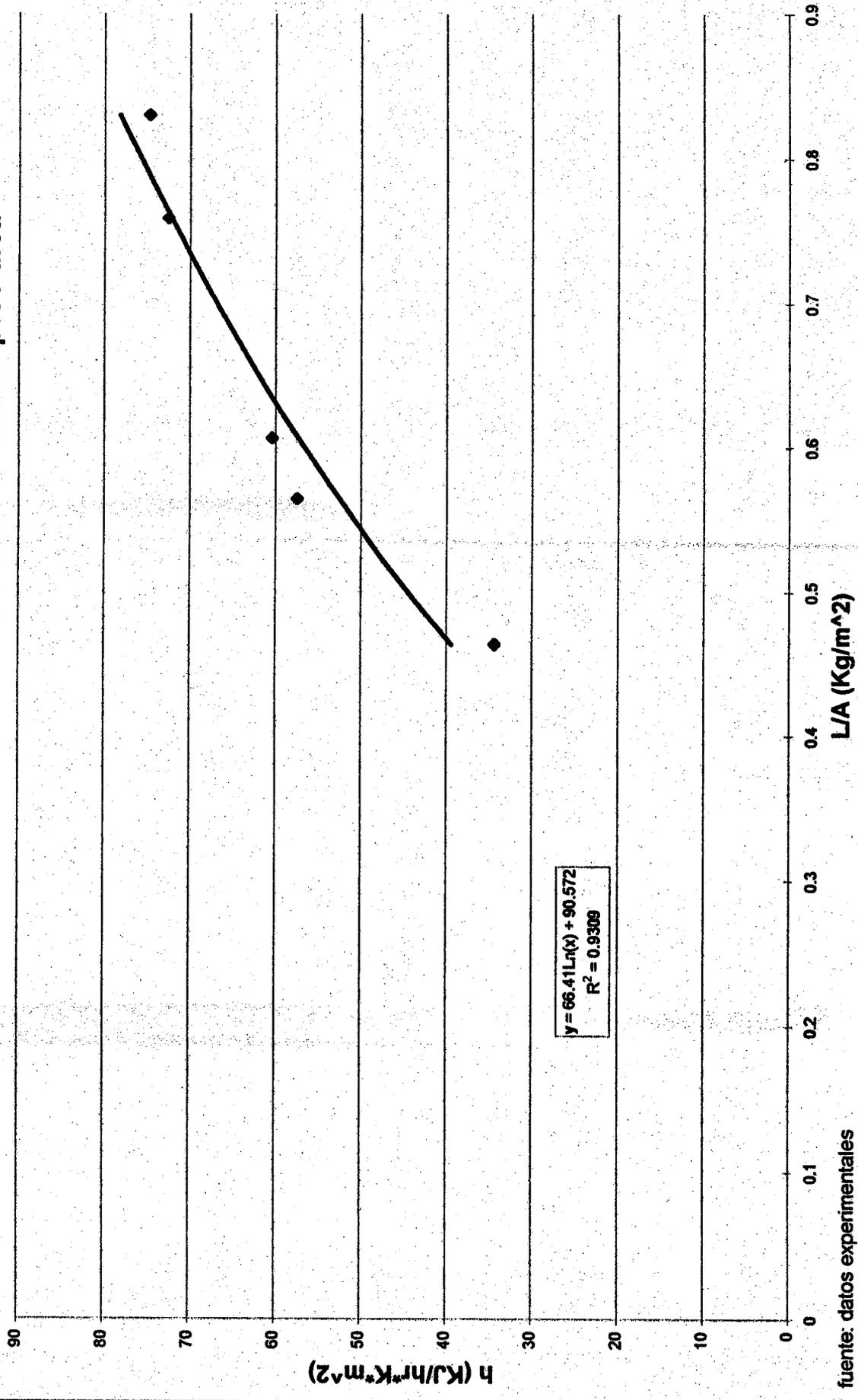
Gráfica No. 20
Velocidad de secado en función del tiempo
para un grosor de capa de 5.0 mm



fuelle: datos experimentales

Tiempo (minutos)

Gráfica No. 21
Coefficiente de transferencia de calor en función de la relación peso-área



DATOS ORIGINALES

Tabla III
Características iniciales de las muestras

No. muestra	Peso (g)	Diámetro (mm)	grosor capa (mm)
1	119.0	113.5	11.75
2	91.1	120.25	8.05
3	114.7	117.0	10.00
4	92.7	116.4	9.00
5	53.0	110.0	5.00

Tabla IV
Variación en el peso de las muestras a través del tiempo de secado

tiempo (minutos)	Peso (g)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	119.0	91.1	114.7	92.7	53.0
62	114.6	75.0	99.1	75.2	38.9
104	97.9	67.1	91.0	67.4	33.2
141	93.2	63.2	87.0	63.8	30.5
173	87.7	57.1	80.7	57.9	26.9
272	76.4	45.8	69.1	47.2	21.4
331	69.3	38.5	60.5	40.0	17.8
356	66.5	35.8	57.9	37.4	16.6

Continuación tabla IV

381	64.0	33.5	55.2	35.0	15.7
409	61.6	31.8	52.7	33.3	15.0
441	59.0	29.5	49.5	31.0	14.0
486	52.6	24.6	43.0	25.7	11.8
521	49.0	22.3	39.6	23.5	11.6
556	46.0	20.5	36.9	21.6	11.0
591	43.5	19.6	34.5	20.4	10.8
618	41.9	18.8	32.9	19.7	10.5
651	40.0	17.7	31.2	18.9	10.35
670	38.8	17.3	30.3	18.3	10.0
766	34.7	16.2	27.0	16.8	10.1
808	33.1	15.8	25.6	16.5	10.0
846	31.9	15.7	24.8	16.1	10.1
876	30.6	15.5	23.8	15.9	10.1
908	29.1	14.8	22.4	15.5	9.8
941	27.9	14.8	21.7	15.3	9.8
989	25.9	14.45	20.5	15.0	9.8
1026	24.7	14.5	20.2	14.8	9.8
1081	23.4	14.5	20.4	14.8	9.6
1229	21.0	14.3	18.9	14.5	9.6
1339	20.0	14.2	18.8	14.3	9.6
2346	18.0	13.8	17.5	13.9	9.5

Tabla V

Humedad del medio de secado a 50 °C a través del tiempo.

Tiempo de secado (minutos)	Humedad Relativa (%)
0	30
62	28
104	32
141	22
173	28
272	18
331	19
356	19
381	19
409	19
441	NHL
486	25
521	23
556	23
591	23
618	23
651	22
670	23
766	24
808	24
846	24

Continuación tabla V

876	22
908	23
941	24
989	24
1026	22
1081	21
1229	21
1339	21
2346	21

NHL: No se hizo lectura.

DATOS CALCULADOS

Tabla No. VI

Humedad absoluta de las muestras a través del tiempo de secado

Tiempo (minutos)	Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg sólido seco)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	6.083	6.117	6.037	6.186	5.023
62	5.821	4.859	5.080	4.829	3.420
104	4.827	4.242	4.583	4.224	2.773
141	4.547	3.938	4.337	3.946	2.466
173	4.220	3.461	3.951	3.488	2.057
272	3.547	2.578	3.239	2.659	1.432
331	3.125	2.008	2.712	2.101	1.023
356	2.958	1.797	2.552	1.899	0.886
381	2.809	1.617	2.387	1.713	0.784
409	2.667	1.484	2.233	1.581	0.705
441	2.512	1.305	2.037	1.403	0.591
486	2.131	0.922	1.638	0.992	0.341
521	1.917	0.742	1.429	0.822	0.318
556	1.738	0.602	1.264	0.674	0.250
591	1.589	0.531	1.117	0.581	0.227
618	1.494	0.469	1.018	0.527	0.193
651	1.381	0.383	0.914	0.465	0.176
670	1.310	0.352	0.859	0.419	0.136
766	1.065	0.266	0.656	0.302	0.148
808	0.970	0.234	0.571	0.279	0.136
846	0.899	0.226	0.521	0.248	0.148

Continuación Tabla VI

876	0.821	0.211	0.460	0.232	0.148
908	0.732	0.156	0.374	0.202	0.114
941	0.661	0.156	0.331	0.186	0.114
989	0.542	0.129	0.258	0.163	0.114
1026	0.470	0.133	0.239	0.147	0.114
1081	0.393	0.133	0.252	0.147	0.091
1229	0.250	0.117	0.160	0.124	0.091
1339	0.190	0.109	0.153	0.109	0.091
2346	0.071	0.078	0.074	0.078	0.080

Tabla No. VII

Humedad al equilibrio para cada una de las muestras
a las condiciones de secado.

No. de muestra	Humedad al equilibrio (KgH ₂ O/Kg sólido seco)
1	0.071
2	0.078
3	0.074
4	0.078
5	0.080

Tabla VIII
Humedad libre de las muestras a través del
tiempo de secado.

Tiempo (minutos)	Humedad libre(KgH ₂ O/Kg sólido seco)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0	6.012	6.039	5.963	6.109	4.943
62	5.750	4.781	5.006	4.752	3.341
104	4.756	4.164	4.509	4.147	2.693
141	4.476	3.859	4.264	3.868	2.386
173	4.149	3.383	3.877	3.411	1.977
272	3.476	2.500	3.166	2.581	1.352
331	3.054	1.930	2.638	0.023	0.943
356	2.887	1.719	2.479	1.822	0.807
381	2.738	1.539	2.313	1.636	0.705
409	2.595	1.406	2.160	1.504	0.625
441	2.440	1.227	1.963	1.326	0.511
486	2.060	0.844	1.564	0.915	0.261
521	1.845	0.664	1.356	0.744	0.239
556	1.667	0.523	1.190	0.597	0.170
591	1.518	0.453	1.043	0.504	0.148
618	1.423	0.391	0.945	0.450	0.114
651	1.310	0.305	0.840	0.388	0.097
670	1.238	0.273	0.785	0.341	0.057
766	0.994	0.188	0.583	0.225	0.068
808	0.899	0.156	0.497	0.202	0.057

Continuación tabla VIII

846	0.827	0.149	0.448	0.171	0.068
876	0.750	0.133	0.387	0.155	0.068
908	0.661	0.078	0.301	0.124	0.034
941	0.589	0.078	0.258	0.109	0.034
989	0.470	0.051	0.184	0.085	0.034
1026	0.399	0.055	0.166	0.070	0.034
1081	0.321	0.055	0.178	0.070	0.011
1229	0.179	0.039	0.086	0.047	0.011
1339	0.119	0.031	0.080	0.031	0.011
2346	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla IX

Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del tiempo promedio de secado para un grosor de capa de 11.75 mm.

Tiempo promedio (minutos)	Humedad libre promedio (Kg H ₂ O/Kg sólido seco)	Velocidad de secado (KgH ₂ O/hr*m ²)
31	5.881	0.210
83	5.253	1.179
122.5	4.616	0.377
157	4.313	0.510
222.5	3.813	0.338
301.5	3.265	0.357
343.5	2.970	0.332
368.5	2.813	0.297
395	2.667	0.254
425	2.518	0.241

Continuación tabla No. IX

503.5	1.952	0.305
538.5	1.756	0.254
573.5	1.592	0.212
604.5	1.470	0.176
634.5	1.366	0.171
660.5	1.274	0.187
718.0	1.116	0.897
787.0	0.946	0.127
827.0	0.863	0.113
861.0	0.789	0.094
892.0	0.705	0.128
924.5	0.625	0.139
965.0	0.530	0.108
1007.5	0.434	0.124
1053.5	0.360	0.096
1155.0	0.250	0.070
1284.0	0.149	0.048
1842.5	0.060	0.027
1173.0	0.000	0.000

Tabla X
Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del
tiempo de secado promedio para un grosor de capa de 8.05 mm.

Tiempo promedio (minutos)	Humedad libre promedio (Kg H₂O/Kg sólido seco)	Velocidad de secado (Kg H₂O/Kg sólido seco)
31.0	5.410	0.686
83.0	4.473	0.496
122.5	4.012	0.278
157.0	3.621	0.503
222.5	2.941	0.301
301.5	2.215	0.327
343.5	1.824	0.285
368.5	1.629	0.243
395.0	1.473	0.160
425.0	1.316	0.190
463.5	1.035	0.288
503.5	0.754	0.174
538.5	0.594	0.136
573.5	0.488	0.068
604.5	0.422	0.078
634.5	0.348	0.088
660.5	0.289	0.056
718.0	0.230	0.030
787.0	0.172	0.025
827.0	0.152	0.007
861.0	0.141	0.018

Continuación tabla X

892	0.105	0.058
924.5	0.078	0.000
965.0	0.064	0.019
1007.5	0.053	0.003
1053.5	0.055	0.000
1155.0	0.047	0.004
1284.0	0.035	0.002
1842.5	0.016	0.001
1173.0	0.000	0.000

Tabla XI

Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del tiempo de secado promedio para un grosor de capa de 10.0 mm.

Tiempo promedio (minutos)	Humedad libre promedio (Kg H ₂ O/Kg sólido seco)	Velocidad de secado (Kg H ₂ O/Kg sólido seco)
31.0	5.430	0.702
83.0	4.450	0.538
122.5	4.008	0.302
157.0	3.640	0.549
222.5	2.996	0.327
301.5	2.302	0.407
343.5	1.922	0.290
368.5	1.729	0.301
395.0	1.570	0.249
425.0	1.415	0.279

Continuación tabla XI

463.5	1.120	0.403
503.5	0.829	0.271
538.5	0.671	0.215
573.5	0.550	0.191
604.5	0.477	0.165
634.5	0.419	0.144
660.5	0.364	0.132
718.0	0.283	0.096
787.0	0.213	0.093
827.0	0.186	0.058
861.0	0.163	0.093
892	0.140	0.122
924.5	0.116	0.059
965.0	0.097	0.070
1007.5	0.078	0.022
1053.5	0.070	0.010
1155.0	0.058	0.028
1284.0	0.039	0.003
1842.5	0.016	0.004
1173.0	0.000	0.000

Tabla XII

Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del tiempo de secado promedio para un grosor de capa de 9.0 mm.

Tiempo promedio (minutos)	Humedad libre promedio (Kg H₂O/Kg sólido seco)	Velocidad de secado (Kg H₂O/Kg sólido seco)
31.0	5.430	0.796
83.0	4.450	0.524
122.5	4.008	0.274
157.0	3.640	0.520
222.5	2.996	0.305
301.5	2.302	0.344
343.5	1.922	0.293
368.5	1.729	0.271
395.0	1.570	0.171
425.0	1.415	0.203
463.5	1.120	0.332
503.5	0.829	0.177
538.5	0.671	0.153
573.5	0.550	0.097
604.5	0.477	0.073
634.5	0.419	0.068
660.5	0.364	0.089
718.0	0.283	0.044
787.0	0.213	0.020

Continuación tabla XII

827.0	0.186	0.030
861.0	0.163	0.019
892	0.140	0.035
924.5	0.116	0.017
965.0	0.097	0.018
1007.5	0.078	0.015
1053.5	0.070	0.000
1155.0	0.040	0.006
1284.0	0.000	0.000

Tabla No. XIII

Velocidad de secado y humedad libre promedio a través del tiempo de secado promedio para un grosor de capa de 5.0 mm.

Tiempo promedio (minutos)	Humedad libre promedio (Kg H ₂ O/Kg sólido seco)	Velocidad de secado (Kg H ₂ O/Kg sólido seco)
31.0	4.142	0.718
83.0	3.017	0.428
122.5	2.540	0.230
157.0	2.182	0.355
222.5	1.665	0.175
301.5	1.148	0.193
343.5	0.875	0.152
368.5	0.756	0.114
395.0	0.664	0.079
425.0	0.568	0.099
463.5	0.386	0.154

Continuación tabla XIII

503.5	0.250	0.018
538.5	0.204	0.054
573.5	0.159	0.018
604.5	0.131	0.054
634.5	0.105	0.018
660.5	0.077	0.035
718.0	0.063	0.014
787.0	0.063	0.058
827.0	0.063	-0.003
861.0	0.068	0.000
892	0.051	0.030
924.5	0.034	0.000
965.0	0.034	0.000
1007.5	0.034	0.000
1053.5	0.023	0.011
1155.0	0.011	0.000
1284.0	0.011	0.000
1842.5	0.006	0.000
1173.0	0.000	0.000

Tabla XIV

Velocidad de secado en la etapa de secado constante y coeficiente de transferencia de calor en función de la relación peso de sólido seco-área de transferencia para las muestras analizadas.

Muestra	L/A (Kgsólido seco/m ²)	Rc (KgH ₂ O/hr*m ²)	h (KJ/hr*m ² *K)
1	0.8302	0.3247	74.77
2	0.5635	0.2496	57.47
3	0.7580	0.3152	72.58
4	0.6061	0.2623	60.40
5	0.4630	0.1494	34.40

CÁLCULO DE MUESTRA

1. Cálculo de la temperatura de superficie de secado.

Datos: humedad relativa del aire= 22%

temperatura del aire= 50 °C

De la carta psicométrica:

$H_1 = 0.0155 \text{ KgH}_2\text{O/Kg aire seco}$ para una humedad relativa de 22% y temperatura de bulbo seco de 50°C.

Se tiene la siguiente relación:

$$H_s - H = \left(\frac{hC_s}{\lambda h_c} \right) (T - T_w)$$

[ec.1]

Donde: T = temperatura del aire. (°C)

T_w = temperatura de la superficie de secado. (°C)

H_s = humedad del aire. (Kg H₂O/ Kg aire seco)

H = humedad del aire a T_w . (Kg H₂O/ Kg aire seco)

h_c = coeficiente de transferencia de calor por conducción. (KJ/hr*m²*K)

C_s = relación entre el coeficiente de calor por radiación y la capacidad calorífica del aire húmedo.

λ = calor latente del agua a T_w . (KJ/Kg)

Se escoge una temperatura para la primera iteración y se encuentran los datos de la ecuación según la siguiente figura:

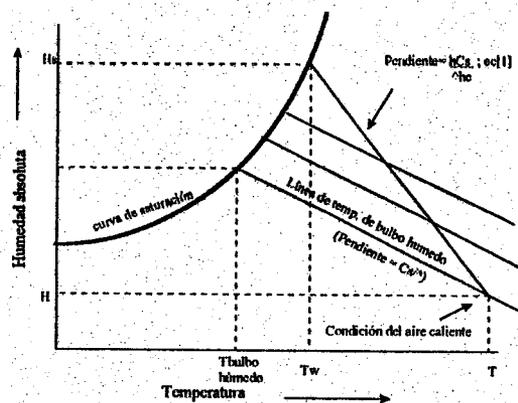


Figura No. 3. Método gráfico para determinar la temperatura de la superficie de secado.

De la carta psicométrica se obtiene que para $T_s = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H_s = 0.0305$

la pendiente es:

$$(hC_s/\lambda h_c) = (0.0305 - 0.0155)/(50 - 32) = 4.545454 \times 10^{-4} \text{ KgH}_2\text{O/Kg aire seco} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

por lo que se tiene de la ecuación [1]:

$$0.0305 - 0.0165 = 4.5454 \times 10^{-4} (50 - 32)$$

Por esta razón se procede con una segunda iteración, ahora con $T_s = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De aquí se tiene de la carta que : $H_s = 0.049$ y la pendiente = 0.00335

entonces:

$$0.0155 - 0.049 = 0.00325 (50 - 40)$$

Y, es así como se determina que las condiciones de la superficie de secado son:

$T_s = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $H_s = 0.049 \text{ KgH}_2\text{O/Kg aire seco}$.

2. Cálculo de la velocidad de secado.

Datos: $X_1 = 6.012 \text{ KgH}_2\text{O/Kg sólido seco}$

$X_2 = 5.75 \text{ KgH}_2\text{O/Kg sólido seco}$

$L/A = 0.8302 \text{ Kg sólido seco/m}^2$ de transferencia

$t_1 = 0 \text{ min}$

$t_2 = 62 \text{ min.}$

$$R_c = (L/A) (X_1 - X_2) / (t_1 - t_2) \quad \text{ec. [2]}$$

donde $R_c =$ velocidad de secado ($\text{Kg H}_2\text{O/hr}\cdot\text{m}^2$)

$L/A =$ relación peso-área ($\text{Kg sólido seco/m}^2$)

$X =$ humedad libre ($\text{Kg H}_2\text{O/Kg sólido seco}$)

$t =$ tiempo de secado (hr)

De la relación anterior se obtiene: $R_c = 0.2105 \text{ KgH}_2\text{O/m}^2\cdot\text{hr}$

3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor.

Datos: $\lambda = 2302.74 \text{ KJ/KgH}_2\text{O}$

$T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_w = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$R_c = 0.8302 \text{ KgH}_2\text{O/m}^2\cdot\text{hr}$

$$h = \frac{R_c}{(T - T_w)} \lambda \quad \text{[ec.3]}$$

Donde : $R_c =$ Velocidad de secado constante. ($\text{Kg H}_2\text{O/hr}\cdot\text{m}^2$)

$h =$ Coeficiente de transferencia de calor. ($\text{KJ/hr}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$)

$T =$ Temperatura del aire. ($^\circ\text{C}$)

$T_w =$ Temperatura de la superficie de secado. ($^\circ\text{C}$)

$\lambda =$ calor latente del agua a T_w . ($\text{KJ/ Kg H}_2\text{O}$)

De la relación anterior se tiene que: $h = 74.77 \text{ KJ/hr}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$

4. Cálculo de la ecuación del tiempo de secado en la etapa de velocidad de secado constante.

Datos: $L/A = 0.8302 \text{ Kgsólido seco/m}^2$ $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_w = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$h = 74.77 \text{ KJ/hr}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$ $\lambda = 2302.74 \text{ KJ/Kg H}_2\text{O}$

De la siguiente relación,

$$t = \frac{L\lambda(X_1 - X_2)}{Ah(T - T_w)} \quad [\text{ec. 4}]$$

Donde: $t =$ tiempo de secado (hr)

$L =$ Masa del sólido seco. (Kg)

$A =$ Area del sólido expuesta a secado. (m^2)

$T =$ temperatura del aire. ($^\circ\text{C}$)

$T_w =$ temperatura superficial del sólido ($^\circ\text{C}$)

$\lambda =$ calor latente del agua a T_w . (KJ/Kg H_2O)

Se tiene que :

$$t = 2.5568(X_1 - X_2) \quad \text{ec. [5]}$$

donde $t =$ tiempo en horas

$X_1 =$ humedad libre en el estado 1 (Kg $\text{H}_2\text{O/Kg}$ sólido seco)

$X_2 =$ humedad libre en el estado 2 (Kg $\text{H}_2\text{O/Kg}$ sólido seco)