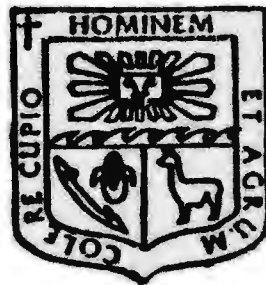


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

Facultad de Industrias Alimentarias



**"SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA (Allium cepa)
POR FLUJO DE AIRE CALIENTE Y EVALUACION
DE LA PERDIDA DE SU PUNGENCIA"**

**Tesis para optar el Título de :
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

LUIS FERNANDO VARGAS DELGADO

Lima - Perú

1996

INDICE

	Pag.
RESUMEN	
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION DE LITERATURA	3
2.1. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA CEBOLLA	3
2.1.1. CULTIVARES	3
2.1.2. COMPOSICION QUIMICA	4
2.1.3. PUNGENCIA	8
2.2. SECADO DE ALIMENTOS	12
2.2.1. DEFINICION	12
2.2.2. SECADO DE ALIMENTOS POR AIRE CALIENTE	12
2.2.3. PERIODOS DE SECADO POR AIRE CALIENTE	14
2.2.3.1. PERIODO DE AJUSTE	14
2.2.3.2. PERIODO DE SECADO A VELOCIDAD CONSTANTE	14
2.2.3.3. PERIODO DE SECADO A VELOCIDAD DECRECIENTE	15
2.2.4. FACTORES QUE AFECTAN EL SECADO POR AIRE CALIENTE	15
2.2.4.1. FACTORES INTERNOS	15
2.2.4.2. FACTORES EXTERNOS	16
2.3. TRANSFERENCIA DE MASA EN EL SECADO DE ALIMENTOS	18
2.3.1. LA DIFUSION DEL AGUA DURANTE EL SECADO DE ALIMENTOS	18
2.3.2. MODELOS MATEMATICOS EN EL SECADO DE ALIMENTOS	20
2.3.3. ENFOQUE NO LINEAL DEL PROBLEMA DE TRANSFERENCIA DE MASA	26

2.3.4.	SIMULACION DEL SECADO DE ALIMENTOS	30
2.4.	METODOS NUMERICOS	32
2.4.1.	METODOS DE ESTIMACION DE LA DIFUSIVI- DAD EFECTIVA POR METODOS NUMERICOS	33
2.4.1.1.	ESTIMACIÓN DE LA DIFUSIVI- DAD EFECTIVA NO LINEAL DU- RANTE EL SECADO DE CUERPOS GEOMETRICOS REGULARES POR EL METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES	33
2.4.1.2.	ESTIMACIÓN DE LA DIFUSIVI- DAD EFECTIVA NO LINEAL PA- RA EL CASO DE UNA PLANCHA INFINITA POR EL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS.	36
III.	MATERIALES Y METODOS	43
3.1.	LUGAR DE EJECUCION	43
3.2.	MATERIA PRIMA	44
3.3.	MATERIALES Y EQUIPOS	44
3.4.	METODOS DE ANALISIS	46
3.4.1.	ANALISIS FISICO-QUIMICOS	46
3.4.1.1.	COMPOSICION QUIMICO-PROXIMAL	46
3.4.1.2.	CONTENIDO DE HUMEDAD	46
3.4.1.3.	CONTENIDO DE ACIDO PIRUVICO	48
3.5.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	48
3.5.1.	DESCRIPCION DE LAS OPERACIONES DE SECADO	48
3.5.1.1.	RECEPCION DE MATERIA PRIMA	48
3.5.1.2.	SELECCION Y CLASIFICACION	48

3.5.1.3.	PELADO	50
3.5.1.4.	LAVADO	50
3.5.1.5.	CORTADO	50
3.5.1.6.	SECADO	51
3.5.1.7.	MOLIENDA	51
3.5.1.8.	ENVASADO	53
3.5.2.	CONTROLES DURANTE EL SECADO	53
3.5.2.1.	DETERMINACION DE LAS HUMEDADES RELATIVAS	53
3.5.2.2.	DETERMINACION DE LOS CONTENI- DOS DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO	53
3.5.2.3.	DETERMINACION DE LOS CON- TENIDOS DE HUMEDAD RESPEC- TO AL TIEMPO DE SECADO	54
3.5.2.4.	DETERMINACION DE LOS CONTE- NIDOS DE ACIDO PIRUVICO RES- PECTO AL TIEMPO DE SECADO	54
3.5.2.5.	DETERMINACION DE LAS PUN- GENCIAS RELATIVAS RESPECTO AL TIEMPO DE SECADO	54
3.6.	METODOLOGIA MATEMATICA PARA LA ESTIMACION DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DURANTE EL SECADO	55
3.6.1.	METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADA	55
3.6.2.	METODOLOGIA BASADA EN LAS DIFERENCIAS FINITAS	57
3.7.	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA MEDIANTE LOS PROGRAMAS COMPUTACIONALES.	59
3.7.1.	METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADA	60
3.7.2.	METODOLOGIA BASADA EN LAS DIFERENCIAS FINITAS	60

3.8.	METODOLOGIA ESTADISTICA PARA LA VALIDACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS DE SECADO	61
3.9.	METODOLOGIA MATEMATICA PARA DESCRIBIR LA CINETICA DE LA PERDIDA DE PUNGENCIA DE LA CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO	62
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	65
4.1.	SELECCION DE LA MATERIA PRIMA	65
4.2.	DETERMINACION DE LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD INICIAL	66
4.3.	DETERMINACION DE LAS HUMEDADES RELATIVAS	68
4.4.	DETERMINACION DE LAS HUMEDADES DE EQUILIBRIO	68
4.5.	DETERMINACION DE LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD RESPECTO AL TIEMPO DE SECADO	69
4.6.	DETERMINACION DE LOS CONTENIDOS DE ACIDO PIRUVICO DE CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO	72
4.7.	DETERMINACION DE LAS PUNGENCIAS RELATIVAS RESPECTO AL TIEMPO DE SECADO	74
4.8.	ESTIMACION DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DEL AGUA DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA BLANCA	75
4.8.1.	METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADA	75
4.8.2.	METODOLOGIA BASADA EN LAS DIFERENCIAS FINITAS	82
4.8.3.	COMPARATIVO ENTRE LOS VALORES DE DIFUSIVIDAD EFECTIVA ESTIMADOS POR AMBOS METODOS	87

4.9.	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA	88
4.9.1.	METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGUES	88
1	MODIFICADA	
4.9.2.	METODOLOGIA BASADA EN LAS	90
	DIFERENCIAS FINITAS	
4.9.3.	COMPARATIVO ENTRE AMBOS METODOS	91
	DE SIMULACION	
4.10.	VALIDACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS	120
4.11.	CINETICA DE LA PERDIDA DE PUNGENCIA	123
	DE CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO	
V.	CONCLUSIONES	126
VI.	RECOMENDACIONES	128
VII.	BIBLIOGRAFIA	129
VIII.	ANEXOS	138

INDICE DE CUADROS

N°	TITULO	Pag.
1	COMPOSICION QUIMICA DE BULBOS DE CEBOLLA (% BASE HUMEDA)	5
2	VALORES DE LOS PARAMETROS v , λ_p y a .	21
3	RESULTADOS DEL ANÁLISIS PROXIMAL EN CEBOLLA BLANCA	65
4	CONTENIDOS DE HUMEDAD INICIAL DE LAS MUESTRAS DE CEBOLLA BLANCA.	67
5	HUMEDADES RELATIVAS DEL AIRE DE SECADO	68
6	VALORES DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LAS MUESTRAS DE CEBOLLA BLANCA	69
7	CONTENIDO DE ACIDO PIRUVICO EN CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO (mg ác.pirúvico/g mat.seca)	72
8	PUNGENCIA RELATIVA DE CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO (%).	74
9	VALORES DE "A" Y "B" DE LA ECUACION TIPO PO- TENCIAL DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA UTILIZANDO LA METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADA.	82
10	VALORES DE C_0 , C_1 , C_2 , C_3 Y C_4 DE LA ECUACION TI- PO POLINOMIAL DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA UTI- LIZANDO LA METODOLOGIA DE DIFERENCIAS FINITAS.	84
11	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 1 m/s: METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO	93
12	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 2 M/S: METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO	95
13	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 1 m/s: METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO	97
14	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 2 M/S: METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO	99

15	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 1 m/s: METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO	101
16	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 2 m/s: METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO	103
17	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 1 m/s: METODO DE DIFERENCIAS FINITAS	105
18	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 2 m/s: METODO DE DIFERENCIAS FINITAS	107
19	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 1 m/s: METODO DE DIFERENCIAS FINITAS	109
20	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 2 m/s: METODO DE DIFERENCIAS FINITAS	111
21	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 1 m/s: METODO DE DIFERENCIAS FINITAS	113
22	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 2 m/s: METODO DE DIFERENCIAS FINITAS	115
23	PARAMETROS ESTADISTICOS P Y RMS PARA LA SIMULA- CION DEL SECADO, UTILIZANDO LA METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADA	122
24	PARAMETROS ESTADISTICOS P Y RMS PARA LA SIMULA- CION DEL SECADO, UTILIZANDO LA METODOLOGIA DE DIFERENCIAS FINITAS	122
25	VALORES DE LAS CONSTANTES "K" PARA LA ECUACION DIFERENCIAL DE PRIMER ORDEN QUE DESCRIBE LA CINETICA DE PERDIDA DE PUNGENCIA DE LA CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO.	124

INDICE DE FIGURAS

N°	TITULO	Pag.
1	VIA DE FORMACION DEL FACTOR LACRIMOGENO EN CEBOLLA	10
2	REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LOS PUNTOS NODALES EN UNA PLANCHA INFINITA	38
3	ESQUEMA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL DE SECADO	47
4	FLUJO DE OPERACIONES PARA LA OBTENCIÓN DE CEBOLLAS EN POLVO,	49
5	DISEÑO EXPERIMENTAL DEL SECADO	52
6	METODOLOGIA PARA LA SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA Y EVALUACION EN LA PERDIDA DE SU PUNGENCIA	64
7	CURVAS EXPERIMENTALES DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA	71
8	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL: METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO	76
9	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL: METODO DE DIFERENCIAS FINITAS	78
10	DIFUSIVIDAD EFECTIVA EN CEBOLLA BLANCA: METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO	85
11	DIFUSIVIDAD EFECTIVA EN CEBOLLA BLANCA: METODO DE DIFERENCIAS FINITAS	86
12	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA: 50C, 1m/s	117
13	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA: 50C, 2m/s	117
14	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA: 60C, 1m/s	118
15	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA: 60C, 2m/s	118
16	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA: 70C, 1m/s	119
17	SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA: 70C, 2m/s	119
18	PERDIDA DE PUNGENCIA EN CEBOLLA BLANCA DURANTE EL PROCESO DE SECADO	125

INDICE DE ANEXOS

N°	TITULO
1	DETERMINACIÓN ESPECTROFOTOMETRICA DE ÁCIDO PIRÓVICO EN CEBOLLAS (METODO DE SCHWIMMER Y WESTON, 1961)
2	PRINCIPIO DEL STRAIN GAUGE.
3	MATRIZ DESARROLLADA DEL SISTEMA DE ECUACIONES LINEALES. METODO DE DIFERENCIAS FINITAS - ESQUEMA IMPLÍCITO.
4	VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 1 m/s
5	VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 2 m/s
6	VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 1 m/s
7	VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 2 m/s
8	VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 1 m/s
9	VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 2 m/s
10	LISTADO DEL PROGRAMA DE COMPUTO DEL METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO
11	LISTADO DEL PROGRAMA DE COMPUTO DEL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS
12	CALCULOS PARA LA DETERMINACION DE LAS CONSTANTES "K" DE LA ECUACION DIFERENCIAL DE PRIMER ORDEN

SIMBOLOS

A	Area superficial (m^2) Constante determinado experimentalmente en el presente trabajo de investigación ($m^2/s^{1/2}$)
a	Constante definida en el Cuadro 2 (m)
B	Constante determinado experimentalmente en el presente trabajo de investigación (sin unidades)
b	Constante determinada experimentalmente en el modelo de Alvarez y Legües (sin unidades)
C	Constantes (pg.59)
c	Constante determinado experimentalmente, Ver ecuaciones 5 y 6.
D	Difusividad (m^2/s)
E	Humedad adimensional (sin unidades).
Fo	Número de Fourier (sin dimensiones). $Fo = D_p t/a^2$
J_0	Parámetro del modelo de Alvarez y Legües.
HR	Humedad relativa (%)
k	Parámetro del modelo (ec.9), (s^{-1}), $k=f(T,v)$
L	Espesor de la plancha (m)
M	Humedad puntual o nodal (Kg.agua/Kg.materia seca)
\bar{M}	Humedad promedio (Kg.agua/Kg.materia seca)
\dot{M}	Flujo másico de agua (kg.agua/s)
\bar{M}_s	Parámetro: $\bar{M}_s = \bar{M} - \bar{M}_{RH=f}$
m_s	Masa de materia seca (Kg)
n_v	Flujo másico de agua por unidad de área ($Kg.agua/m^2s$)
P	Parámetro estadístico (%) Pungencia relativa (%)
p	Constante determinada experimentalmente en el trabajo de investigación ($m^2/s^{1/2}$)
q	Constante determinada experimentalmente en el trabajo de investigación (sin dimensiones)
R	Semiespesor de una plancha infinita secada por ambos lados o radio de una esfera (m)
AR	Distancia entre nodos (m)
r	Distancia de recorrido del agua (m)
RMS	Parámetro estadístico (%)

T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
dt	Incremento de tiempo (s)
t	Tiempo (s)
u	Parámetro del modelo (ec.9), (sin dimensiones)
v	Constante definida en el Cuadro 2 (sin dimensiones); velocidad del aire (m/s).
W	Constante (m^2/s)
β	Constante de la ecuación 8
ρ	Densidad aparente (Kg/m^3)
λ	Constante de la ecuación 8
λ_1	Constante definida en el Cuadro 2 (sin dimensiones)
Γ	Función paramétrica gamma de la ecuación 8

Subíndices:

bh	bulbo húmedo
bs	base seca; bulbo seco
ef	efectiva
eq	de equilibrio
exp	experimental
m	media
pred	predecido
N	nodo superficial, es decir cuando $r=R$.
n	nodo n
n-1	nodo n-1
n+1	nodo n+1
0	inicial
n, n+1	Desde n hasta n+1
n-1, n	desde n-1 hasta n

Superíndices:

t	al tiempo t
t+dt	al tiempo t+dt
t-dt	al tiempo t-dt

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se desarrollaron dos metodologías matemáticas capaces de describir las curvas típicas del proceso de secado de alimentos: la metodología de Alvarez y Legües modificada, y la metodología de diferencias finitas. Estas metodologías fueron producto de un análisis físico y matemático del proceso difusivo no lineal del agua durante el secado, y fueron transcritas a unos programas computacionales desarrollados por el autor. Finalmente estas metodologías fueron validadas en función a los datos experimentales de secado obtenidos a partir de cebolla blanca, en seis tratamientos diferentes.

Se desarrollaron dos metodologías numéricas capaces de resolver el problema físico. El primero, basado en el método descrito por Alvarez y Legües, donde se parte del desarrollo de la segunda Ley de Fick expresada en términos de una serie infinita, y se aplica un método iterativo para estimar la difusividad en función al tiempo. El segundo, basado en el método de diferencias finitas, donde se parte de un análisis físico del fenómeno de transferencia de masa a nivel de nodos

obteniéndose un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas, seguido de un método de optimización del ajuste.

Haciendo uso del Lenguaje Quick Basic se desarrollaron los programas computacionales correspondientes a cada método. Un amplio conocimiento acerca de la aplicación de métodos matemáticos fue necesario. Se incorporan a los programas de cómputo subrutinas bastante útiles, citando entre ellas: método de sobrerelajación, regla de Simpson, método de mínimos cuadrados, método de Newton (de la tangente), método de ajuste a curvas del tipo potencial, entre otros. Los datos de salida del programa de cómputo son los valores de difusividad efectiva a través del tiempo, los valores de humedad predecidas, y, los parámetros estadísticos P y RMS.

Los programas computacionales fueron validados aplicando datos experimentales de curvas de humedad versus tiempo del secado de cebolla blanca, sometidos a seis tratamientos diferentes de temperatura, velocidad de aire y humedad relativa. El método de Alvarez y Legües arrojó valores de humedad predecidos bastante cercanos a los valores experimentales, no siendo el caso del método de diferencias finitas. Cuando se trabajó bajo el método de Alvarez y Legües, para todos los casos los valores de

RMS, que fue considerado como el parámetro estadístico más fiable, estuvieron por debajo de 11.45.

Asimismo, en un intento por evaluar los tratamientos, se controló la pérdida de pungencia a través del tiempo de secado. Se evaluó su pérdida de pungencia a través del tiempo de secado, para seis tratamientos diferentes de temperatura y velocidad de aire. La pungencia es la propiedad aromática y gustativa que tienen los ajos y cebollas. Se notó que a temperaturas mayores, la pérdida de pungencia era mayor, y que a velocidades de aire mayores, la pérdida de pungencia también se incrementaba. Se ajustaron los resultados experimentales a ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, las que expresaron la cinética de la pérdida de pungencia durante la deshidratación de estos productos. Los ajustes no resultaron buenos, pero sirvieron para indicar las tendencias de las curvas.

I. INTRODUCCION

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Alimentos, el secado puede enfocarse como un proceso combinado de transferencia de masa y de calor, que va a ir acompañado de múltiples cambios en las propiedades físicas, químicas y organolépticas del alimento, dificultando su estudio. Muchos son los autores que han intentado describir el secado en alimentos, sin embargo, resulta difícil describir matemáticamente y con un respaldo teórico, el comportamiento de difusión del agua durante el proceso de deshidratación.

Es por tales motivos que no se ha logrado obtener un modelo teórico exacto que describa el proceso de secado. Los modelos que más se ajustan a los datos experimentales, siempre han sido modelos del tipo semi-teórico, sin contar con los modelos empíricos que no aplican ningún conocimiento científico acerca del proceso difusivo.

Por otro lado, la calidad del alimento en los procesos de secado también interesa, debido a que es nuestra base para poder evaluar los diferentes tratamientos aplicados. La pérdida de algún nutriente,

metabolito, enzima, característica organoléptica, etc. serán nuestros parámetros de control dependiendo de cada producto. En el caso de cebollas, el parámetro de control es la pérdida de pungencia (olores y sabores característicos de las cebollas), la cual deberá ser debidamente atendida.

La forma deshidratada y molida de la cebolla, a parte de tener propiedades de conservación, es de tamaño uniforme y homogéneo, lo cual le confiere una presentación agradable. Este producto puede ser utilizado en diferentes industrias, tal es el caso de la industria de carnes y embutidos, en sopas, salsas y cremas concentradas, en mezclas de especias como condimentos, en aderezos, entre otros usos, por lo que se justifica su estudio.

Los objetivos de este trabajo de investigación son:

1. Simular el secado de cebolla blanca por flujo de aire caliente, utilizando el método de diferencias finitas con difusividad variable con el tiempo, y utilizando un método basado en la metodología de Alvarez y Legües.
2. Evaluar la pérdida de pungencia con respecto al tiempo de secado en cebolla blanca.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA CEBOLLA

La cebolla es una hortaliza perteneciente a la familia de las Alliaceae, de hojas envainadoras largas y jugosas. En la porción subterránea del tallo se forma el bulbo constituido por túnicas concéntricas y carnosas. Se desenvuelve bien en climas templado, frío, sub-húmedo (sierra de Arequipa y Junín), que constituye la región productora más importante del país; templado, subtropical seco (valles de la costa sur, central y norte hasta La Libertad); tropical seco (valles de la costa norte de Piura y Tumbes); tropical húmedo y muy húmedo de los valles de San Martín. En cuanto al tipo de suelo, ésta se desarrolla preferentemente en suelos francos, adaptándose bien a suelos arenosos y arcillosos (IICA, 1987).

2.1.1. CULTIVARES

Según la FAO (1992), existe un gran número de variedades de cebolla que se clasifican de acuerdo con ciertas características, tales como color, fotoperíodo y formas.

Currah y Proctor (1990), señalan que los niveles más bajos de sólidos totales son encontrados en cebollas de textura blanda, las que bulbean rápidamente. Generalmente la cebolla con poco contenido de materia seca presentan bajas cualidades para la conservación mientras que las cebollas con alto contenido de materia seca son más estables.

De otro lado, Foskett y Peterson (1950), citados por Hurst et al. (1985), afirman que las cebollas más pungentes son más estables que las cebollas débiles y la alta pungencia es usualmente encontrada en cebollas con alto contenido de materia seca. Currah y Proctor (1990), complementan la información anterior, señalando que dichas variedades pungentes poseen mejor calidad y resisten más eficazmente el crecimiento microbiano.

2.1.2. COMPOSICION QUIMICA

En el Cuadro 1 se presenta la composición química de la cebolla blanca, amarilla y roja, según reportes de diversas fuentes.

Según la FAO (s/a), la cebolla comparada con otras hortalizas frescas, tiene relativamente alta energía, intermedia en contenido de proteínas y es rica en calcio y riboflavina. Los mayores constituyentes químicos son:

**CUADRO 1. COMPOSICION QUIMICA DE BULBOS DE CEBOLLA
(% BASE HUMEDA)**

COMPONENTE	CEBOLLA	CEBOLLA	CEBOLLA
	BLANCA(a)	AMARILLA(b)	ROJA(b)
- Albumina	0.9	2.684	1.533
- Grasa	0.1	0.099	0.096
- Glucosa	7.4	5.777	2.257
- Materia extrac- tiva no nitrog.	7.8	19.915	8.343
- Ceniza	0.4	0.54	0.524
- Agua	91.2	70.18	86.66
- Acido fosforico	-	0.17	0.112

FUENTE: (a) Dahlen (1949), citado por Marcelo (1982)
(b) Collazos et al. (1974).

a) **Hidratos de carbono.**

Representan gran parte de la materia seca. El contenido de materia seca en varios bulbos de cebolla varía desde bajos niveles de 7 - 10% a altos niveles 15 - 20% (Currah y Proctor, 1990). Toledo (1985), señala que los mayores carbohidratos no estructurales en las cebollas incluyen a la fructosa, glucosa y sacarosa, junto con una serie de oligosacáridos como las fructosanas. Estos carbohidratos pueden llegar a ser el 80% del peso seco de los bulbos. Para la fabricación de cebolla en polvo son aconsejables las variedades con alto contenido en azúcares (Luh y Woodroof, 1973; Currah y Proctor, 1990).

b) **Proteínas.**

Según la FAO (s/a), las cebollas presentan un contenido promedio de 1.4% de proteínas. Los aminoácidos libres, son los más importantes. Kuon (1963), realizó un amplio estudio acerca de los aminoácidos en las cebollas, y demostró que las propiedades pungentes de la cebolla están relacionadas con su composición en aminoácidos, especialmente con el S-metil-cisteína. Block (1985), confirmó lo anterior.

c) **Grasas.**

No se han realizado muchos estudios acerca de la grasa presente en las cebollas. Farag *et al.* (1981), demostró que los ácidos grasos insaturados pueden ser considerados como una causa secundaria de compuestos carbonilos y están complicados en la formación de pigmentos rojos. La FAO (s/a) señala que el contenido aproximado de grasa en bulbos de cebolla, es de 0.2%.

d) **Pigmentos colorantes.**

El color rojo de algunas variedades de cebolla es debido a la presencia de antocianinas (Fuleki, 1969), mientras que el pigmento amarillo es causado por los flavonoides, principalmente por los derivados de quercetín (Brandwein, 1965). Las variedades de cebolla de bulbo blanco presentan también el pigmento quercetín pero en concentraciones mucho menores (Bernhard, 1968).

e) **Otros compuestos de la cebolla.**

Block (1985), señala que la enzima alinasa de la cebolla convierte el Precursor Lacrimógeno (PL) en el Factor Lacrimógeno (FL) de estructura $C_2H_5CH=SO$ que corresponde al nombre "S-óxido de propanotriol", sustancia que hace llorar cuando se pela una cebolla. La enzima alinasa actúa además

sobre otros sustratos, y todos ellos son sustancias azufradas, sintetizadas en ajos y cebollas mediante secuencias químicas que comienzan con el aminoácido azufrado cisteína. A partir de ellos, las alinasas producen varios tipos de ácidos sulfénicos. Los subproductos de la reacción son piruvato y amoníaco. El Factor Lacrimógeno por su parte, es muy reactivo. Al enfriar las cebollas, disminuye la volatibilidad del Factor Lacrimógeno. Al pelar una cebolla bajo un chorro de agua, se arrastra el Factor Lacrimógeno, ya que es hidrosoluble.

2.1.3. PUNGENCIA

Se refiere al sabor y olor picantes y penetrantes que poseen las cebollas y otras especies del género *Allium* tales como el ajo y la cebollita china (Currah y Proctor, 1990).

Según Schwimmer y Weston (1961), la pungencia de la cebolla se eleva como resultado de la interacción de compuestos azufrados como los derivados del L-cisteína sulfóxido y enzimas del tipo alinasa cuando se destroza la integridad de los tejidos de la cebolla por trituración o por otros métodos. La enzima alinasa, que está presente en las vacuolas de las células, hidroliza el alquil o alquenil cisteína sulfóxidos los cuales son

dispersados en el citoplasma y varios sulfuros son formados los cuales constituyen los sabores típicos de las cebollas. En la Figura 1, se muestra la reacción de formación del factor lacrimógeno (FL) a partir del precursor lacrimógeno (PL).

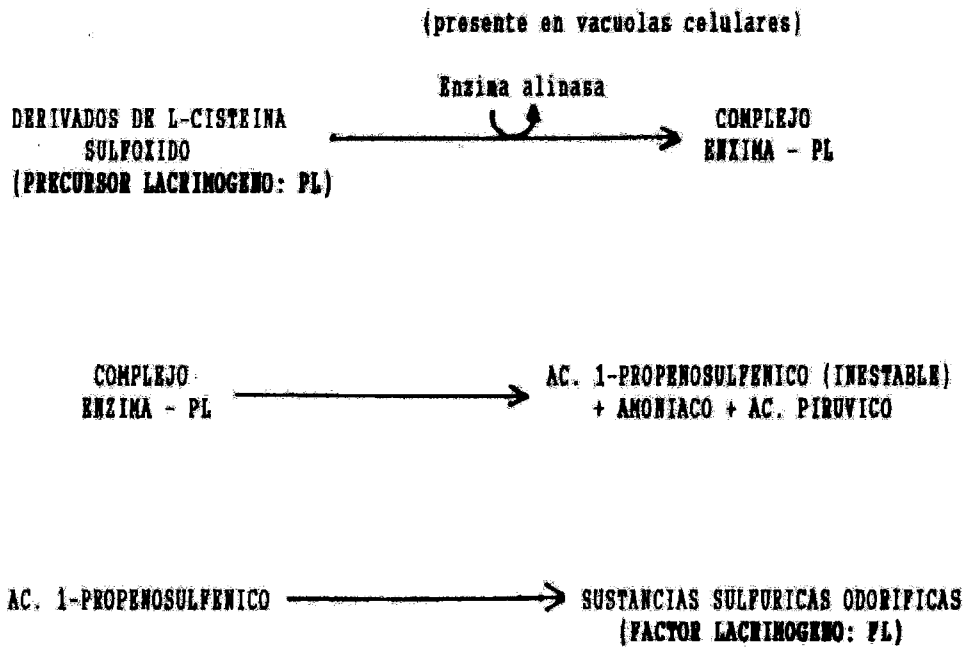
El mismo autor señaló que las cebollas pueden ser clasificadas de acuerdo a su contenido de ácido pirúvico en las siguientes clases:

Débiles	2 a 4	uM ac.pirúvico/g cebolla
Intermedios	8 a 10	uM ac. pirúvico/g cebolla
Fuertes	15 a 20	uM ac. pirúvico/g cebolla

La pungencia, es un término subjetivo que engloba las características de sabor y olor picantes y penetrantes que poseen las cebollas y otras especies del género *Allium*, tales como el ajo y la cebollita china. Se puede entonces decir que la pungencia es una característica intrínseca de este tipo de productos y que va a depender de la variedad, de las condiciones de cultivo y de las condiciones del tratamiento post-cosecha (Currah y Proctor, 1990).

Sin embargo, cuando estos productos van a ser sometidos a un procesamiento, tal como el secado, entonces otros factores afectarán la pungencia de la

**Fig.1: VIA DE FORMACION DEL FACTOR
LACRIMOGENO EN CEBOLLA**



FUENTE: BLOCK (1985).

cebolla. La temperatura y la velocidad del aire de secado son los factores principales en la pérdida de esta propiedad en estos productos, durante el secado (Schwimmer et al., 1964; Bernhard, 1968).

Para poder realizar estudios más estrictos en cuanto a la pérdida de pungencia, muchos investigadores pensaron en valorar numéricamente esta propiedad, y es entonces que Schwimmer y Weston (1961), descubren una metodología sencilla capaz de "cuantificar" la pungencia de las cebollas. Esta metodología tiene un fundamento teórico, que parte de que la pungencia de la cebolla es una consecuencia de la formación de compuestos característicos los que se originan de la reacción enzimática entre compuestos azufrados y enzimas del tipo alinasa cuando se destroza la integridad de los tejidos. Estos mismos autores señalaron que en estas reacciones se forma como un compuesto secundario el ácido pirúvico, por lo que se concluyó que el desarrollo enzimático de este compuesto es una buena medida de la pungencia de las cebollas en vista de que guardan una relación razonable.

Para el caso de cebollas deshidratadas otros autores demostraron que a pesar de que la reacción causante de la pungencia es una reacción enzimática, el método de análisis sigue siendo efectivo, pues no existe una inactivación enzimática en el rango de temperaturas de

secado. El sustrato para estas mismas reacciones tampoco es alterado (Schwimmer *et al.*, 1964).

2.2. SECADO DE ALIMENTOS

2.2.1. DEFINICION

El secado o deshidratación de alimentos consiste en la eliminación parcial del agua contenida en ellos, bajo condiciones de control que producirán solo el mínimo de cambios o idealmente ningún cambio en sus propiedades. Eliminando una parte del agua, el desarrollo de los microorganismos es bloqueado. La cantidad de agua que debe eliminarse depende del producto (ITDG, 1988).

2.2.2. SECADO DE ALIMENTOS POR AIRE CALIENTE

En este tipo de secado, el material es colocado sobre bandejas, canastillas, silos o contenedores, dependiendo del método y se insufla aire caliente a través de la masa hasta lograr el secado (Henderson *et al.*, 1966).

Al secar un sólido húmedo con aire caliente, el aire aporta el calor al sistema para lograr la evaporación de

la humedad y también actúa como gas portador para eliminar el vapor de agua que se forma en la vecindad de la superficie de evaporación (Brooker et al., 1978).

Mazza (1984) señala que el secado de alimentos por aire caliente envuelve vaporización del agua contenida dentro del alimento y remoción del vapor a través de la corriente de aire. Además, el fenómeno de secado comprende simultáneamente un mecanismo de transferencia de masa y de transferencia de calor. El calor es transportado hasta el alimento por convección, conducción e irradiación del medio externo. La masa de agua es transportada por difusión y convección.

Para el estudio de fenómenos de secado se deben mantener constantes las magnitudes que tienen influencia; como son: temperatura, humedad y velocidad del aire que se desplaza sobre la sustancia estudiada (Heldman, 1981; citado por Rodríguez et al., 1987).

Los procesos de secado utilizando aire caliente pueden ser a su vez continuos, semi-continuos o por batch. Por otro lado pueden disponer de flujo de aire en co-corriente, en contra-corriente, en paralelo, transversalmente, o simplemente sin flujo (Van Arsdel, 1963).

2.2.3. PERÍODOS DE SECADO POR AIRE CALIENTE

Geankoplis (1993), afirma que el proceso de secado se divide normalmente en tres etapas diferentes:

2.2.3.1. Período de ajuste

Este período representa el calentamiento sufrido por el alimento sólido hasta alcanzar su valor de equilibrio. Este período inicial de ajuste con estado inestable suele ser bastante corto y generalmente se ignora en el análisis de los tiempos de secado (Geankoplis, 1993).

2.2.3.2. Período de secado a velocidad constante

Está determinada solamente por las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo de aire (Alvarez et al., 1986). Durante este período, la superficie del sólido está al principio muy mojada y sobre ella existe una película de agua continua, la cual está siempre sin combinar y actúa como si el sólido no estuviese presente. Por lo mismo, su temperatura se fija en un valor constante, cercana a la temperatura del bulbo húmedo (Geankoplis, 1993).

2.2.3.3. Período de secado a velocidad decreciente

La importancia relativa de estos mecanismos depende de la naturaleza del material sólido, tipo de unión entre la humedad y el resto de los constituyentes del sólido, la humedad, temperatura y presión en los poros, etc. Todos son parámetros de muy difícil determinación experimental, dadas las complejas estructuras de los materiales biológicos y en consecuencia la evaluación de la contribución individual de cada mecanismo no es posible (Alvarez *et al.*, 1986).

En este período la velocidad de secado decrece continuamente y se requieren mayores tiempos para lograr contenidos bajos de humedad (Saravacos y Charm, 1962). La teoría indica la existencia de dos períodos de velocidad decreciente, sin embargo en la práctica y para la mayoría de los casos, no hay una discontinuidad definida (Geankoplis, 1993).

2.2.4. FACTORES QUE AFECTAN EL SECADO POR AIRE CALIENTE

2.2.4.1. Factores internos

Van Arsdel (1963), señala que los factores internos que afectan al secado por aire caliente son aquellos que

dependen de mecanismos físicos de migración de agua, conocidos como difusión molecular y flujo capilar. El mismo autor resalta que predominan fuerzas de superficie en poros y capilares, resultantes de la composición química estructural del material a secarse, y que definen al producto como higroscópico o no higroscópico.

2.2.4.2. Factores externos

Dentro de los diversos factores que influyen en el proceso de secado, tenemos:

- **Tamaño, forma y arreglo del material a secar.**- Diferencias pequeñas en el grosor del alimento a secar puede causar cambios significativos en el tiempo de secado. La diferencia es evidente en todas las etapas del secado, pero es mucho más acentuado en el rango de bajas humedades que al comienzo. En cuanto al área superficial, numerosos trabajos han demostrado que exponiendo un mayor área del alimento al contacto del aire caliente, el proceso de secado se multiplica (Van Arsdel, 1963).

- **Temperatura del aire.**- A mayores temperaturas, menores tiempos de secado. Puede ocurrir que en los primeros momentos del secado, es decir en los rangos de humedades altas, no se evidencie claramente estas

diferencias, sin embargo en los rangos de bajas humedades, estas diferencias se acentúan (Van Arsdel, 1963). Por otro lado, temperaturas muy altas de secado pueden causar daños físicos y químicos al producto, severos o leves, dependiendo de la naturaleza y composición del material biológico, lo cual es indeseable (Brooker et al., 1973). Si el secado ocurre a temperaturas relativamente altas puede presentarse en forma simultánea un endurecimiento superficial debido a la formación de una capa de células muy unidas entre sí, que produce una barrera a la migración de humedad (Geankoplis, 1993).

- **Velocidad del aire.**— A mayores velocidades de aire mayores velocidades de secado y viceversa. Por otro lado, un incremento en la velocidad del aire acompañado de turbulencia en su flujo, produce una proporción mayor de aire secante que pasará a través de las capas a deshidratarse (Van Arsdel, 1963).

- **Depresión del bulbo húmedo.**— El factor más importante correlacionado con la velocidad de secado es la depresión del bulbo húmedo del flujo de aire que pasa a través del producto, es decir la diferencia entre la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire (Van Arsdel, 1963).

2.3. TRANSFERENCIA DE MASA EN EL SECADO DE ALIMENTOS

2.3.1. LA DIFUSION DEL AGUA DURANTE EL SECADO DE ALIMENTOS

Van Arsdel (1963), considera que las primeras fases del secado de alimentos húmedos se lleva a cabo a través de fenómenos de flujo capilar, y que las últimas etapas son indiscutiblemente gobernadas por fenómenos de difusión.

La difusión másica del agua es un mecanismo básico bien aceptado para describir el movimiento de la humedad en alimentos y la ley de Fick ha sido usada para la descripción matemática del proceso. Sin embargo, no hay acuerdo general acerca de la naturaleza exacta de la fuerza impulsadora para el secado (Alvarez *et al.*, 1986).

Se acepta que durante el secado ocurren simultáneamente difusión líquida y de vapor. En forma cualitativa es claro que cuando la humedad del sólido es alta, el mecanismo controlante será el de difusión líquida, y a bajos contenidos de humedad, la difusión de vapor será preponderante, pero no se puede evaluar su contribución individual (Alvarez *et al.*, 1986).

Los alimentos tienen generalmente una estructura heterogénea y esto hace difícil tener una idea precisa del mecanismo de difusión; es por ello que debe determinarse experimentalmente un coeficiente de difusión efectiva (Djelveh *et al.*, 1989).

Cuando el secado se verifica por evaporación de la humedad del área expuesta del sólido, la humedad debe desplazarse desde el interior del sólido hacia la superficie. La difusión de la humedad líquida se verifica cuando existe una diferencia de concentración desde el interior del sólido y la superficie. Este método de transporte de humedad es el que casi siempre se presenta con sólidos no porosos, donde se forman soluciones de una sola fase con la humedad (Geankoplis, 1993).

Debido a que no se pueden predecir teóricamente los coeficientes de difusividad efectiva, ya que los alimentos presentan estructuras muy complejas, los datos experimentales obtenidos de las curvas de secado son necesarios (Marousis *et al.*, 1989; Karathanos *et al.*, 1990).

Un sólido poroso contiene poros y canales interconectados de diversos tamaños. A medida que se evapora el agua, se forma un menisco de líquido en cada poro en el interior del sólido. Esto origina las fuerzas

capilares por la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas constituyen el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie. Los poros pequeños desarrollan fuerzas mayores que las producidas por poros más grandes (Geankoplis, 1993).

La contracción del sólido generalmente no se considera en la interpretación del proceso de secado. Los sólidos rígidos no se contraen apreciablemente, pero materiales fibrosos o coloidales tales como vegetales, frutas y otros alimentos sufren contracción, que pueden afectar tanto las propiedades físicas del material como también sus propiedades de transporte (difusividad, conductividad, etc.) las cuales pueden esperarse que varíen continuamente durante el secado (Geankoplis, 1993).

2.3.2. MODELOS MATEMATICOS EN EL SECADO DE ALIMENTOS

Dado la naturaleza del trabajo de investigación, solo se discutirán los modelos teóricos o semiteóricos, obviando los modelos empíricos que no aportan ningún conocimiento acerca del proceso de transferencia de masa.

Alvarez y Legües (1986), desarrollaron un modelo matemático para uso en la interpretación de las curvas

típicas experimentales de secado de agroproductos. Dicho modelo se basa en la solución de la ecuación de Fick de la difusión no estacionaria con un coeficiente de difusividad efectiva variable con el tiempo. Los resultados obtenidos fueron aplicados a la deshidratación de uva sultanina, papas, rosa mosqueta, maíz y trigo, obteniéndose una buena correlación con los datos experimentales de humedad versus tiempo. Así mismo, estos autores propusieron un modelo simplificado semiteórico adecuado para la interpretación de los datos experimentales de los agroproductos estudiados. Los modelos con los que se trabajó fueron:

$$\frac{\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2v}{\lambda_n^2} \exp \left[-\frac{\lambda_n^2}{(1+b)} \left(\left(1 + \frac{D_0 t}{a^2}\right)^{(1+b)} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \exp \left[-\frac{\lambda_n^2}{(1+b)} \left(\left(1 + \frac{D_0 t}{a^2}\right)^{(1+b)} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

donde:

a, v, λ_n : Constantes definidas en el Cuadro 2.

CUADRO 2: Valores de los parámetros v, λ_n y a .

Geometría	v	λ_n	a
Placa infinita	1	$(2n-1)\pi/2$	Semiespesor
Cilindro infinito	2	$J_0(\lambda_n) = 0$	Radio
Esfera	3	$n\pi$	Radio

Karathanos et al. (1990), realizaron una comparación entre dos métodos de estimación de la difusividad del agua durante el secado de suspensiones de almidón y propusieron los respectivos modelos matemáticos para la interpretación de las curvas de secado. Los métodos utilizados fueron el método de las pendientes de la curva de secado descrito por Saravacos y Raouzeos (1984) y un método por simulación en computadora, basado en la resolución de la segunda Ley de Fick por diferencias finitas, asumiendo el problema como del tipo no lineal, es decir de difusividad variable. Ambos métodos dieron resultados similares en geles ricos en amilopectina (baja porosidad), donde la difusión de agua es predominante. Los resultados fueron variables en el caso de almidón granular hidratado y en geles ricos en amilosa (alta porosidad), donde la difusión de vapor es predominante.

Para la estimación de la difusividad efectiva por el método de las pendientes, se consideraron los siguientes modelos matemáticos, dados por Cranck (1975), citado por Karathanos et al. (1990):

$$\frac{\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4 R^2} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{4 R^2} \right] \quad (4)$$

La ecuación (3), se cumple para planchas infinitas y la ecuación (4), para esferas. Estas ecuaciones no son sino el desarrollo de la segunda Ley de Fick, expresado bajo la forma de una serie infinita. Asimismo, Karathanos *et al.* propusieron ecuaciones del tipo potencial y del tipo exponencial para la estimación de la difusividad efectiva de materiales porosos:

$$D_{\text{eff}} = c (\bar{N}_{\text{emp}})^b \quad (5)$$

$$D_{\text{eff}} = c e^{b \bar{N}_{\text{emp}}} \quad (6)$$

Para la estimación de la difusividad efectiva por el método de diferencias finitas, se partió de la segunda Ley de Fick, la que se representa bajo el siguiente modelo matemático:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (7)$$

Asimismo, Karathanos *et al.* propusieron una ecuación que gobierna el comportamiento de la difusividad, el cual se relaciona con el contenido de humedad:

$$D_{\text{eff}} = \frac{\lambda^{\beta} \bar{N}_e^{\beta-1} 10^{-3}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\lambda \bar{N}_e) \quad (8)$$

La distribución de temperaturas y humedades en los alimentos deben ser estimados para poder optimizar el proceso de secado (Sakai y Hayakama, 1993; Tsukada *et al.*, 1991). Así, en un estudio reciente realizado por Sakai y Hayakama (1993), se desarrolló un modelo matemático para simular la transferencia de calor y de

masa durante el secado de alimentos de forma compuesta. Este modelo considera todas las propiedades termodinámicas del flujo de calor y humedad (conducción, flujos de presión de calor, potencial de transferencia de masa, gradientes de presión, evaporación y/o condensación interna del agua, resquebrajamiento por calor o humedad, coeficiente de transferencia superficial de calor y de masa, calor específico, etc). El desarrollo del modelo es bastante complejo y fue descrito por Tsukada *et al.* (1991).

Legües *et al.* (1982), estudiaron el secado de uva sultanina en un secador de laboratorio lecho fijo con circulación de aire a través, para diferentes condiciones del aire de secado (temperatura, humedad y velocidad). El modelo utilizado, el cual arrojó resultados satisfactorios, se basó en la Ley de Fick con difusividad variable, y está dado por:

$$\frac{\bar{M}_{prod} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \exp [k (1 - (1 + t)^{-n})] \quad (9)$$

Mishkin *et al.* (1982), en un estudio de optimización del proceso de secado de alimentos por flujo de aire caliente, propuso el modelo representado por el desarrollo de la Ley de Fick bajo la forma de una serie infinita, con un valor de difusividad variable con el tiempo, para formas geométricas tipo plancha infinita, el

cual se escribe:

$$\bar{M}_{pred} = \bar{M}_{eq} + (\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}) \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \phi_3 \quad (10)$$

$$\phi_i = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{L_i^2} \int_0^t D_{sef} dt \right] \quad (11)$$

donde:

$$i = 1, 2, 3.$$

Mishkin et al. (1983), estudiaron un método de optimización para la deshidratación de papas, y propusieron la segunda Ley de Fick para representar la transferencia de masa durante el proceso de secado. Utilizaron el método de diferencias finitas para la solución de la ecuación diferencial ordinaria.

Liou (1982), desarrolló un modelo aproximado para estimar la difusión no lineal, la que consideró como una función del tipo potencial respecto a la concentración de humedad durante el secado. Consideró dentro del modelo diversas propiedades físico-químicas del alimento y asumió encogimiento del material. El modelo es bastante complejo, y un extenso análisis es realizado en su trabajo.

Pezzuti et al. (1991), simularon la cinética de secado de ajo y cebolla. Para el modelamiento del proceso de secado, partieron del balance macroscópico diferencial

de masa aplicado a una placa de espesor finito y area transversal A que se seca en una corriente de aire que circula paralelo a las caras circulares:

$$\frac{dM}{dt} = -n_v \frac{2 A}{m_s} \quad (t=0, M=M_0) \quad (12)$$

Para el flujo másico de agua n_v , se emplearon diferentes expresiones: durante un pequeño intervalo de tiempo inicial se consideró que el agua se evapora como si estuviese libre (control puramente externo), en una segunda etapa se empleó un modelo difusivo con control mixto y la zonas de bajas humedades se representó mediante un modelo difusivo puro.

2.3.3. ENFOQUE NO LINEAL DEL PROBLEMA DE TRANSFERENCIA DE MASA

En la teoría del secado, la difusividad juega un rol muy importante y por ser éste un parámetro que no se pueda medir experimentalmente en forma directa, es necesario desarrollar metodologías matemáticas teóricas, o semiteóricas, que permitan calcular su valor indirectamente, por ejemplo a través de curvas experimentales de humedad versus tiempo (Alvarez *et al.*, 1986; Marousis *et al.*, 1989; Djelveh *et al.*, 1989; Karathanos *et al.*, 1990).

La aplicación de la segunda ley de Fick describe

matemáticamente el proceso de secado, y ha sido utilizado por muchos autores para predecir e interpretar este proceso. El modelo de difusión puede escribirse de manera muy general bajo la forma de la ecuación (7).

Hasta hace algunos años, se consideraba al coeficiente de difusividad efectiva constante, sin embargo numerosos trabajos han demostrado que este valor es variable con el tiempo y con la distancia de recorrido (Alvarez *et al.*, 1986; Karathanos *et al.*, 1990).

Para el caso donde se considera al valor de la difusividad efectiva constante, Crank (1975), citado por Alvarez *et al.* (1986), da soluciones para esta ecuación, para diversas situaciones físicas. La solución de la segunda ley de Fick considerando un caso de transferencia de masa unidireccional, en términos de una serie infinita para diversas geometrías es como sigue:

$$\frac{M_{\text{pred}} - M_{\text{eq}}}{M_0 - M_{\text{eq}}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2v}{\lambda_n^2} \exp \left[-\lambda_n^2 \frac{D_{\text{ef}}}{a^2} t \right] \quad (13)$$

donde v , λ_n y a , se definen para cada geometría de acuerdo a los valores indicados en el Cuadro 2. Los valores de la difusividad efectiva D_{ef} obtenidos de la aplicación de la ecuación (13) a datos de secado de alimentos han tenido difícil interpretación y en algunos casos conducen a resultados anómalos en el sentido que de

un trabajo a otro la difusividad efectiva varía fuertemente para un mismo material y de una forma poco lógica (Alvarez et al., 1986).

Alvarez et al. (1986), señalan que las formas geométricas características son placa, cilindro y esfera. En secado se suele usar la expresión de difusión unidireccional, integrada con las siguientes suposiciones, las cuales son usadas comúnmente en los trabajos de secado:

- El producto tiene una humedad inicial uniforme
- No existe resistencia externa a la transferencia de calor y masa, de modo que la superficie está en equilibrio con el medio gaseoso. Esta condición podría no ser real para todo el tiempo de secado, sin embargo, se usa como una simplificación típica en el secado de alimentos.
- Las condiciones externas del aire de secado no cambian durante el proceso (temperatura, humedad relativa y velocidad).
- El sólido es simétrico.

En los últimos años, se ha demostrado que el valor de la difusividad másica del agua durante el secado de alimentos no es un valor constante, sino que varía a través del proceso (Alvarez et al., 1986; Karathanos et al., 1990; Sakai et al., 1993). Por lo tanto, el proceso

de secado puede enfocarse como un problema de transferencia de masa con un coeficiente de difusividad variable con el tiempo, haciendo de la ecuación diferencial una ecuación parcial no lineal. Para este tipo de problemas es difícil obtener una solución exacta y no es posible su solución por métodos analíticos, sino solamente por métodos numéricos mediante programas computacionales.

Es importante destacar que en base a las consideraciones anteriores el coeficiente de difusividad efectiva definido por la ecuación (7) no debe ser interpretado como un coeficiente de difusión molecular cuando es aplicado al proceso de deshidratación de un alimento, sino como un coeficiente de una naturaleza más compleja en el cual se incluyen diversos efectos (Alvarez et al., 1986).

Como se ha podido observar, el transporte de humedad dentro del sólido puede deberse a varios mecanismos que actúan simultáneamente, sin embargo, se acepta generalmente que el mecanismo que controla, a temperaturas moderadas, como las usadas para el secado de productos biológicos, es la difusión (Karathanos et al., 1990). En este caso, la mayoría de las investigaciones se han basado en la aplicación de la segunda ley de Fick, la cual es gobernada por una ecuación diferencial parcial de

segundo orden.

La resolución de la ecuación diferencial puede ejecutarse mediante métodos analíticos o métodos numéricos, sin embargo, si se considera un valor de coeficiente de difusión no lineal, entonces la única opción de dar solución y desarrollo al problema físico, es mediante la aplicación de los métodos numéricos o métodos matemáticos (Alvarez et al., 1986).

Hsu (1983), demostró que durante el remojo de legumbres, la difusividad del agua está fuertemente influenciada por el contenido de humedad y que la ecuación de difusión que considera a la difusividad constante es inadecuada para describir las curvas de absorción. Este autor propuso un modelo basado en la segunda Ley de Fick con un valor de difusividad dependiente de la humedad. Utilizó el método de diferencias finitas para resolver la ecuación de difusión del tipo no lineal en cuerpos de forma esférica y validó su modelo al aplicarlo en semillas de soya.

2.3.4. SIMULACION DEL SECADO DE ALIMENTOS

La simulación del proceso de secado es una manera de representar matemáticamente, mediante modelos y generalmente con ayuda de programas computacionales, lo

que ocurre en la realidad con el producto a través del tiempo, dentro del secador. Así, la evaluación del proceso de secado adquiere una mayor profundidad, y esto sirve para poder establecer las condiciones óptimas de trabajo, para el diseño de secadores o en la formulación de teorías de optimización (Saguy et al., 1980; Mishkin et al., 1982; Mishkin et al., 1983; Singh et al., 1984).

Saguy et al. (1980), mencionan que la simulación requiere de una serie de ecuaciones (algebraicas, diferenciales y diferenciales parciales) que describan los aspectos del comportamiento dinámico del sistema a ser analizado.

Singh et al. (1984), señalan que para el desarrollo de una simulación computacional se requiere de la incorporación de modelos matemáticos que describan la cinética de los diversos cambios que se están evaluando.

Simular es asumir la apariencia de las características sin asumir la identidad o realidad. Significa ejercer el modelo matemático y obtener los resultados predecidos. La diferencia entre modelar y simular puede expresarse como sigue: Modelar es el desarrollo de ecuaciones, sujeciones y reglas lógicas, mientras que simular es ejercer el modelo (Ingels, 1985).

2.4. METODOS NUMERICOS

La meta de los métodos aproximados o numéricos es proporcionar técnicas convenientes para obtener información útil a partir de formulaciones matemáticas de problemas de física. Con frecuencia, este enunciado matemático no se puede resolver por métodos analíticos. O es posible que existan soluciones analíticas, pero de tal forma que no sean convenientes para la interpretación numérica directa (Perry y Chilton, 1984).

Morales (1993) señalan que los métodos numéricos han sido utilizados para manejar problemas matemáticos con condiciones de frontera y condiciones iniciales, y una diversidad de geometrías regulares e irregulares. Como estos métodos involucran cálculos sucesivos, requieren del uso de la tecnología de la computación (software y hardware apropiados).

Dentro de los métodos numéricos para dar solución a una ecuación diferencial de transferencia de masa en caso transiente, se tienen el método de elementos finitos y el método de diferencias finitas (Morales, 1993). El primero es un método más completo, que ha sido desarrollado para los casos de geometrías regulares e irregulares, mientras que el segundo sólo para casos de geometría regular.

El caso de diferencias finitas ha sido aplicado en diversos estudios, entre los que se encuentran trabajos referentes al proceso de secado, realizados por Mishkin et al. (1983), Whitaker et al., citado por Hsu (1983), Karathanos et al. (1990), entre otros.

Otro método adecuado para simular la transferencia de humedad es el método de elementos finitos, y se han realizado numerosos trabajos por diversos autores, todos ellos de acuerdo en considerar la difusividad variable para casos de transferencia de humedad (Hong et al., 1986; Lomauro y Bakshi, 1985; Lomauro et al., 1985; Zhang et al., 1984). Aunque ninguno de ellos ha tratado el caso específico de secado, han tratado el caso inverso, es decir la hidratación, obteniendo resultados bastante confiables.

2.4.1. METODOS DE ESTIMACION DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA POR METODOS NUMERICOS:

2.4.1.1. Estimación de la difusividad efectiva no lineal durante el secado de cuerpos geométricos regulares por el método de Alvarez y Legües.

La interpretación del secado de alimentos está basado en la segunda Ley de Fick, que se expresa

bajo la forma de la ecuación 7. La solución expresada para la humedad promedio en todo el sólido se escribe bajo la forma de la ecuación 13.

Alvarez y Legües, en varios intentos por mejorar la precisión del modelo, realizaron estudios considerando a la difusividad efectiva como una función del tiempo. Sus resultados pueden ser resumidos en la siguiente ecuación general:

$$\frac{\bar{H}_{prom} - \bar{H}_{eq}}{\bar{H}_0 - \bar{H}_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2v}{\lambda_n^2} \exp \left[-\lambda_n^2 \frac{D_0}{a^2} \int_0^t E(t) dt \right] \quad (14)$$

Considerando un intervalo de tiempo Δt entre los tiempos t_{i+1} y t_i puede demostrarse que la función $E(t)$ puede calcularse para los tiempos t_{i+1} y t_i , a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E(t_i) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2v}{\lambda_n^2} \exp \left[-\frac{\lambda_n^2}{a^2} \int_0^{t_i} D_{ef} dt \right] \quad (15)$$

$$E(t_{i+1}) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2v}{\lambda_n^2} \exp \left[-\frac{\lambda_n^2}{a^2} \int_0^{t_{i+1}} D_{ef} dt \right] \quad (16)$$

Para un tiempo intermedio del intervalo $t_{\bar{1}} = (t_i + t_{i+1})/2$ se definió una difusividad efectiva promedio $D_{ef}(t_{\bar{1}})$ como:

$$D_{ef}(t_m) = \frac{\int_{t_1}^{t_{i+1}} D_{ef} dt}{t_{i+1} - t_1} \quad (17)$$

la cual puede expresarse como:

$$D_{ef}(t_m) = \frac{\int_0^{t_{i+1}} D_{ef} dt - \int_0^{t_1} D_{ef} dt}{t_{i+1} - t_1} \quad (18)$$

A partir de los datos experimentales de Humedad (M_{exp}) versus Tiempo de secado (t), se calculan los correspondientes valores de $E(t_i)$ ya que:

$$E(t) = \frac{\bar{M}_{exp} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} \quad (19)$$

Luego, para dos tiempos sucesivos t_i y t_{i+1} se calcula los valores respectivos de $\int D_{ef} dt$ mediante un procedimiento iterativo usando las ecuaciones (15) y (16). Posteriormente usando la ecuación (18), se calcula directamente $D_{ef}(t_m)$.

Al graficar los valores de D_{ef} versus t , se obtiene el comportamiento difusivo del agua en el producto durante el tiempo de secado, y se ensayan funciones tales como las que se presentan a continuación:

$f(t)$	=	1
$f(t)$	=	$1 + b Fo$
$f(t)$	=	$1 + Fo^b$
$f(t)$	=	$\exp (b Fo)$
$f(t)$	=	$(1 + Fo)^b$

donde $Fo = D_0 t / R^2$

Finalmente, se propone aquella función que mejor se ajuste a los valores obtenidos y se reemplaza la función $f(t)$ en la ecuación (14) y se obtiene la expresión final para el modelo de difusividad variable a proponer.

2.4.2.2. Estimación de la difusividad efectiva no lineal para el caso de una plancha infinita por el método de diferencias finitas.

La difusión del agua, es descrita por la segunda Ley de Fick (transferencia de masa trasiente), que para procesos de secado se escribe según la ecuación 7. Este modelo matemático se resuelve utilizando diferencias finitas bajo el esquema implícito, pues se ha demostrado que este esquema es el más apropiado para estos tipos de

problemas (Myers, 1971; Karathanos, 1990). Se consideraron las siguientes asunciones:

- Se trata de un caso de transferencia de masa unidireccional en una plancha infinita.
- Estado no estacionario o transiente.
- La difusividad efectiva es igual en todos los nodos, pero no es igual en cada tiempo.
- El encogimiento del alimento se desprecia.

Además, se conoce la humedad inicial, el espesor de la plancha, la humedad de equilibrio, la temperatura, velocidad y humedad relativa del aire de secado.

FORMULACIÓN FÍSICA

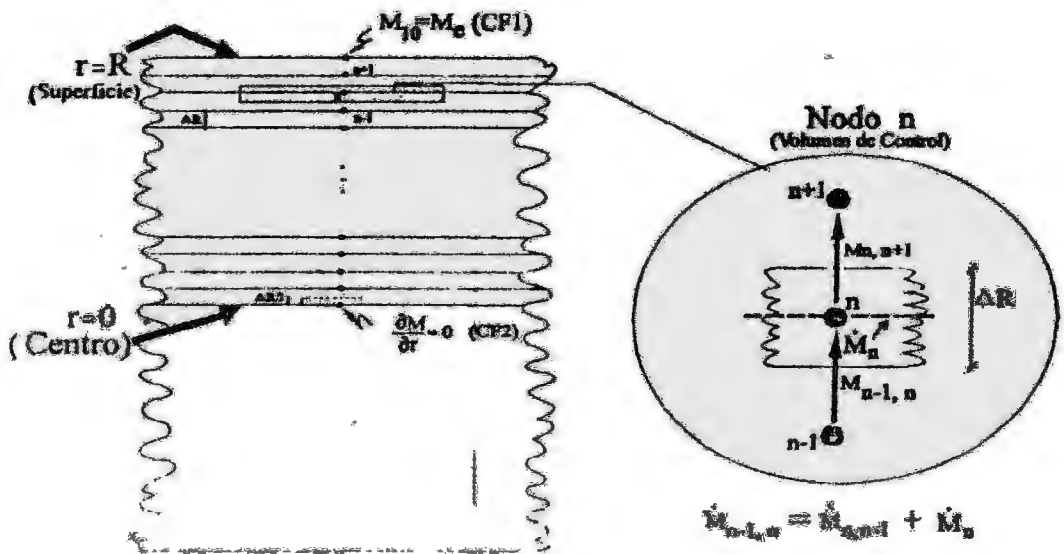
Para tales efectos, la muestra es imaginariamente dividida en "n" partes iguales ("n+1" nodos) y se establecen la condición inicial ($t = 0$) y las dos condiciones de frontera ($r=0$ y $r=R$). De esta forma la plancha queda dividida en "n-1" nodos interiores y en 2 nodos límites (centro y superficie). En la Figura 2, se esquematiza la representación física de la migración de humedad en un alimento considerado una plancha infinita.

$$t = 0 \quad 0 < r < R \quad M_1 = M_0 \quad (CI)$$

$$t > 0 \quad r = R \quad M_1 = M_{e1} \quad (CF1)$$

$$t > 0 \quad r = 0 \quad \partial M / \partial r = 0 \quad (CF2)$$

Fig. 2: REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LOS PUNTOS NODALES EN UNA PLANCHA INFINITA



Condición inicial.

La condición inicial se establece para un tiempo $t=0$ y en este momento se asume que las humedades puntuales en cada uno de los nodos es la misma e idéntica a un valor M_0 .

$$M_n = M_0 \quad (20)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N$$

N : Nodo superficial

Condición de Frontera I.

Para la superficie de la plancha ($r = R$), para un tiempo $t > 0$, la humedad en dicho nodo (nodo N) es igual a la humedad de equilibrio M_{eq} .

$$M_N = M_{eq} \quad (21)$$

Condición de Frontera II:

Para el centro de la plancha ($n=0$), se considera un aislamiento másico perfecto debido a que es una superficie aislada y no hay transferencia de masa en uno de sus lados. En este caso para un tiempo $t > 0$, y distancia $r = 0$; se cumple que:

flujo másico de entrada = flujo másico acumulado

$$\frac{\partial M}{\partial r} = 0 \quad \text{o} \quad \dot{M}_{n-1,n} = \dot{M}_n \quad (22)$$

Siendo

$$\dot{M}_{n-1,n} = \frac{DA\rho}{\Delta R} (M_{n-1} - M_n) \quad (23)$$

$$\dot{M}_n = A\rho \left(\frac{\Delta R}{2} \right) \frac{dM_n}{dt} \quad (24)$$

Reemplazando los valores de las ecuaciones (23) y (24), en la ecuación (22) :

$$A\rho \left(\frac{\Delta R}{2} \right) \frac{dM_n}{dt} = \frac{DA\rho}{\Delta R} (M_{n-1} - M_n) \quad (25)$$

Sabiendo que en el centro $n=0$, se cumple que :
 $n-1 = n+1$; y ordenando:

$$\frac{dM_n}{dt} = \frac{2D}{(\Delta R)^2} (M_{n+1} - M_n) \quad (26)$$

Integrando implícitamente:

$$\frac{M_n^t - M_n^{t-\Delta t}}{\Delta t} = \frac{2D}{(\Delta R)^2} (M_{n+1} - M_n) \quad (27)$$

$$M_n^t - M_n^{t-\Delta t} = \frac{2D \Delta t}{(\Delta R)^2} (M_{n+1} - M_n) \quad (28)$$

Haciendo

$$\frac{(\Delta R)^2}{\Delta t} = W \quad (29)$$

Luego:

$$M_n^t - M_n^{t-\Delta t} = \frac{2D}{W} (M_{n+1} - M_n) \quad (30)$$

Finalmente, la ecuación para el nodo central ($n=0$), a un tiempo t , es:

$$\left[1 + \frac{2D}{N}\right][M_n] + \left[\frac{-2D}{N}\right][M_{n+1}] = M_n^{t+\Delta t} \quad (31)$$

Condición de los puntos interiores.

Si se realiza un balance de masa para la plancha en un nodo interior "n" al tiempo "t", se tiene que el flujo másico de entrada es igual al flujo másico de salida más el flujo másico acumulado.

flujo másico de entrada = flujo másico de salida + flujo másico acumulado

$$\dot{M}_{n-1,n} = \dot{M}_{n,n+1} + \dot{M}_n \quad (32)$$

siendo :

$$\dot{M}_{n-1,n} = \frac{DA\rho}{\Delta R} (M_{n-1} - M_n) \quad (33)$$

$$\dot{M}_{n,n+1} = \frac{DA\rho}{\Delta R} (M_n - M_{n+1}) \quad (34)$$

$$\dot{M}_n = A\rho \Delta R \frac{dM_n}{dt} \quad (35)$$

Sustituyendo las ecuaciones (33), (34) y (35) en (32), se tiene:

$$\frac{DA\rho}{\Delta R} (M_{n-1} - M_n) = \frac{DA\rho}{\Delta R} (M_n - M_{n+1}) + A\rho \Delta R \frac{dM_n}{dt} \quad (36)$$

Ordenando:

$$\frac{dM_n}{dt} = \frac{D}{(\Delta R)^2} (M_{n-1} - 2M_n + M_{n+1}) \quad (37)$$

El esquema de diferenciación finita a aplicarse será el implícito o hacia atrás, por lo que después de integrar se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{M_n^t - M_n^{t-\Delta t}}{\Delta t} = \frac{D}{(\Delta R)^2} (M_{n-1} - 2M_n + M_{n+1}) \quad (38)$$

$$M_n^t - M_n^{t-\Delta t} = \frac{D \Delta t}{(\Delta R)^2} (M_{n-1} - 2M_n + M_{n+1}) \quad (39)$$

Luego:

$$M_n^t - M_n^{t-\Delta t} = \frac{D}{W} (M_{n-1} - 2M_n + M_{n+1}) \quad (40)$$

Finalmente, la ecuación que gobierna la migración de humedad en los nodos interiores es:

$$\left[-\frac{D}{W}\right][M_{n-1}] + \left[1 + \frac{2D}{W}\right][M_n] + \left[-\frac{D}{W}\right][M_{n+1}] = M_n^{t-\Delta t} \quad (41)$$

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCION

El presente trabajo de investigación, realizado durante los últimos meses del año 1994 y el transcurso del año 1995, se llevó a cabo en diversos ambientes, los cuales se citan a continuación:

- Sala de Secado del Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería (Febrero a Mayo de 1995).
- Planta Piloto de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Mayo a Junio de 1995).
- Laboratorio de análisis químicos del Departamento de Química de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Abril a Julio de 1995).
- Laboratorio de análisis químicos del Departamento de Nutrición de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Junio a Julio de 1995).
- Centro de cómputo de la Escuela de Post-Grado de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Octubre de 1994 a Noviembre de 1995).

3.2. MATERIA PRIMA

Se utilizó como materia prima la cebolla blanca (Allium cepa) variedad "Early Granex", la cual fue adquirida de un mercado local.

3.3. MATERIALES Y EQUIPOS

Durante la ejecución del trabajo experimental se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Secador de túnel, totalmente automatizado y equipado con termómetro de bulbo seco y bulbo húmedo, higrómetro y anemómetro.
- Micro computadora DLC-486. Compatible con IBM.
- Equipo completo para análisis proximal.
- Mortero eléctrico.
- Tamices, marca Soiltest, con diámetros para partículas finas.
- Selladora eléctrica de bolsas plásticas, con temperaturas y duración de sellado regulables, marca Touch-W-Seal, Modelo M-300.
- Estufa de secado, marca Memmert, modelo 500, con temperaturas regulables entre 0 y 120°C.
- Balanza de precisión, marca "Sartorius".

- Balanza analítica, marca E. Mettler, tipo H4. Capacidad máxima 160 g.
- Espectrofotómetro UV - visible, marca Shimadzu, modelo UV-160A. Computarizado, para lectura simultánea de 6 celdas.
- Higrómetro, marca Fisher Scientific modelo 11-661-7A, con rangos de humedades relativas entre 10 y 100%.
- Campanas de desecación. De vidrio, sin marca, con soluciones distintas para otorgar humedades relativas determinadas.
- Material de vidrio e instrumental indispensable para la realización de los análisis físicos y químicos.

El secador de túnel utilizado, ubicado en el Centro de Energías Renovables (CER), Facultad de Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería, opera con batches a escala de laboratorio, bajo el principio de flujo de aire caliente en paralelo o a través, dependiendo de como se instale. Este equipo está conformado por: ductos metálicos de sección cuadrada de 30 cm de lado, un ventilador centrífugo para impulsar el aire, un deshumidificador y calentador de agua, un conjunto de resistencias eléctricas, un controlador automático de temperaturas y humedades relativas, una canastilla portamuestras, un registrador de resistencias eléctricas que arroja valores de resistencias eléctricas directamente

proporcional al peso. En el equipo existe además un sistema de válvulas de compuerta que permiten: regular la velocidad del aire (de 0 a 2 m/s) y regular la humedad relativa del aire (mediante un deshumidificador y un calentador de agua). En la Figura 3 se esquematiza el secador de túnel utilizado.

3.4. METODOS DE ANALISIS

3.4.1. ANALISIS FISICO-QUÍMICOS

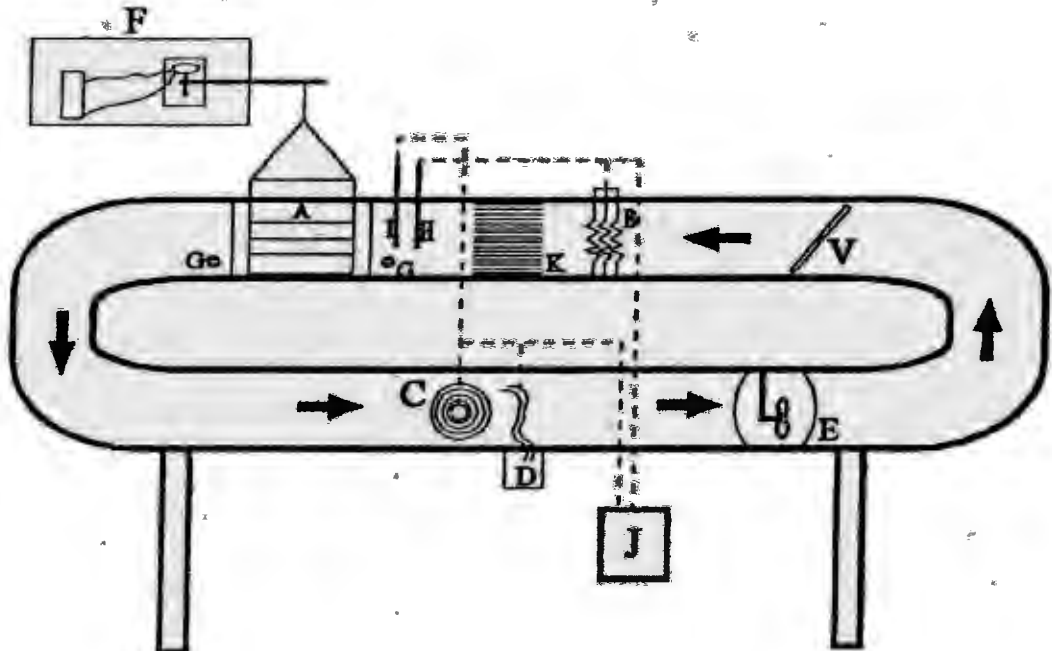
3.4.1.1. Composición Químico Proximal.

Se determinó el contenido de humedad, cenizas, extracto etereo, fibra bruta, proteína total y nifex, según el método recomendado por la AOAC (1985). Este análisis se efectuó para caracterizar a la materia prima en función a su composición química.

3.4.1.2. Contenido de humedad.

La humedad inicial fue determinada a base de la constancia de peso obtenida en una estufa de secado a 105°C, durante 24 horas (AOAC, 1985).

**Fig. 3: ESQUEMA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL
DE SECADO**



LEYENDA:

- A: Canastilla
- B: Resistencias eléctricas
- C: Deshumidificador
- D: Calentador de agua
- E: Ventilador axial
- F: Sistema registrador de resistencias eléctricas
- G: Orificio (para introducir anemómetro, termómetro o higrómetro)
- H: Termocupla
- I: Registrador de humedad relativa
- J: Tablero de control
- V: Válvula de compuerta (regulador de velocidad de aire).

3.4.1.3. Contenido de ácido pirúvico.

Haciendo uso del método recomendado por Schwimmer y Weston (1961). En el Anexo 1 se describe detalladamente el método.

3.5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.5.1. DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES DE SECADO

El flujo de operaciones a seguir se muestra en la Figura 4, y se describe con mayores detalles a continuación:

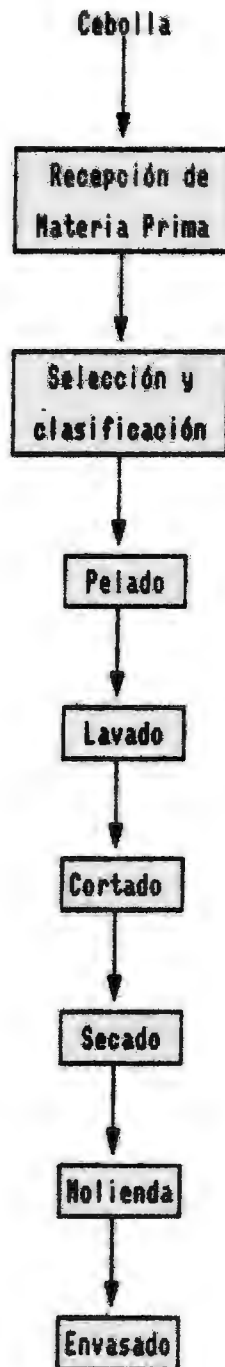
3.5.1.1. Recepción de materia prima.

La cebolla blanca fresca a granel fue llevada hasta la Sala de Secado del Centro de Energías Renovables (UNI), y se extendieron sobre una mesa revestida con mayólica.

3.5.1.2. Selección y clasificación.

Se seleccionaron las cebollas sanas descartándose aquellas que presentaban anomalías. Se escogieron las que presentaban tamaño mediano y forma alargada.

Fig. 4: FLUJO DE OPERACIONES PARA LA OBTENCION DE CEBOLLA EN POLVO



3.5.1.3. Pelado.

Las cebollas se pelaron manualmente separándose las raicillas y la cubierta celulósica exterior, hasta dejar el bulbo descubierto (parte comestible).

3.5.1.4. Lavado.

Se realizó por inmersión y posterior enjuague con chorro de agua potable. Se procuró que este lavado fuera efectuado eficientemente. No se requirió un sulfitado ni un escaldado, pues la materia prima mantiene con bastante aceptabilidad su color natural durante y después del proceso de secado (Jones *et al.*, 1963; Luh *et al.*, 1975; FAO, 1992). Además está comprobado que estos pre-tratamientos aceleran la pérdida de pungencia de la cebolla (olores y sabores penetrantes de la cebolla), lo cual es indeseable (Jones *et al.*, 1963).

3.5.1.5. Cortado.

Mediante un cuchillo de acero inoxidable se cortó la cebolla en forma de rodajas circulares de 7 mm de espesor. Es importante explicar la razón del corte en forma de rodaja

o tajada tipo "alíquot". Se ha demostrado que deshidratando la cebolla bajo esta forma geométrica, la pérdida de pungencia se minimiza (Luh et al., 1975). Por otro lado, el espesor de 7 mm, fue escogido aleatoriamente por el investigador.

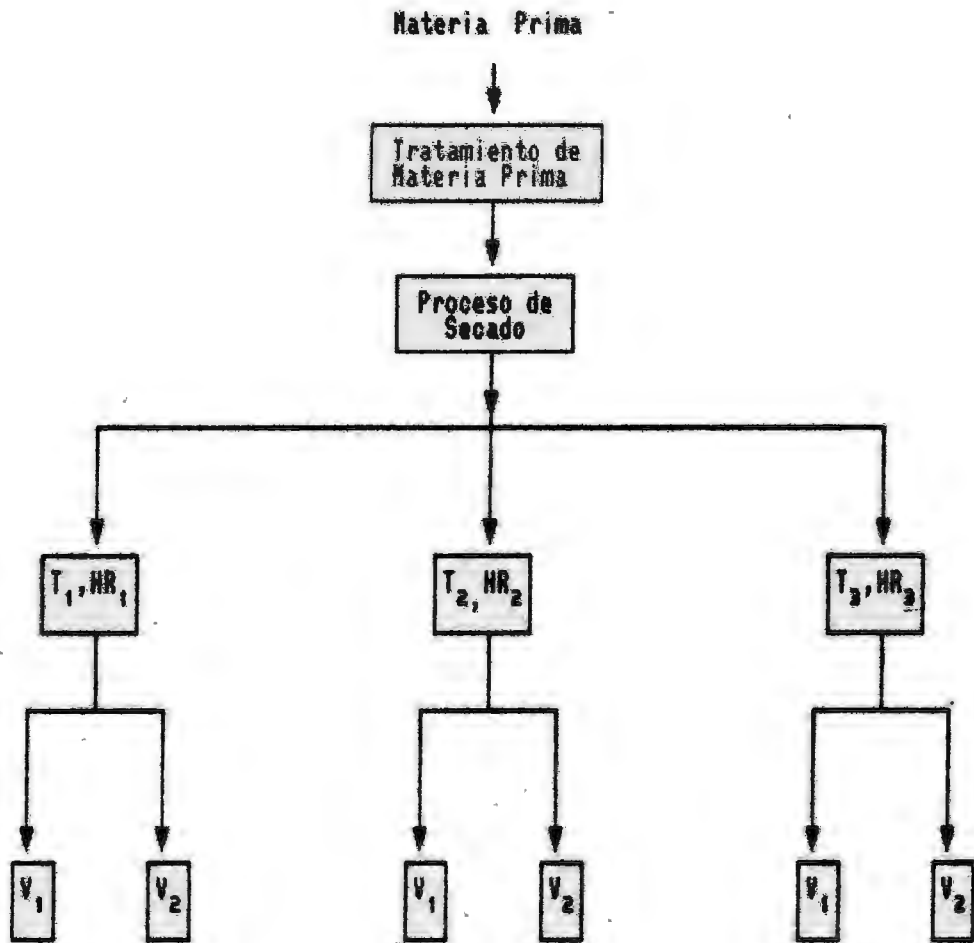
3.5.1.6. Secado.

Las rodajas de cebolla se secaron por el método de flujo de aire caliente, donde se aplicaron tres temperaturas y dos velocidades de aire, de acuerdo al diseño experimental mostrado en la Figura 5, y realizando tres repeticiones por cada prueba. Con esta operación pudo concluirse el flujo de proceso, sin embargo a una muestra adicional, se le efectuó una molienda grosera y envasado, para fines de terminar con la elaboración del producto.

3.5.1.7. Molienda.

A una muestra adicional a las estudiadas en los tratamientos, se le efectuó una molienda grosera haciendo uso de un mortero eléctrico.

Fig. 5: DISEÑO EXPERIMENTAL DEL SECADO

**Controles**

Humedad (cada 10 minutos)

Acido piróvico (4 puntos)

Parámetros

T_1 : Temperatura 1 = 50 C

T_2 : Temperatura 2 = 60 C

T_3 : Temperatura 3 = 70 C

V_1 : Velocidad de aire 1 = 1 m/s

V_2 : Velocidad de aire 2 = 2 m/s

3.5.1.8. Envasado.

En triple bolsa de polietileno, para retardar el paso del vapor de agua desde el ambiente hasta el interior del envase, puesto que la cebolla deshidratada es altamente higroscópica.

3.5.2. CONTROLES DURANTE EL SECADO

3.5.2.1. Determinación de las humedades relativas.

Los valores de humedad relativa para cada uno de los tratamientos evaluados, se mantuvo constante durante todo el proceso de secado y fue controlado y determinado mediante la utilización de un higrómetro digital marca FISHER SCIENTIFIC modelo 11-661-7A, el cual fue debidamente calibrado en el observatorio de meteorología de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.5.2.2. Determinación de los contenido de humedad de equilibrio.

Por extrapolación de las curvas de secado. Esta técnica es lo más recomendable, puesto que no se pueden obtener curvas de isoterma de desorción en la materia prima evaluada ya que son productos muy perecibles.

3.5.2.3. Determinación de los contenido de humedad respecto al tiempo de secado.

Se determinaron los valores de contenido de humedad (base seca) respecto al tiempo de secado, cada 10 minutos. La manera como se procedió fue registrando medidas de resistencias eléctricas en un dispositivo denominado "strain gauge", las cuales variaban de manera directamente proporcional al peso de las muestras, y éstas a su vez se relacionaban con el contenido de humedad de las mismas. En el Anexo 2, se explica el fundamento de estas mediciones.

3.5.2.4. Determinación de los contenido de ácido pirúvico respecto al tiempo de secado.

Para cada uno de los seis tratamientos, se muestreó cada 2 ó 3 horas, y se determinó el contenido de ácido pirúvico expresado en base seca, haciendo uso del método recomendado por Schwimmer y Weston (1961).

3.5.2.5. Determinación de las pungencias relativas respecto al tiempo de secado.

A partir de los datos de contenido de ácido pirúvico respecto al tiempo de secado, se obtuvieron los valores de pungencia

relativa mediante una conversión de dichos valores a términos porcentuales.

3.6. METODOLOGIA MATEMATICA PARA LA ESTIMACION DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DURANTE EL SECADO.

Asumiendo un caso de transferencia de masa transiente unidireccional para una plancha infinita donde las condiciones del medio convectivo (aire caliente) permanecen constantes y considerando un coeficiente de difusividad variable con el tiempo, se utilizaron dos métodos de estimación de la difusividad efectiva: la metodología de Alvarez y Legües modificada, y, la metodología basada en las diferencias finitas.

3.6.1. METODOLOGÍA DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADA

- 1) Tomando como referencia al modelo recomendado por Alvarez y Legües, se consideró la siguiente ecuación particular para el caso de cuerpos geométricos con forma de plancha infinita:

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \sum_1^{\infty} \frac{B}{(2n-1)^2 \pi^2} \exp \left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4a^2} \int_{t_0}^{t-t_1} D_{ef} dt \right]$$

- 2) A partir de los datos experimentales de humedad en base seca (M) versus tiempo (t), se calcularon los correspondientes valores de humedad adimensional para cada tiempo ($E(t_i)$).

$$E(t_i) = \frac{\bar{M} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}}$$

- 3) Haciendo uso de un procedimiento iterativo, como el método numérico de Newton, también llamado método de la tangente, se calcularon los valores de $\int D_e dt$ para los diferentes tiempos t_i . La serie infinita fue truncada en el quinto término para todos los casos.
- 4) Utilizando una regresión del tipo potencial se relacionó la función $\int D_e dt$ versus tiempo, hallándose los parámetros "p" y "q" de la ecuación que gobierna dicho comportamiento, quedando:

$$\int_{t=0}^{t=t_i} D_{ef} dt = p \cdot (t_i)^q$$

- 5) Conocida la relación matemática $\int D_e dt$ versus tiempo, se deriva y se obtiene la función que relaciona a la difusividad efectiva como una función del tiempo de secado, quedando finalmente:

$$D_{ef} = p \cdot q \cdot t^{q-1}$$

6

$$D_{ef} = A \cdot t^B$$

donde $A = p \cdot q$

$B = q-1$

3.6.2. METODOLOGÍA BASADA EN LAS DIFERENCIAS FINITAS

- 1) Se formuló el análisis físico de transferencia de masa transiente unidireccional a través de una plancha infinita, dividiéndose la semiplancha en 10 partes iguales generándose 11 nodos, y mediante el método de diferencias finitas bajo el esquema implícito, se expresó el problema que es del tipo de ecuaciones diferenciales con condiciones de frontera en un problema de sistema de ecuaciones algebraicas simultaneas. La condición inicial y las condiciones de frontera para este caso son:

$$CI : M_n = M_0 \quad (t = 0, 0 < r < R)$$

$$CF1 : M_{10} = M_{eq} \quad (t > 0, r = R)$$

$$CF2 : \partial M / \partial r = 0 \quad (t > 0, r = 0)$$

Condición de los puntos interiores: Segunda Ley de Fick.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (t > 0, \quad r = r)$$

Se consideraron 11 nodos, por lo que se obtuvo un sistema de 10 ecuaciones algebraicas simultaneas con 10 incógnitas, para cada tiempo. Las incógnitas son las humedades en cada uno de los nodos. En el Anexo 3 se muestra el sistema de ecuaciones lineales, expresado bajo la forma de matrices.

- 2) Haciendo uso del Lenguaje Quick BASIC, se desarrolló un programa computacional que, despues de asumir un valor aleatorio de difusividad efectiva, resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas para cada tiempo por medio del método iterativo de sobrerelajación. Es importante señalar que el método de sobrerelajación es tan solo una subrutina del programa principal. De este modo, se halla la humedad trasiente en cada nodo y en cada tiempo.
- 3) Mediante la aplicación de la regla de Simpson se obtuvo la humedad promedio predecida en ese tiempo, ya que las distancias entre nodos se consideró la misma. Este método es también una subrutina del programa principal.
- 4) Asumiendo 20 valores de difusividad para cada tiempo, y repitiendo los pasos (2) y (3), el

programa arrojó 20 valores de humedad promedio predecida. Aquella difusividad para cada período de tiempo, que arrojó un valor de humedad predecida más próximo al valor experimental, fue considerado como la difusividad efectiva estimada.

- 5) Aplicando el método de fijación de curvas de los mínimos cuadrados, se obtuvieron ecuaciones polinómicas de cuarto grado que relacionaban a la difusividad efectiva como una función del tiempo de secado.

$$D_{ef} = C_0 + C_1 t_1 + C_2 t_1^2 + C_3 t_1^3 + C_4 t_1^4$$

3.7. SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA MEDIANTE LOS PROGRAMAS COMPUTACIONALES

Conocidas las ecuaciones que relacionan a la difusividad efectiva como una función del tiempo, se reemplazaron en los modelos matemáticos propuestos. Utilizando los mismos programas de cómputo que se usaron para estimar los valores de difusividad efectiva, se simuló la variación del contenido de humedad (base seca) respecto al tiempo de secado, a diferentes valores de temperatura y velocidad de aire.

3.7.1. METODOLOGÍA DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADA

En el mismo programa que se utilizó para estimar la difusividad efectiva por el método de Alvarez y Legües modificado, se desarrolló el modelo matemático recomendado por el autor. Se simuló y se obtuvieron los valores de humedad predecidos (b.s.) para todo el tiempo que permanecieron las muestras en el secador.

El modelo matemático final es entonces, un modelo semi-teórico el cual puede expresarse bajo la siguiente ecuación:

$$\frac{\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \sum_1^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \exp \left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4a^2} p t^e \right]$$

3.7.2. METODOLOGÍA BASADA EN LAS DIFERENCIAS FINITAS

En el mismo programa que se utilizó para estimar la difusividad efectiva basado en el método de diferencias finitas, se desarrolló el modelo matemático recomendado por el autor. El modelo matemático que describe la difusión másica del agua es entonces, un modelo semi-teórico el cual puede expresarse bajo una ecuación diferencial de segundo

orden que solo puede resolverse por métodos numéricos, y viene a ser una modificación de la segunda Ley de Fick.

Este modelo matemático, ciertamente bastante completo, halla los valores de humedad nodal en una plancha infinita, durante todo el tiempo de secado. Una integración de las humedades en los puntos nodales darán como resultado los valores de humedad predecidos o simulados a través del tiempo de secado.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = (C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 + C_4 t^4) \frac{\partial^2 M}{\partial r^2}$$

$$\bar{M}_{pred} = \frac{\int_{r=0}^{r=R} M(r) dr}{r}$$

3.3. METODOLOGIA ESTADISTICA PARA LA VALIDACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS DE SECADO

Para validar los métodos utilizados, se calculó el parámetro estadístico F, recomendado por Chirife, Ferro Fontan y Bequet (1980), y el parámetro RMS, recomendado por Favetto y Chirife (1984). Estos valores F y RMS, se calculan a partir de los datos experimentales de contenido de humedad durante el

proceso de secado, y están definidos por las siguientes ecuaciones:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|\bar{M}_{exp} - \bar{M}_{pred}|}{\bar{M}_{exp}}$$

$$RMS = 100 \sqrt{\sum \frac{\left[\frac{\bar{M}_{exp} - \bar{M}_{pred}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{exp}} \right]^2}{n}}$$

donde n es el número de pares de datos (valores experimentales y predecidos).

Ambos parámetros estadísticos indican la calidad en la fijación de la curva y se expresan en términos porcentuales. Es importante recalcar que el valor RMS tiene mayor aceptación (Favetto y Chirife, 1984).

3.9. METODOLOGIA MATEMATICA PARA DESCRIBIR LA CINETICA DE LA PERDIDA DE PUNGENCIA DE LA CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO

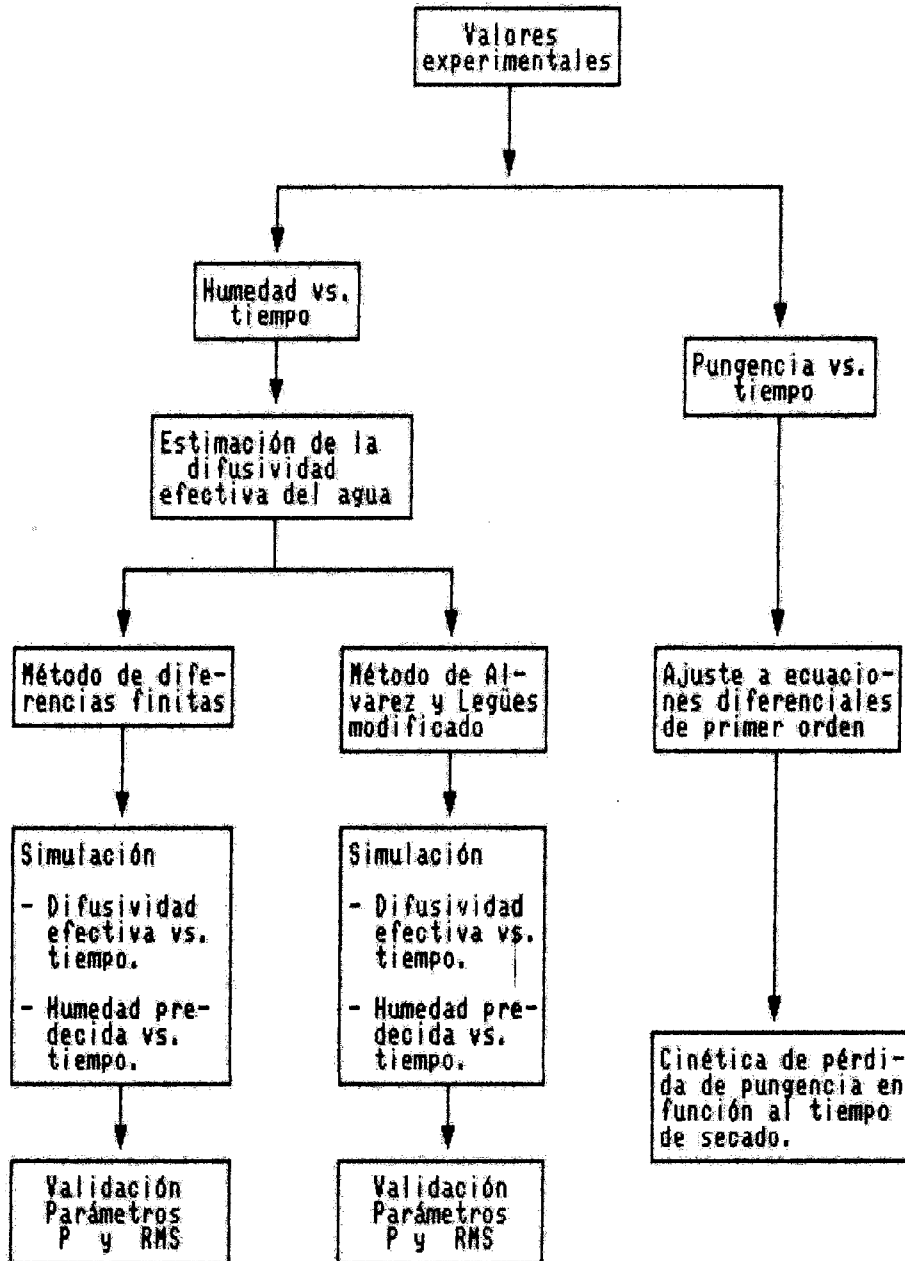
Conocidos los valores de pungencia relativa de las muestras de cebolla blanca, se ajustaron a ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, según lo recomendado por Pezzutti y Crapiste (1991),

para fines de expresar la cinética de cambio en la pungencia.

La ecuación generalizada es:

$$\frac{dP}{dt} = -k P$$

Fig. 6: METODOLOGIA PARA LA SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA
Y EVALUACION EN LA PERDIDA DE SU PUNGENCIA



IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. SELECCION DE LA MATERIA PRIMA

Para las experiencias se utilizó la cebolla blanca (Allium cepa) cv. "Early Granex" o, más conocida como cebolla blanca arequipeña o también llamada "criolla", de tamaño mediano y en buen estado, la cual fue adquirida en un mercado local en el distrito de La Molina.

Las muestras de cebolla blanca fueron evaluadas por medio de un análisis proximal, mostrando las características que se presentan en el Cuadro 3.

CUADRO 3: RESULTADOS DEL ANALISIS PROXIMAL EN CEBOLLA BLANCA.

Componente	Porcentaje (base húmeda)
Agua	91.75
Cenizas	0.34
Proteínas	0.95
Grasas	0.02
Nifex	6.48
Fibra	0.47

Se pudo notar que presentó una composición similar al de los datos reportados por la literatura, variando ligeramente en los datos referentes a grasa y a fibra. Sin embargo, podría ocurrir que la composición varíe marcadamente con el cultivar a evaluarse.

4.2. DETERMINACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD INICIAL

En el Cuadro 4, se pueden apreciar los resultados de la determinación de los contenidos de humedad inicial en las muestras de cebolla blanca, para cada uno de los tratamientos evaluados.

Para el caso de la cebolla blanca en estudio, los contenidos de humedad inicial estuvieron comprendidos entre 92% y 94% (base húmeda), los cuales son valores elevados e indican que posiblemente la variedad seleccionada no sea atractiva para obtener un producto deshidratado. Estos valores relativamente altos, podrían también indicar, que durante el proceso de deshidratación pueda existir una etapa de secado a velocidad constante.

Los valores de contenido inicial de humedad variaron ligeramente entre cada una de las muestras lo cual se debió puramente a razones de cultivar y no a un mal muestreo puesto que el lote era representativo.

CUADRO 4: CONTENIDOS DE HUMEDAD INICIAL DE LAS MUESTRAS DE CEBOLLA BLANCA.

MUESTRA SEGUN TRATAMIENTO	Contenido de humedad	
	(g agua/g mat. seca)	(g agua/g mat. húmeda)
50.1	16.09	0.9415
50.2	13.16	0.9294
60.1	15.84	0.9406
60.2	11.47	0.9198
70.1	12.77	0.9274
70.2	13.49	0.9310

Tratamiento " i.j " quiere decir:

Temperatura : i °C

Velocidad de aire : j m/s

4.3. DETERMINACION DE LAS HUMEDADES RELATIVAS

Los valores de humedad relativa del aire de secado, constantes durante todo el proceso, se muestran en el Cuadro 5.

CUADRO 5: HUMEDADES RELATIVAS DEL AIRE DE SECADO

TRATAMIENTO	HUMEDAD RELATIVA (%)
50.1	20
50.2	20
60.1	15
60.2	15
70.1	10
70.2	10

Dichos valores de humedad relativa, estuvieron comprendidos entre 10 y 20 %. Estos valores bajos indican que existe una alta depresión del bulbo húmedo, que significa un proceso de secado en un menor tiempo.

4.4. DETERMINACIÓN DE LAS HUMEDADES DE EQUILIBRIO

Los valores de humedad de equilibrio de las muestras de cebolla blanca se muestran en el Cuadro 6. Se notó que la velocidad del aire de secado no influía en la humedad

de equilibrio de las muestras. Por otro lado, se pudo apreciar que a mayores temperaturas, humedades de equilibrio más bajas.

CUADRO 6: VALORES DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LAS MUESTRAS DE CEBOLLA BLANCA

TRATAMIENTO	HUMEDAD DE EQUILIBRIO	
	(g agua/g mat. seca)	(g agua/g cebolla)
50.1	0.12	0.1071
50.2	0.12	0.1071
60.1	0.10	0.0909
60.2	0.10	0.0909
70.1	0.08	0.0741
70.2	0.08	0.0741

4.5. DETERMINACION DE LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD RESPECTO AL TIEMPO DE SECADO

En la Figura 7 se grafica los resultados del contenido de humedad durante el proceso de secado para los seis tratamientos evaluados.

Para la obtención de dichas curvas fue necesario convertir los valores de resistencias eléctricas a valores de peso, y a partir de dichos valores se

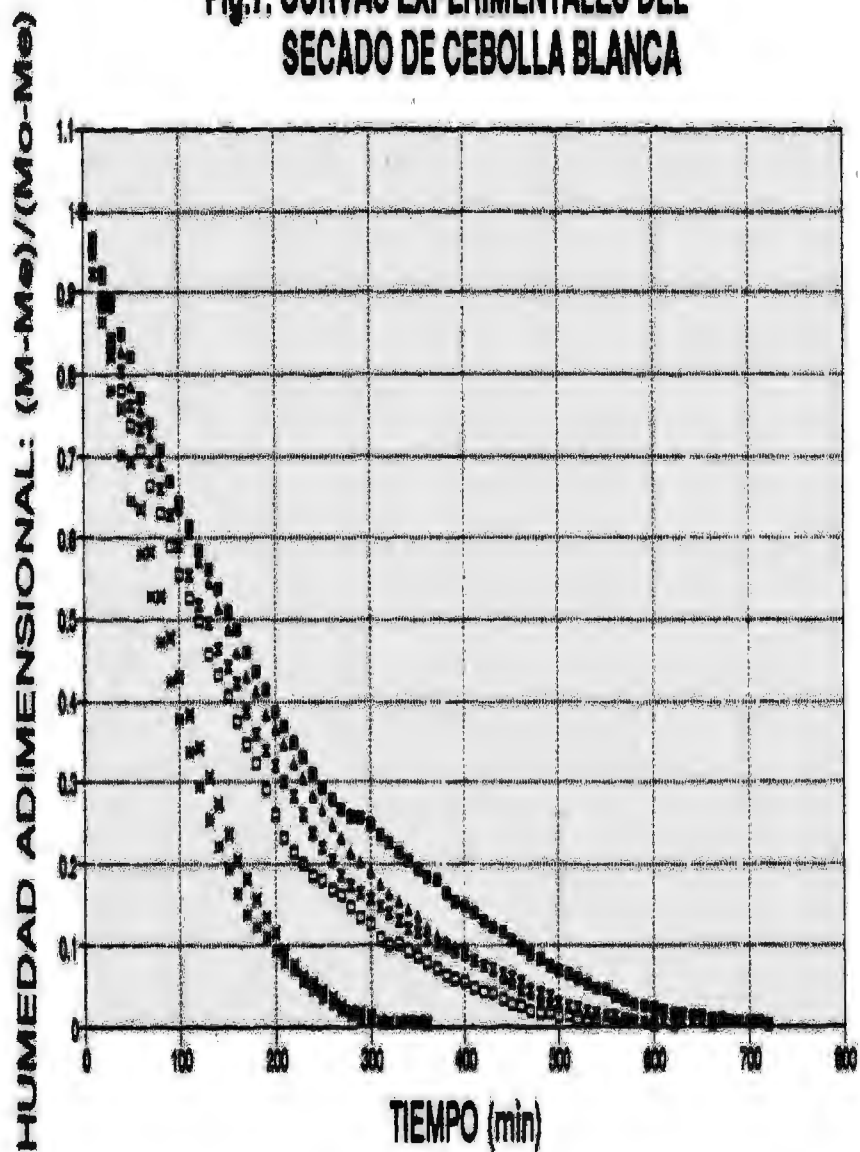
calcularon los contenidos de humedad experimental a través del proceso de secado. Dichos cálculos se muestran en los Anexos 4-9.

Es notorio que las curvas que describen el comportamiento de la humedad con respecto al tiempo de secado, son las curvas típicas, y se aprecia además una correlación perfectamente lógica entre los parámetros en estudio: temperatura y velocidad del aire. Esto quiere decir que para un mismo tiempo de secado, a mayores temperaturas y/o mayores velocidades de aire, menores valores de contenido de humedad.

Los tiempos de secado resultaron bastante largos en todos los casos, a pesar que se utilizaron humedades relativas del aire de secado bastante bajas. La principal razón se debió a que los contenidos de humedad iniciales eran elevados. Para temperaturas de 50 y 60°C los tiempos superaban las 10 horas cualquiera fuere la velocidad del aire de secado, lo cual desanima a utilizar estos tratamientos para el secado de la cebolla blanca. Para temperaturas de 70°C, los tiempos de secado se acortaron notablemente hasta 6 horas.

Es importante recalcar que no se ha estudiado el efecto de la carga en el secador, la cual es también una variable importante que debería tomarse en cuenta.

Fig.7: CURVAS EXPERIMENTALES DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA



- TRAT 1: 50°C, 1 m/s ▲ TRAT 2: 50°C, 2 m/s △ TRAT 3: 60°C, 1 m/s
- TRAT 4: 60°C, 2 m/s × TRAT 5: 70°C, 1 m/s * TRAT 6: 70°C, 2 m/s

4.6. DETERMINACION DE LOS CONTENIDOS DE ACIDO PIRUVICO DE CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO

En el Cuadro 7 se muestran los valores experimentales de contenido de ácido pirúvico a través del tiempo de secado de la cebolla blanca, para cada uno de los tratamientos evaluados.

CUADRO 7: CONTENIDO DE ACIDO PIRUVICO EN CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO (mg ac.pirúvico/g m.seca)

Tiempo (h)	TRATAMIENTO					
	50.1	50.2	60.1	60.2	70.1	70.2
0	nd	8.14	11.01	32.69	18.94	35.87
2	nd	7.88	9.36	25.87	12.27	26.38
4	nd	8.14 *	14.37	22.97	17.18	30.84
6	nd	8.14 *	nd	nd	15.67	17.35
7	nd	nd	20.27 *	19.37	nd	nd

(*) : No se consideraron para los cálculos.

(nd) : No determinado

Se pudo observar que por ser la cebolla un producto anisotrópico (no homogéneo), las muestras evaluadas no siguieron una tendencia bien definida de la pérdida de pungencia, a pesar que las muestras provenían del mismo bulbo de cebolla. Ello indica que el contenido de ácido pirúvico varía según la posición radial y axial donde se tome la muestra.

El contenido de ácido pirúvico enzimático debe disminuir durante el tiempo de secado, según lo señalado por Schwimmer, Venstrom y Guadagni (1961), quienes demostraron que el sustrato o precursor de los compuestos que confieren la pungencia se ve reducido en dicho tratamiento térmico. Sin embargo por la anisotropía de la cebolla, el sustrato o precursor no se encuentra distribuido uniformemente en todo el bulbo y ello trajo como consecuencias que los resultados de análisis presentaran algunas irregularidades, a pesar de que la tendencia si será aceptable como se podrá observar más adelante.

También se pudo apreciar que los valores iniciales de ácido pirúvico, comprendidos entre 8 y 36 mg/g materia seca (6 y 26 μ moles/g cebolla), caracterizan a la cebolla blanca seleccionada como medianamente pungente a muy pungente. Ello indica que posiblemente esta variedad sea apta para el deshidratado.

Para el tratamiento de secado a la temperatura de 50°C y velocidad del aire de 1 m/s, no se realizaron análisis porque se consideró que el tiempo excesivo de secado no lo justificaba, y, porque se deduce que la pérdida de pungencia sería mínima ya que a 50°C y 2 m/s la pérdida era también mínima.

4.7. DETERMINACION DE LAS PUNGENCIAS RELATIVAS RESPECTO AL TIEMPO DE SECADO

Los valores de contenido de ácido pirúvico fueron expresados en porcentajes y así se determinó la pungencia relativa a través del tiempo de secado, los que se muestran en el Cuadro 8.

CUADRO 8: PUNGENCIA RELATIVA DE CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO (%).

Tiempo (h)	TRATAMIENTO					
	50.1	50.2	60.1	60.2	70.1	70.2
0	100	100	100	100	100	100
2	100	96.76	85.03	79.13	64.78	73.54
4	100	nd	130.54	70.26	90.69	85.98
6	100	nd	nd	nd	82.72	48.38
7	nd	nd	nd	59.26	nd	nd

(nd) : No determinado

Para los cálculos, solo fueron tomados en cuenta los valores aceptados en la determinación del contenido de ácido pirúvico.

4.8. ESTIMACION DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DEL AGUA DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA BLANCA

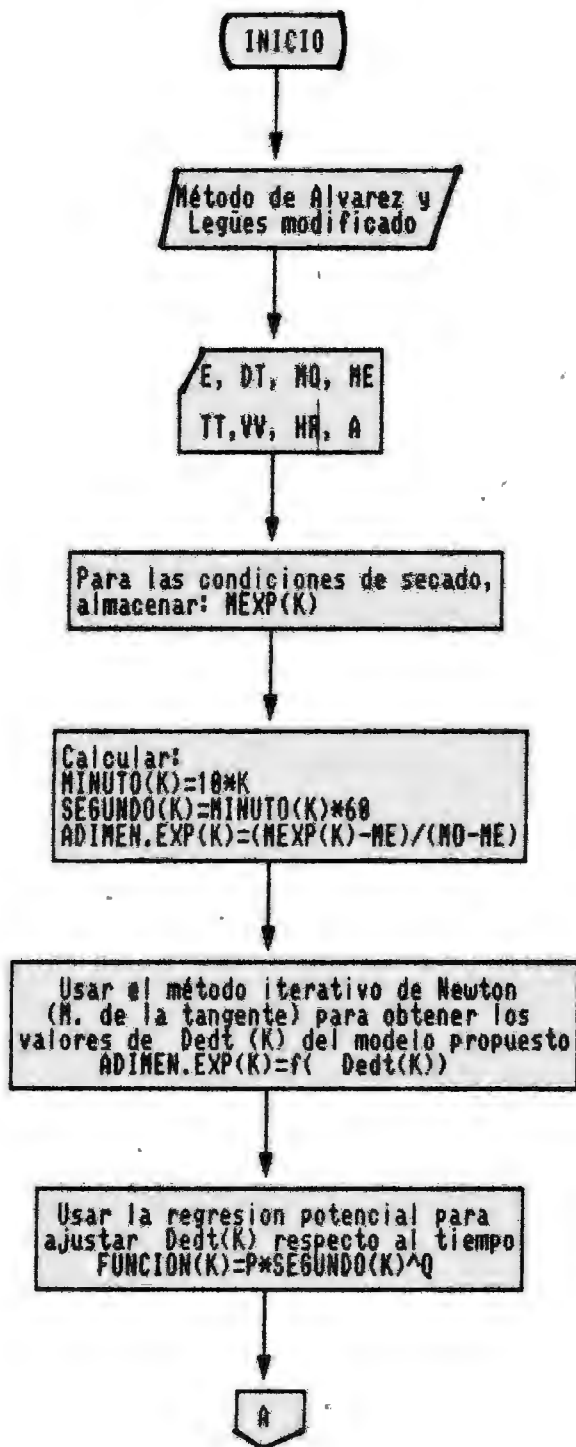
En Lenguaje de computación QuickBASIC versión 4.5, se desarrollaron los programas de cómputo que fueron utilizados para los desarrollos matemáticos de las dos metodologías a evaluarse. En las Figuras 8 y 9 se muestran los diagramas de flujo de los programas computacionales y en los Anexos 10 y 11 se presentan los listados correspondientes.

4.8.1. METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADA

Los valores de difusividad efectiva versus tiempo de secado, estimados mediante el programa computacional basado en el método de Alvarez y Legües modificado, se ilustran en la Figura 10. Se obtuvieron curvas diferentes para cada tratamiento de temperatura y velocidad de aire.

La tendencia de las curvas es ascendente en todos los casos, siguiendo una relación del tipo exponencial de la forma $y=a.x^b$ con el tiempo de secado. También se notó que existe una relación directa con la temperatura y se observó que para rangos mayores de velocidad de aire, mayores eran los valores estimados de difusividad efectiva.

Fig. 8: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL
MÉTODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO



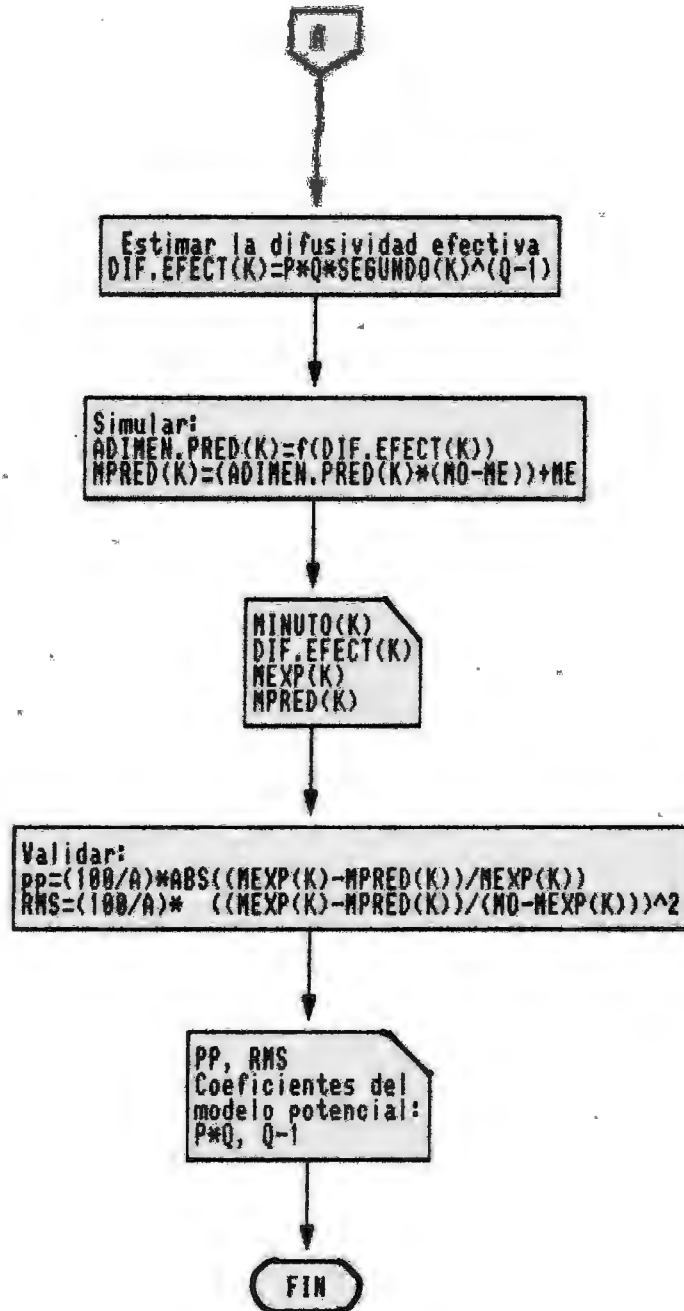
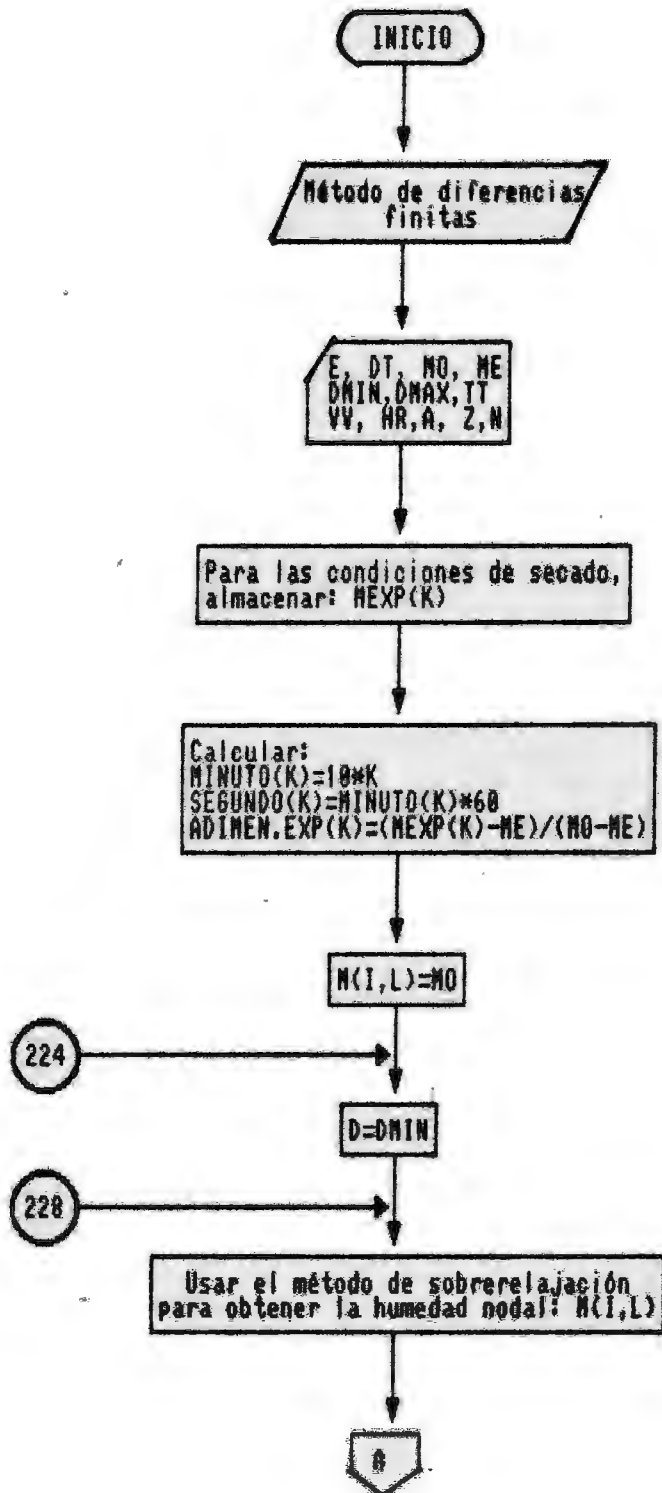
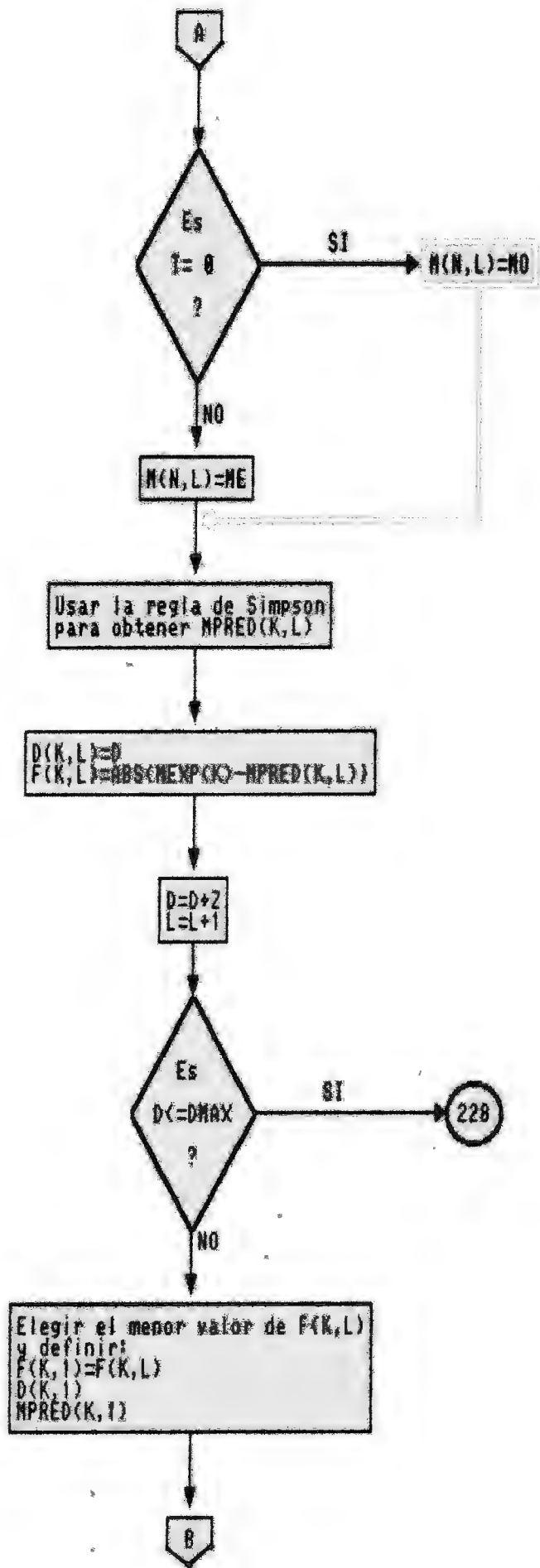
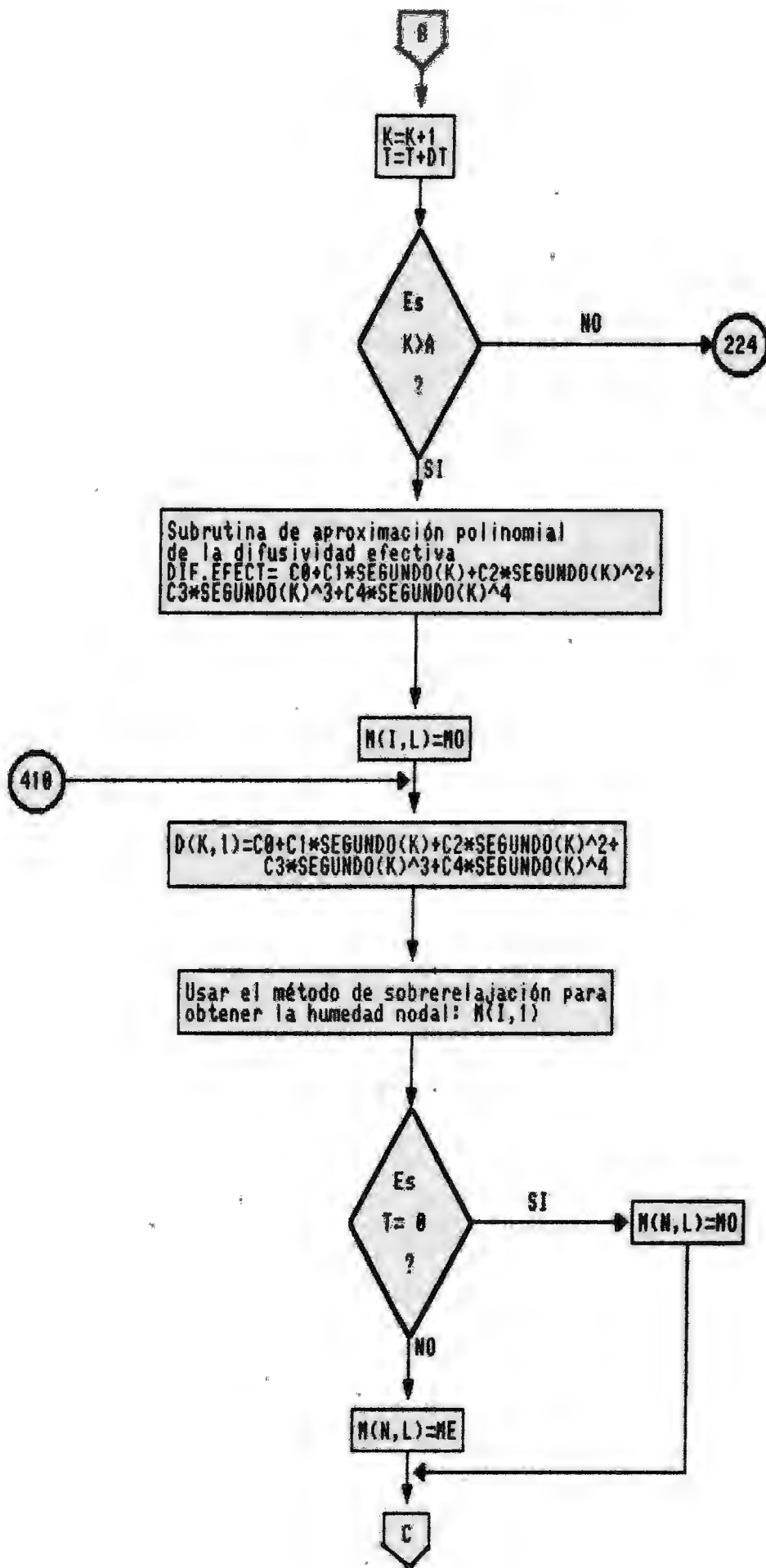
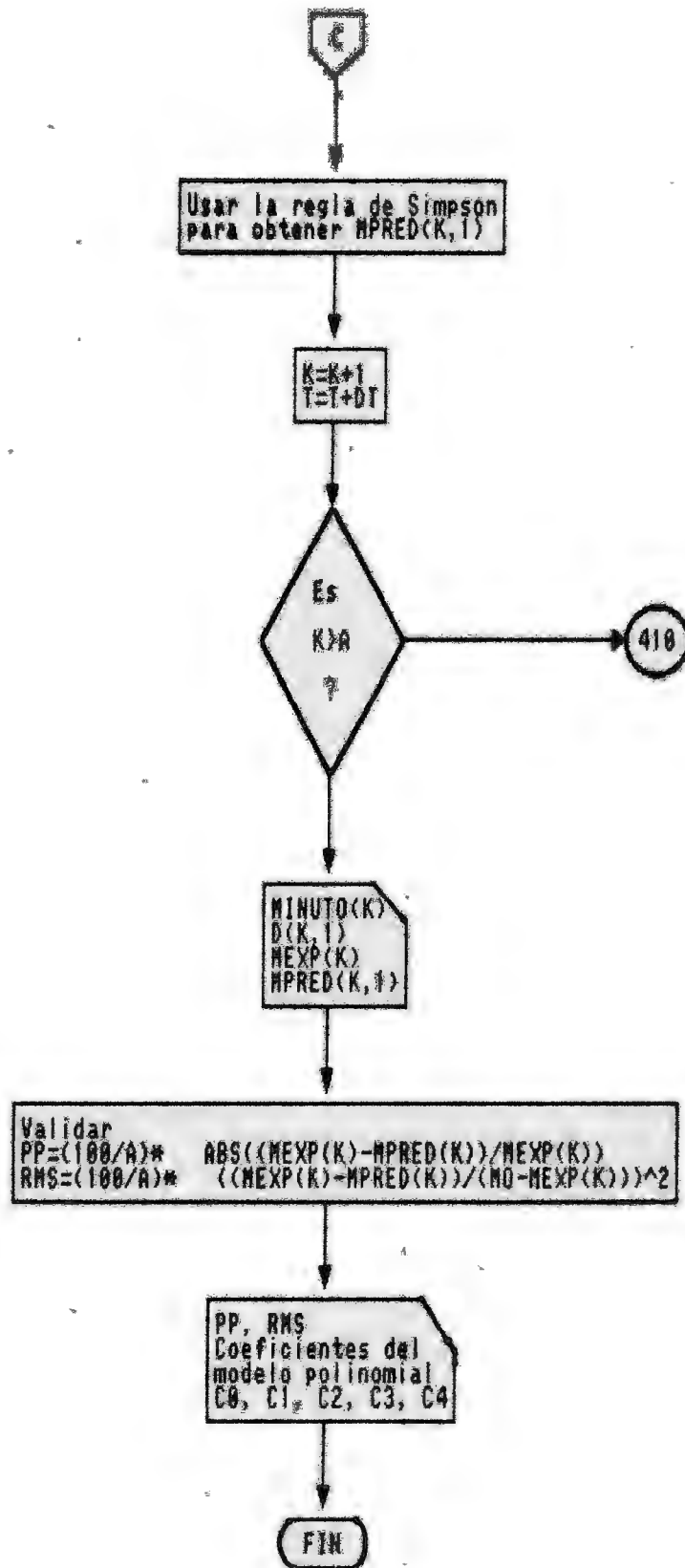


Fig. 9: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL
MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS









La relación existente entre los valores de difusividad efectiva y el tiempo corresponde a una regresión del tipo potencial de la forma:

$$D_{ef} = A \cdot t_f^B$$

donde los valores de A y B varían según el tratamiento y son los que se muestran en el Cuadro 9.

CUADRO 9: VALORES DE "A" Y "B" DE LA ECUACION TIPO POTENCIAL DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA UTILIZANDO LA METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADA.

TRATAMIENTO	PARAMETROS DE LA ECUACION $D_{ef} = A \cdot t_f^B$	
	A (m^2/s^{B+1})	B (adimensional)
50.1	2.134×10^{-12}	0.563
50.2	0.285×10^{-12}	0.802
60.1	5.273×10^{-12}	0.495
60.2	0.822×10^{-12}	0.715
70.1	0.120×10^{-12}	1.024
70.2	0.878×10^{-12}	0.808

4.8.2. METODOLOGIA BASADA EN LAS DIFERENCIAS FINITAS

Los valores de difusividad efectiva versus tiempo, estimados mediante el programa de cómputo basado en la metodología de diferencias finitas, se ilustran en la Figura 11.

Para cada tratamiento de temperatura y velocidad de aire, se obtuvo una curva diferente, notándose que la tendencia de las curvas es ascendente en todos los casos respecto al tiempo de secado. Asimismo se notó que existe una relación directa con la temperatura y la velocidad del aire de secado.

El método de diferencias finitas puede cambiar sus resultados, dependiendo de los valores asumidos de difusividad efectiva mínimas y máximas, de los valores "V" asumidos que se requieren para compilar el programa, del número de nodos asumidos, y de algunos otros factores menos importantes, como por ejemplo la precisión de cálculos en la versión del Lenguaje QuikBASIC.

La relación existente entre los valores de difusividad efectiva y el tiempo, corresponde a una ecuación polinómica de cuarto grado, la cual fue fijada haciendo uso del método de los mínimos cuadrados. La ecuación que gobierna dicho comportamiento es la siguiente:

$$D_{\text{ef}} = C_0 + C_1 t_1 + C_2 t_1^2 + C_3 t_1^3 + C_4 t_1^4$$

donde los valores de C_0 , C_1 , C_2 , C_3 y C_4 varían según el tratamiento y son los que se muestran en el Cuadro 10.

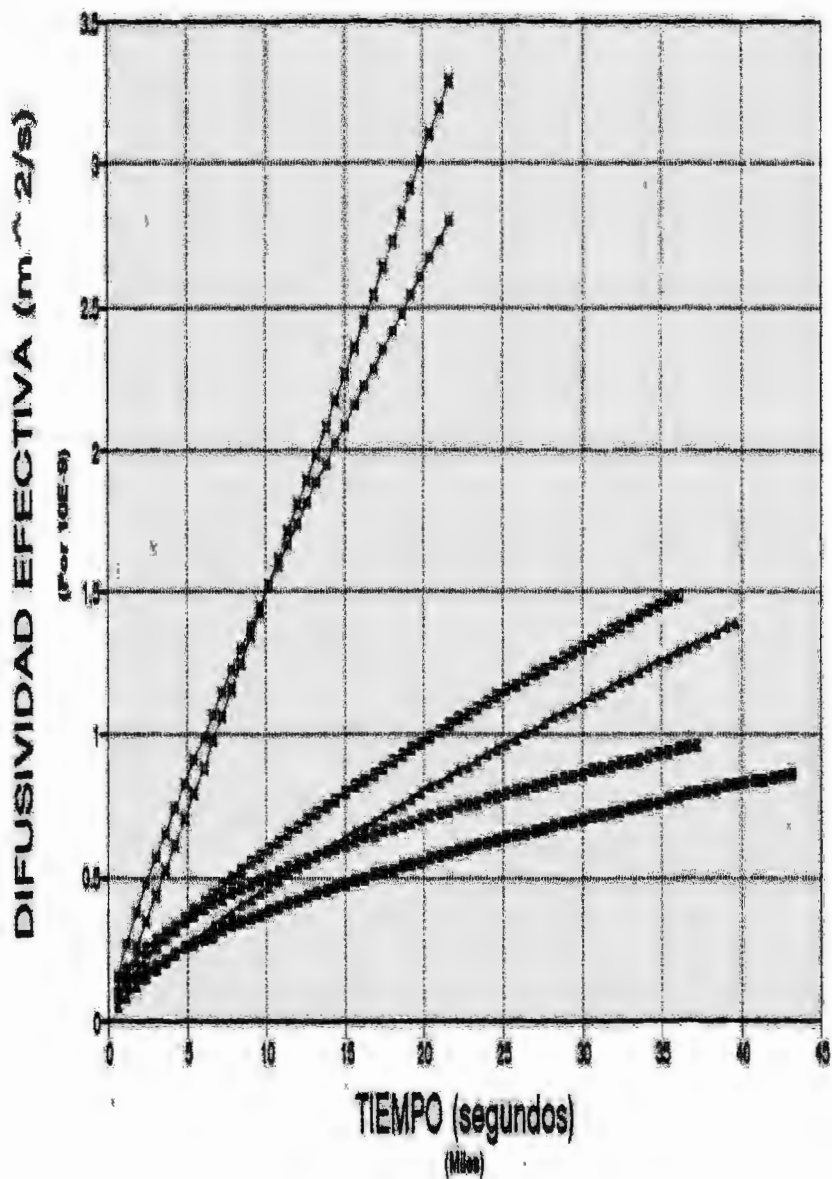
CUADRO 10: VALORES DE C_0 , C_1 , C_2 , C_3 Y C_4 DE LA ECUACION TIPO POLINOMIAL DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA UTILIZANDO LA METODOLOGIA DE DIFERENCIAS FINITAS.

TRATA- MIENTO	PARAMETROS DE LA ECUACION				
	Def = $C_0 + C_1t + C_2t^2 + C_3t^3 + C_4t^4$				
	C_0 (m^2/s) ($\times 10^{-10}$)	C_1 (m^2/s^2) ($\times 10^{-14}$)	C_2 (m^2/s^3) ($\times 10^{-18}$)	C_3 (m^2/s^4) ($\times 10^{-22}$)	C_4 (m^2/s^5) ($\times 10^{-26}$)
50.1	1.153	0.331	2.244	-0.129	0.202
50.2	1.154	0.456	2.869	-0.175	0.305
60.1	1.913	-3.493	9.687	-0.529	0.858
60.2	1.285	1.514	3.642	-0.272	0.527
70.1	-1.149	22.114	-27.641	1.686	-3.026
70.2	-1.596	33.751	-50.639	3.345	-6.945

Asimismo se notó que para los tratamientos con temperaturas de 70°C, los valores iniciales estimados para la difusividad efectiva eran números negativos, lo cual es absurdo. La causa del error podría deberse a una mala fijación de la curva del valor de la difusividad efectiva en función del tiempo, debido al mismo método numérico que siempre conlleva a cierta inexactitud.

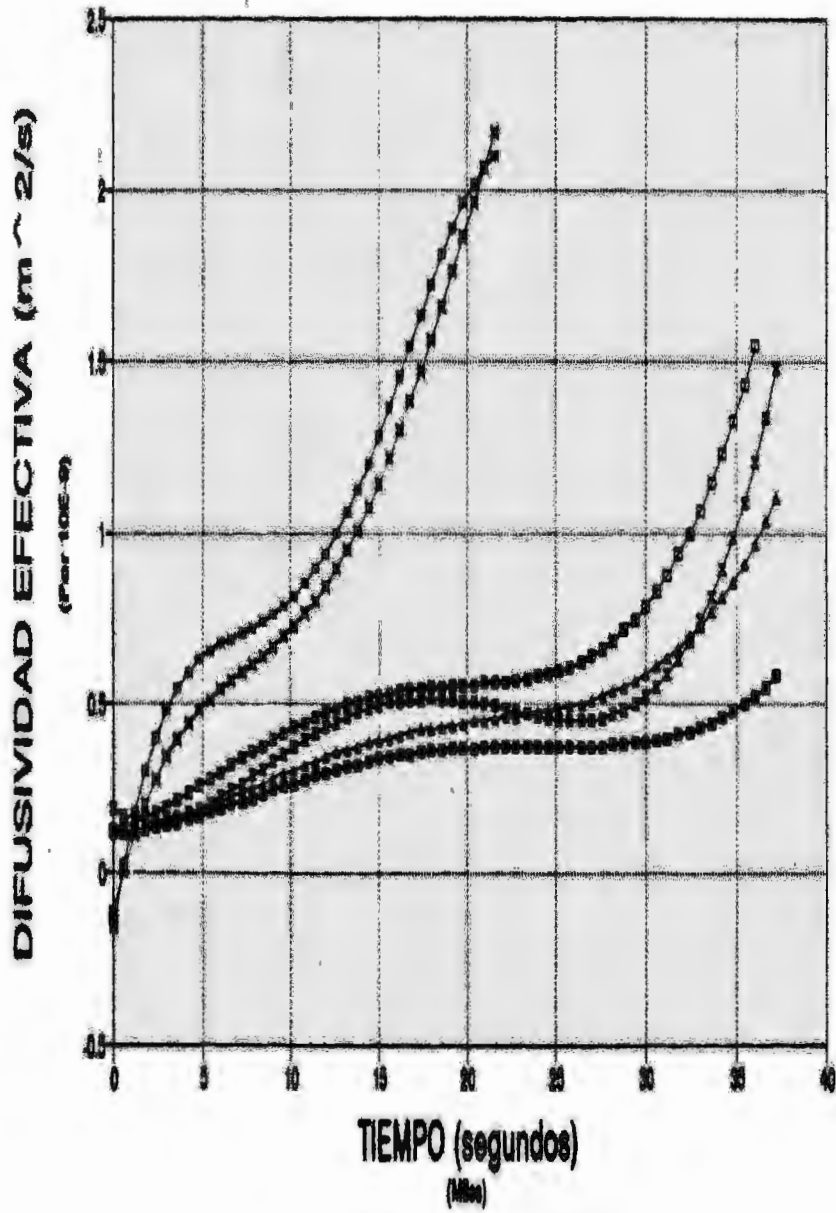
Las asunciones de los valores de difusividad efectiva mínimos y máximos influirán en los valores estimados de difusividad efectiva.

Fig.10: DIFUSIVIDAD EFECTIVA EN CEBOLLA BLANCA
 METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO



■ 50.1 ▲ 50.2 ✕ 60.1
 ◆ 60.2 * 70.1 * 70.2

Fig.11: DIFUSIVIDAD EFECTIVA EN CEBOLLA BLANCA
 METODO DE DIFERENCIAS FINITAS



■ 50.1 ▲ 50.2 ✕ 60.1
 ◆ 60.2 * 70.1 * 70.2

4.8.3. COMPARATIVO ENTRE LOS VALORES DE DIFUSIVIDAD EFECTIVA ESTIMADOS POR AMBOS METODOS

Como puede apreciarse de las Figuras 10 y 11, los valores de difusividad efectiva estimados por la metodología de Alvarez y Legües modificado, y la metodología basada en las diferencias finitas, son diferentes.

Los valores de difusividad efectiva estimados por el método de Alvarez y Legües modificado son mayores que los valores de difusividad efectiva estimados por el método basado en las diferencias finitas en todos los casos, y como se podrá ver más adelante arrojará valores de contenidos de humedad predecidos mucho más precisos.

Las razones de dichas diferencias podrían deberse al análisis físico del problema, como a las condiciones límite, o a que los modelos matemáticos a partir de los cuales se estimaron dichos coeficientes difusivos, presentaban diferente estructura: el primero de ellos, estaba expresado bajo la forma de una serie infinita la cual se truncó en el quinto término, mientras que el segundo de ellos, estaba expresado bajo la forma de una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden bajo la forma de diferencias finitas.

De todos modos, tales razones se discutirán detalladamente más adelante, después de analizar los resultados de la simulación y la validación de los modelos.

4.9. SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA

Mediante los mismos programas de cómputo utilizados para estimar la difusividad efectiva a través del tiempo de secado, se simuló la variación del contenido de humedad (base seca) en dicho proceso. Los resultados se discuten a continuación.

4.9.1. METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADA

La función que relaciona la difusividad efectiva con el tiempo de secado, estimado por la metodología de Alvarez y Legües modificada, se introdujo en el modelo propuesto y se simuló el comportamiento que describe el contenido de humedad (expresado en base seca) respecto al tiempo. En los Cuadros 11-16 se aprecian los resultados del programa computacional para cada uno de los tratamientos, notándose que existe una muy buena correlación entre los valores de humedad experimentales y los predichos.

Los datos de entrada del programa computacional son el espesor de la plancha (m), el incremento de tiempo (s), la humedad inicial (Kg agua/Kg masa seca), la humedad de equilibrio (Kg agua/Kg masa seca), los valores experimentales de humedad (Kg agua/Kg m.seca), la temperatura del bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$), la velocidad del aire (m/s) y la humedad relativa (%). Los datos de salida del programa de cómputo son los valores de difusividad efectiva estimados a través del tiempo (m^2/s), los valores de humedades predcidos en función al tiempo de secado (Kg agua/Kg masa seca) y los parámetros estadísticos de validación P y RMS.

Si se hace un análisis del método de Alvarez y Legües modificado, se puede notar que si se toman intervalos de tiempo más reducidos y si se trunca la serie infinita en un mayor número de términos, entonces la simulación correlacionaría mejor. Por otro lado, si se hubiesen tomado los datos experimentales de un producto isotrópico (homogeneo) cuyo contenido inicial de humedad hubiese sido bastante menor, entonces la simulación también correlacionaría mejor.

Es importante hacer mención a los supuestos ya que de ellos depende la precisión de las metodologías empleadas.

4.9.2. METODOLOGIA BASADA EN LAS DIFERENCIAS FINITAS

Conocida la ecuación que relaciona la difusividad efectiva con el tiempo de secado, obtenida por la metodología basada en las diferencias finitas, se introdujo esta función en la segunda ley de Fick y se simuló el comportamiento de la humedad respecto al tiempo. En los Cuadros 17-22 se aprecian los resultados del programa computacional, notándose que la correlación existente entre los valores de humedad experimentales y los predecidos, no son de ninguna manera aceptables.

Los datos de entrada del programa computacional son el número de nodos asumidos, el espesor de la plancha o placa (m), el incremento de tiempo (s), la humedad inicial (kg agua/kg masa seca), la humedad de equilibrio (kg agua/kg masa seca), los valores experimentales de humedad (kg agua/kg masa seca), los valores de difusividad efectiva máxima y mínima asumidos (m^2/s), la temperatura del bulbo seco ($^{\circ}C$), la velocidad del aire (m/s) y la humedad relativa (%). Los datos de salida del programa de cómputo (outputs computacionales) son los valores de difusividad efectiva estimados a través del tiempo (m^2/s), los valores de humedad predecida en función del tiempo (kg agua/Kg masa seca) y los parámetros estadísticos de validación P y RMS.

Al variar los valores asumidos de "V", "Dmin" o "Dmax" empleados en la subrutina de sobrerelajación, o al exigir menores tolerancias, cambiaron los resultados obtenidos de la simulación, sin embargo por más ajustes que se hicieron el error siguió siendo elevado. Ello demuestra que el método basado en las diferencias finitas no ha sido bien enfocado y por lo tanto la correlación de los valores predecidos con los experimentales no será buena.

Al parecer, la causa del error es una combinación del análisis físico del fenómeno de transferencia de masa y el método matemático empleado para la solución del problema. Otra posible razón de la mala correlación entre los valores de humedad experimentales y los predecidos podría ser el cálculo errado de los valores de contenido de humedad promedios obtenidos a partir de una integración utilizando la regla de Simpson; podría no cumplirse la teoría de dicho cálculo del valor promedio para la cebolla que es un producto anisotrópico.

4.9.3. COMPARATIVO ENTRE AMBOS METODOS DE SIMULACION

En las Figuras 12-17, se puede notar claramente como difiere la simulación por los dos métodos empleados. Se puede observar que los contenidos de humedad predecidos

por el método de Alvarez y Legües modificado correlacionan mucho mejor que los estimados por el método basado en las diferencias finitas, por diversas posibles razones debidamente explicadas anteriormente.

Aunque muchos autores piensan que el tiempo de ejecución del programa es bastante importante para determinar la eficacia del método, en este trabajo, cuyos resultados fueron compilados en una micro-computadora PC 486 DLC, no se apreciaron tiempos largos. Por este motivo, no se consideró al tiempo de ejecución del programa como un factor determinante para la evaluación del método.

Los tiempos requeridos para la compilación de los programas de cómputo por la metodología de Alvarez y Legües modificada, y la metodología de diferencias finitas, fueron de 3 a 6 segundos, y de 27 a 40 segundos, respectivamente.

CUADRO 11: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 1 m/s - METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO

METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO
ESTE PROGRAMA SIMULA LA VARIACION DE LA HUMEDAD
A TRAVES DEL TIEMPO EN UNA PLANCHA INFINITA
Y ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

* SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

ESPEJOR DE LA PLANCHA (m) = .007
INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
HUMEDAD INICIAL (dec, bs) = 16.094
HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec, bs) = .12
TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 50
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 1
HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 20

TIEMPO DE SECADO (MIN)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m^2/s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g agua/g ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g agua/g ms)
0	0	16.094	15.44874
10	7.808974E-11	15.5531	15.09257
20	1.153449E-10	14.904	14.54385
30	1.449085E-10	14.3091	13.9879
40	1.70374E-10	13.7141	13.45952
50	1.931698E-10	13.2273	12.95791
60	2.140418E-10	12.4159	12.47777
70	2.334387E-10	11.9291	12.01487
80	2.516583E-10	11.3882	11.56627
90	2.689019E-10	10.7932	11.1298
100	2.853277E-10	10.3605	10.70382
110	3.010493E-10	9.8737	10.2871
120	3.161573E-10	9.441	9.878675
130	3.307239E-10	9.0624	9.477834
140	3.448081E-10	8.6837	9.084118
150	3.584588E-10	8.251	8.69729
160	3.71717E-10	7.8724	8.31733
170	3.846175E-10	7.4397	7.944387
180	3.971902E-10	7.061	7.578761
190	4.09461E-10	6.6824	7.220843
200	4.214524E-10	6.3038	6.871087
210	4.331844E-10	5.9792	6.529968

220	4.446746E-10	5.6547	6.197955
230	4.559385E-10	5.3843	5.875484
240	4.669902E-10	5.0597	5.56295
250	4.778424E-10	4.7893	5.260688
260	4.885063E-10	4.5729	4.968973
270	4.989923E-10	4.3565	4.688012
280	5.093099E-10	4.2484	4.41795
290	5.194675E-10	4.1943	4.158871
300	5.294731E-10	4.0861	3.910797
310	5.393339E-10	3.8697	3.673697
320	5.490566E-10	3.7075	3.447491
330	5.586472E-10	3.5452	3.232051
340	5.681117E-10	3.3829	3.027212
350	5.774551E-10	3.2207	2.832772
360	5.866825E-10	3.0584	2.648498
370	5.957986E-10	2.9502	2.47413
380	6.048075E-10	2.7339	2.309388
390	6.137133E-10	2.5716	2.153972
400	6.225198E-10	2.4634	2.007567
410	6.312306E-10	2.3552	1.869847
420	6.39849E-10	2.193	1.740478
430	6.483781E-10	2.0848	1.619119
440	6.568208E-10	1.9225	1.505427
450	6.651801E-10	1.7602	1.399059
460	6.734586E-10	1.6521	1.29967
470	6.816587E-10	1.5439	1.206922
480	6.897829E-10	1.4357	1.120478
490	6.978335E-10	1.3275	1.04001
500	7.058124E-10	1.2193	.9651942
510	7.137219E-10	1.1653	.8957178
520	7.215639E-10	1.0571	.8312751
530	7.293403E-10	.9489	.7715709
540	7.370526E-10	.8948	.7163198
550	7.447029E-10	.8407	.6652474
560	7.522925E-10	.7325	.6180903
570	7.598231E-10	.6244	.5745962
580	7.672962E-10	.5703	.5345241
590	7.747131E-10	.5162	.4976442
600	7.820752E-10	.4621	.4637386
610	7.893839E-10	.408	.4325998
620	7.966404E-10	.3539	.4040317
630	8.038459E-10	.3539	.377849
640	8.110016E-10	.2998	.3538768
650	8.181085E-10	.2998	.3319506
660	8.251678E-10	.2457	.3119157
670	8.321805E-10	.2457	.2936268
680	8.391475E-10	.1916	.2769482
690	8.460699E-10	.1916	.2617528
700	8.529486E-10	.1916	.2479217
710	8.597844E-10	.1916	.2353446
720	8.665783E-10	.1376	.2239185

PARAMETRO P : 12.8739
PARAMETRO RMS : 11.45231

MODELO DIFUSIVO:

$$DIF.EF. = 2.133975E-12 \times TIEMPO^{.56275}$$

donde DIF.EF. en m²/s
TIEMPO en s
TIEMPO DE EJECUCION : 8.929688 SEGUNDOS

CUADRO 12: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 2 m/s - METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO

METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO
ESTE PROGRAMA SIMULA LA VARIACION DE LA HUMEDAD
A TRAVES DEL TIEMPO EN UNA PLANCHA INFINITA
Y ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

* SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

ESPEJOR DE LA PLANCHA (m) = .007
INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
HUMEDAD INICIAL (dec. bs) = 13.1643
HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec. bs) = .12
TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 50
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 2
HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 20

TIEMPO DE SECADO (MIN)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g agua/g ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g agua/g ms)
0	0	13.1643	12.63738
10	4.83107E-11	12.613	12.47475
20	8.426278E-11	12.0618	12.13091
30	1.166697E-10	11.6286	11.72229
40	1.469698E-10	10.9199	11.30317
50	1.757938E-10	10.3686	10.88951
60	2.034936E-10	9.9748	10.48333
70	2.302921E-10	9.5811	10.08375
80	2.563425E-10	9.1086	9.689781
90	2.81756E-10	8.8329	9.300654
100	3.066168E-10	8.3998	8.915784
110	3.309907E-10	8.006	8.534715
120	3.549303E-10	7.5729	8.157112
130	3.784787E-10	7.2185	7.78279
140	4.016718E-10	6.7854	7.411756
150	4.245398E-10	6.4703	7.044245
160	4.471085E-10	6.0766	6.680738
170	4.694002E-10	5.6828	6.321947
180	4.914344E-10	5.4466	5.968764
190	5.13228E-10	5.0922	5.622203
200	5.347962E-10	4.8559	5.283332
210	5.561525E-10	4.6197	4.953212

220	5.773088E-10	4.3046	4.632853
230	5.982759E-10	4.0684	4.323168
240	6.190639E-10	3.7928	4.024958
250	6.396814E-10	3.5959	3.738887
260	6.601367E-10	3.3596	3.465487
270	6.804372E-10	3.1627	3.205148
280	7.005898E-10	2.9265	2.95813
290	7.206006E-10	2.7296	2.724564
300	7.404757E-10	2.5721	2.504468
310	7.602204E-10	2.4146	2.297752
320	7.798397E-10	2.2571	2.104232
330	7.993383E-10	2.0996	1.92364
340	8.187206E-10	1.9814	1.755637
350	8.379906E-10	1.8633	1.599823
360	8.571522E-10	1.7058	1.455747
370	8.76209E-10	1.5877	1.322917
380	8.951643E-10	1.4696	1.20081
390	9.140214E-10	1.3908	1.088882
400	9.327833E-10	1.3121	.9865736
410	9.514537E-10	1.1939	.8933169
420	9.700325E-10	1.1152	.8085446
430	9.88525E-10	.997	.7316934
440	1.006933E-09	.8789	.6622095
450	1.025258E-09	.8002	.5995529
460	1.043504E-09	.7214	.5432005
470	1.061671E-09	.6427	.4926493
480	1.079762E-09	.5639	.4474183
490	1.097778E-09	.4852	.4070503
500	1.115722E-09	.4458	.3711131
510	1.133596E-09	.4064	.3392001
520	1.1514E-09	.367	.3109308
530	1.169137E-09	.3276	.2859505
540	1.186808E-09	.2883	.2639301
550	1.204414E-09	.2883	.2445659
560	1.221958E-09	.2489	.2275782
570	1.239439E-09	.2489	.2127108
580	1.25686E-09	.2095	.1997297
590	1.274222E-09	.2095	.1884222
600	1.291526E-09	.2095	.1785956
610	1.308773E-09	.1701	.1700755
620	1.325965E-09	.1701	.1627054
630	1.343101E-09	.1701	.1563445
640	1.360184E-09	.1701	.1508672
650	1.377215E-09	.1701	.1461613
660	1.394193E-09	.1308	.1421274

PARAMETRO P : 10.73423
PARAMETRO RMS : 6.843071

MODELO DIFUSIVO:

$$DIF.EF. = 2.847285E-13 \times TIEMPO^2 .8025526$$

donde DIF.EF. en m^2/s
TIEMPO en s
TIEMPO DE EJECUCION : 5.550781 SEGUNDOS

CUADRO 13: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 1 m/s - METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO

METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO
ESTE PROGRAMA SIMULA LA VARIACION DE LA HUMEDAD
A TRAVES DEL TIEMPO EN UNA PLANCHA INFINITA
Y ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

* SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

ESPESOR DE LA PLANCHA (m) = .007
INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
HUMEDAD INICIAL (dec, bs) = 15.835
HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec, bs) = .1
TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 60
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 1
HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 15

TIEMPO DE SECADO (MIN)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g agua/g ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g agua/g ms)
0	0	15.835	15.19939
10	1.250606E-10	14.6147	14.64417
20	1.762435E-10	14.0045	13.92288
30	2.154112E-10	13.3474	13.25128
40	2.483738E-10	12.7373	12.63167
50	2.773771E-10	12.0802	12.05025
60	3.035713E-10	11.6108	11.49766
70	3.27639E-10	11.0006	10.96797
80	3.500243E-10	10.4374	10.45713
90	3.710358E-10	9.9681	9.962246
100	3.908977E-10	9.3579	9.481259
110	4.097794E-10	8.7947	9.012757
120	4.278123E-10	8.2314	8.555893
130	4.451009E-10	7.8559	8.110315
140	4.6173E-10	7.3866	7.676069
150	4.777692E-10	7.0111	7.253481
160	4.932769E-10	6.6826	6.843058
170	5.083023E-10	6.1663	6.44539
180	5.228875E-10	5.7438	6.061073
190	5.37069E-10	5.4153	5.690654
200	5.508782E-10	5.1337	5.334599
210	5.64343E-10	4.8051	4.993272

220	5.774875E-10	4.5235	4.666923
230	5.903337E-10	4.195	4.33569
240	6.029007E-10	3.8195	4.059604
250	6.152059E-10	3.5379	3.778598
260	6.27265E-10	3.3032	3.512514
270	6.390919E-10	3.0216	3.261114
280	6.506997E-10	2.8338	3.024093
290	6.620998E-10	2.6461	2.801088
300	6.733031E-10	2.5522	2.591685
310	6.843194E-10	2.4114	2.395432
320	6.951575E-10	2.3175	2.211848
330	7.05826E-10	2.1298	2.040422
340	7.163323E-10	1.989	1.880632
350	7.266838E-10	1.8951	1.731942
360	7.368868E-10	1.7543	1.593812
370	7.469478E-10	1.7074	1.465701
380	7.568723E-10	1.6604	1.347069
390	7.666657E-10	1.5666	1.237387
400	7.763332E-10	1.4727	1.136132
410	7.858793E-10	1.3788	1.042796
420	7.953085E-10	1.2849	.9568853
430	8.04625E-10	1.1911	.877921
440	8.138327E-10	1.1441	.8054436
450	8.229353E-10	1.0503	.7390113
460	8.319363E-10	.9564	.6782022
470	8.40839E-10	.8156	.6226141
480	8.496465E-10	.7217	.571865
490	8.583619E-10	.6748	.5255931
500	8.669879E-10	.5809	.4834566
510	8.755271E-10	.487	.4451338
520	8.839822E-10	.4401	.4103222
530	8.923554E-10	.3932	.3787382
540	9.006496E-10	.3462	.3501167
550	9.088663E-10	.2993	.3242104
560	9.170079E-10	.2993	.3007888
570	9.250765E-10	.2524	.2796378
580	9.330738E-10	.2054	.2605589
590	9.410018E-10	.1585	.2433684
600	9.488622E-10	.1585	.2278962
610	9.566568E-10	.1585	.213986
620	9.64387E-10	.1116	.2014934

PARAMETRO P : 11.82517
PARAMETRO RMS : 1.942826

MODELO DIFUSIVO:

$$\text{DIF.EF.} = 5.273461\text{E-12} \times \text{TIEMPO}^2 \cdot .4949424$$

donde DIF.EF. en m²/s
TIEMPO en s
TIEMPO DE EJECUCION : 5.269531 SEGUNDOS

CUADRO 14: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 2 m/s - METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO

METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO
ESTE PROGRAMA SIMULA LA VARIACION DE LA HUMEDAD
A TRAVES DEL TIEMPO EN UNA PLANCHA INFINITA
Y ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

* SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

ESPESOR DE LA PLANCHA (m) = .007
INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
HUMEDAD INICIAL (dec. bs) = 11.4688
HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec. bs) = .1
TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 60
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 2
HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 15

TIEMPO DE SECADO (MIN)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g agua/g ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g agua/g ms)
0	0	11.4688	11.00956
10	7.977575E-11	10.9845	10.77218
20	1.309683E-10	10.235	10.34791
30	1.750273E-10	9.5755	9.896968
40	2.150114E-10	8.9591	9.458353
50	2.522151E-10	8.4748	9.034404
60	2.873433E-10	8.1225	8.622395
70	3.208346E-10	7.6382	8.220097
80	3.529854E-10	7.2419	7.82593
90	3.840084E-10	6.8016	7.438748
100	4.140629E-10	6.4054	7.057727
110	4.432719E-10	6.0531	6.682353
120	4.717331E-10	5.7449	6.312473
130	4.995226E-10	5.2606	5.948321
140	5.267159E-10	4.9964	5.590511
150	5.535577E-10	4.6882	5.239955
160	5.794981E-10	4.336	4.897766
170	6.051769E-10	4.0278	4.56514
180	6.304288E-10	3.7636	4.243257
190	6.55284E-10	3.3673	3.933207
200	6.797694E-10	3.0591	3.635938
210	7.039083E-10	2.7509	3.352226

220	7.277219E-10	2.5307	3.082659
230	7.512291E-10	2.3546	2.827643
240	7.744469E-10	2.2225	2.587408
250	7.973907E-10	2.1345	2.362016
260	8.200746E-10	2.0024	2.151387
270	8.425112E-10	1.9143	1.955306
280	8.647124E-10	1.7822	1.773448
290	8.866888E-10	1.6061	1.605392
300	9.084504E-10	1.518	1.450639
310	9.300064E-10	1.3419	1.300627
320	9.513652E-10	1.2539	1.178746
330	9.725347E-10	1.2539	1.060351
340	9.935223E-10	1.1658	.9527748
350	1.014335E-09	1.0777	.8553391
360	1.034978E-09	.9897	.7673622
370	1.055459E-09	.9016	.688169
380	1.075783E-09	.8136	.6170968
390	1.095956E-09	.7695	.5535015
400	1.115981E-09	.7255	.4967627
410	1.135865E-09	.6374	.4462865
420	1.15561E-09	.5934	.4015091
430	1.175222E-09	.5494	.3618982
440	1.194705E-09	.4613	.3269543
450	1.214062E-09	.4173	.2962119
460	1.233297E-09	.3733	.2692386
470	1.252413E-09	.3292	.2456354
480	1.271414E-09	.2852	.2250358
490	1.290302E-09	.2852	.2071044
500	1.309081E-09	.2412	.191536
510	1.327753E-09	.2412	.1780538
520	1.346321E-09	.1971	.1664077
530	1.364788E-09	.1971	.156373
540	1.383155E-09	.1971	.1477482
550	1.401426E-09	.1531	.1403535
560	1.419603E-09	.1531	.134029
570	1.437688E-09	.1531	.1286329
580	1.455682E-09	.1531	.1240401
590	1.473588E-09	.1531	.1201402
600	1.491408E-09	.1091	.1168366

PARAMETRO P : 18.64169
PARAMETRO RMS : 9.10837

MODELO DIFUSIVO:
DIF.EF. = $8.221477E-13 \times \text{TIEMPO} \wedge .7151954$

donde DIF.EF. en m^2/s
TIEMPO en s
TIEMPO DE EJECUCION : 5.109375 SEGUNDOS

CUADRO 15: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 1 m/s - METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO

METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO
 ESTE PROGRAMA SIMULA LA VARIACION DE LA HUMEDAD
 A TRAVES DEL TIEMPO EN UNA PLANCHA INFINITA
 Y ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

 * SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

ESPESOR DE LA PLANCHA (m) = .007
 INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
 HUMEDAD INICIAL (dec, bs) = 12.7363
 HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec, bs) = .08
 TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 70
 VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 1
 HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 10

TIEMPO DE SECADO (MIN)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g agua/g ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g agua/g ms)
0	0	12.7363	12.22506
10	8.382547E-11	12.1538	11.9876
20	1.704528E-10	11.3164	11.42939
30	2.581702E-10	10.4791	10.78078
40	3.46603E-10	9.6782	10.1204
50	4.355716E-10	8.8409	9.457701
60	5.249696E-10	8.1127	8.793396
70	6.147263E-10	7.421	8.127788
80	7.047911E-10	6.7293	7.461379
90	7.951262E-10	6.1104	6.795801
100	8.857022E-10	5.4915	6.134964
110	9.764953E-10	4.9091	5.485394
120	1.067486E-09	4.3994	4.855398
130	1.158659E-09	3.9625	4.25369
140	1.25E-09	3.4892	3.688164
150	1.341497E-09	3.0524	3.165112
160	1.43314E-09	2.6519	2.688886
170	1.52492E-09	2.3607	2.261862
180	1.61683E-09	2.033	1.884595
190	1.708861E-09	1.7418	1.556063
200	1.801009E-09	1.5233	1.273979
210	1.893267E-09	1.2685	1.035101

220	1.98543E-09	1.0137	.835339
230	2.078093E-09	.8316	.6710362
240	2.170653E-09	.7224	.53721
250	2.263305E-09	.6132	.4297493
260	2.356046E-09	.504	.3445653
270	2.448872E-09	.3948	.2778969
280	2.541781E-09	.3219	.2263763
290	2.634768E-09	.2855	.1870593
300	2.727833E-09	.2127	.1574275
310	2.820972E-09	.1399	.1353707
320	2.914182E-09	.1035	.1191538
330	3.007463E-09	.1035	.1073763
340	3.10081E-09	.1035	9.892678E-02
350	3.194224E-09	.1035	9.293832E-02
360	3.287701E-09	.1035	.0887453

PARAMETRO P : 12.79125
PARAMETRO RMS : 8.118391

MODELO DIPUSIVO:

$$DIF.EF. = 1.198932E-13 \times TIEMPO \sim 1.023912$$

donde DIF_EF. en m^2/s
TIEMPO en s
TIEMPO DE EJECUCION : 3.570313 SEGUNDOS

CUADRO 16: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 2 m/s - METODO DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO

METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO
 ESTE PROGRAMA SIMULA LA VARIACION DE LA HUMEDAD
 A TRAVES DEL TIEMPO EN UNA PLANCHA INFINITA
 Y ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

 * SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

ESPEJOR DE LA PLANCHA (m) = .007
 INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
 HUMEDAD INICIAL (dec, bs) = 13.4928
 HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec, bs) = .08
 TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 70
 VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 2
 HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 10

TIEMPO DE SECADO (MIN)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g agua/g ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g agua/g ms)
0	0	13.4928	12.951
10	1.545776E-10	12.7481	12.4688
20	2.706972E-10	11.656	11.65878
30	3.756877E-10	10.5142	10.84846
40	4.740465E-10	9.4718	10.0629
50	5.677512E-10	8.7271	9.296128
60	6.579064E-10	7.8336	8.544054
70	7.45213E-10	7.1386	7.804444
80	8.30153E-10	6.394	7.077425
90	9.130766E-10	5.7486	6.366306
100	9.942491E-10	5.1529	5.677267
110	1.073878E-09	4.5572	5.017948
120	1.152129E-09	4.0112	4.395854
130	1.229139E-09	3.4651	3.817233
140	1.305021E-09	3.068	3.286532
150	1.37987E-09	2.6708	2.806279
160	1.453769E-09	2.2737	2.377223
170	1.526786E-09	1.9262	1.998587
180	1.598985E-09	1.7276	1.668361
190	1.670418E-09	1.5291	1.383611
200	1.741135E-09	1.3309	1.140758
210	1.811176E-09	1.1819	.935837

220	1.880581E-09	.983	.7647097
230	1.949384E-09	.8341	.6232443
240	2.017616E-09	.6852	.5074524
250	2.085304E-09	.5362	.4135905
260	2.152476E-09	.4369	.3382262
270	2.219154E-09	.3377	.2782781
280	2.285361E-09	.2384	.2310296
290	2.351116E-09	.1887	.1941264
300	2.416437E-09	.1887	.16556
310	2.481342E-09	.1391	.1436411
320	2.545848E-09	.1391	.1269687
330	2.609968E-09	.1391	.1143957
340	2.673717E-09	.1391	.1049945
350	2.737107E-09	.1391	9.802387E-02
360	2.800151E-09	.0895	9.289833E-02

PARAMETRO P : 11.2598
PARAMETRO RMS : 8.221662

MODELO DIFUSIVO:
DIF.EF. = $8.77874E-13 \times \text{TIEMPO} = .8083485$

donde DIF.EF. en m^2/s
TIEMPO en s
TIEMPO DE EJECUCION : 3.570313 SEGUNDOS

CUADRO 17: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 1 m/s - METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

METODO DE DIFERENCIAS FINITAS - ESQUEMA IMPLICITO
 ESTE PROGRAMA ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA
 Y SIMULA LA VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD
 A TRAVES DEL TIEMPO DE SECADO

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

 * SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

NUMERO DE PARTES = 10
 ESPESOR DE LA PLANCHA (m) = .007
 INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
 HUMEDAD INICIAL (dec. bs) = 16.094
 HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec. bs) = .12
 DMIN (m²/s) = 1E-10
 DMAX (m²/s) = 2E-09
 TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 50
 VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 1
 HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 20

TIEMPO DE SECADO (min)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g. agua/g. ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g. agua/g. ms)
0	1.153479E-10	16.094	16.094
10	1.181167E-10	15.5531	14.78613
20	1.223375E-10	14.904	14.21208
30	1.278525E-10	14.3091	13.74039
40	1.345104E-10	13.7141	13.32693
50	1.42166E-10	13.2273	12.94752
60	1.506805E-10	12.4159	12.58976
70	1.599214E-10	11.9291	12.24593
80	1.697623E-10	11.3882	11.912
90	1.800833E-10	10.7932	11.58475
100	1.907707E-10	10.3605	11.2622
110	2.017172E-10	9.8737	10.94306
120	2.128216E-10	9.441	10.62677
130	2.239895E-10	9.0624	10.31238
140	2.351311E-10	8.6837	9.999884
150	2.461655E-10	8.251	9.688892
160	2.570163E-10	7.8724	9.380217
170	2.676139E-10	7.4397	9.073786
180	2.778948E-10	7.061	8.769868
190	2.87802E-10	6.6824	8.468927
200	2.972847E-10	6.3038	8.171378
210	3.062984E-10	5.9792	7.877758
220	3.148048E-10	5.6547	7.588609

230	3.227721E-10	5.3843	7.504478
240	3.301747E-10	5.0597	7.025905
250	3.36993E-10	4.7893	6.753402
260	3.432142E-10	4.5729	6.487442
270	3.488315E-10	4.3565	6.228452
280	3.538443E-10	4.2484	5.976802
290	3.582584E-10	4.1943	5.7328
300	3.620861E-10	4.0861	5.496687
310	3.653455E-10	3.8697	5.268643
320	3.680615E-10	3.7075	5.048776
330	3.70265E-10	3.5452	4.837134
340	3.719933E-10	3.3829	4.633706
350	3.732898E-10	3.2207	4.438424
360	3.742045E-10	3.0584	4.251169
370	3.747934E-10	2.9502	4.071775
380	3.751189E-10	2.7339	3.900038
390	3.752498E-10	2.5716	3.735717
400	3.752611E-10	2.4634	3.57854
410	3.752339E-10	2.3552	3.42821
420	3.75256E-10	2.193	3.284408
430	3.754211E-10	2.0848	3.146801
440	3.758293E-10	1.9225	3.015041
450	3.765872E-10	1.7602	2.888773
460	3.778074E-10	1.6521	2.767635
470	3.796089E-10	1.5439	2.651264
480	3.821171E-10	1.4357	2.5393
490	3.854636E-10	1.3279	2.431385
500	3.897861E-10	1.2193	2.32717
510	3.952289E-10	1.1653	2.226318
520	4.019425E-10	1.0571	2.128505
530	4.100836E-10	.9489	2.033423
540	4.198151E-10	.8948	1.940789
550	4.313065E-10	.8407	1.850342
560	4.447334E-10	.7325	1.761851
570	4.602776E-10	.6244	1.675117
580	4.781273E-10	.5703	1.589981
590	4.984771E-10	.5162	1.506324
600	5.215277E-10	.4621	1.424073
610	5.474861E-10	.408	1.343202
620	5.765656E-10	.3539	1.263737
630	6.08986E-10	.3539	1.185754
640	6.449732E-10	.2998	1.109378
650	6.847594E-10	.2998	1.034779
660	7.285829E-10	.2457	.9621652
670	7.766888E-10	.2457	.8917757
680	8.29328E-10	.1916	.8238676
690	8.867579E-10	.1916	.7572846
700	9.492421E-10	.1916	.693539
710	1.017051E-09	.1916	.6348104
720	1.09046E-09	.1376	.5795897

PARAMETRO P : 87.862
PARAMETRO RMS : 21.65709
LOS VALORES C(I) SON:
C(0) : 1.153479E-10
C(1) : 3.314464E-15
C(2) : 2.243669E-18
C(3) : =1.289652E-22
C(4) : 2.021929E-27

TIEMPO DE EJECUCION : 40.42969 SEGUNDOS

CUADRO 18: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 2 m/s - METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

METODO DE DIFERENCIAS FINITAS = ESQUEMA IMPLICITO
 ESTE PROGRAMA ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA
 Y SIMULA LA VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD
 A TRAVÉS DEL TIEMPO DE SECADO

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

 * SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

NUMERO DE PARTES	=	10
ESPESOR DE LA PLANCHA (m)	=	.007
INCREMENTO DE TIEMPO (s)	=	600
HUMEDAD INICIAL (dec, bs)	=	13.1643
HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec, bs)	=	.12
DMIN (m ² /s)	=	1E-10
DMAX (m ² /s)	=	2E-09
TEMPERATURA DEL BULBO SECO (x0)	=	50
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)	=	2
HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%)	=	20

TIEMPO DE SECADO (min)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g. agua/g.ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g. agua/g.ms)
0	1.154475E-10	13.1643	13.1643
10	1.191761E-10	12.613	12.09222
20	1.247494E-10	12.0618	11.61703
30	1.31955E-10	11.6286	11.22324
40	1.405904E-10	10.9199	10.87488
50	1.504623E-10	10.3686	10.55228
60	1.613869E-10	9.9748	10.24547
70	1.731901E-10	9.5811	9.94832
80	1.857071E-10	9.1086	9.657741
90	1.987826E-10	8.8329	9.371309
100	2.122709E-10	8.3998	9.087588
110	2.260355E-10	8.006	8.805935
120	2.399498E-10	7.5729	8.525433
130	2.538963E-10	7.2185	8.246083
140	2.677673E-10	6.7854	7.967925
150	2.814643E-10	6.4703	7.690667
160	2.948985E-10	6.0766	7.415245
170	3.079905E-10	5.6828	7.141791
180	3.206704E-10	5.4466	6.870747
190	3.328778E-10	5.0922	6.602647
200	3.445617E-10	4.8559	6.338069
210	3.556808E-10	4.6197	6.077614
220	3.662029E-10	4.3046	5.821879

230	3.761057E-10	4.0684	5.571442
240	3.853761E-10	3.7928	5.326842
250	3.940107E-10	3.5959	5.088565
260	4.020154E-10	3.3596	4.857036
270	4.094057E-10	3.1627	4.632609
280	4.162066E-10	2.9265	4.415563
290	4.224524E-10	2.7296	4.2061
300	4.281871E-10	2.5721	4.004346
310	4.33464E-10	2.4146	3.81036
320	4.383462E-10	2.2571	3.624128
330	4.429059E-10	2.0996	3.445579
340	4.47225E-10	1.9814	3.274583
350	4.513949E-10	1.8633	3.110966
360	4.555163E-10	1.7058	2.95451
370	4.596997E-10	1.5877	2.804964
380	4.640647E-10	1.4696	2.66205
390	4.687498E-10	1.3908	2.525469
400	4.738666E-10	1.3121	2.394907
410	4.795904E-10	1.1939	2.270041
420	4.860699E-10	1.1152	2.150545
430	4.934724E-10	.997	2.036096
440	5.019747E-10	.8789	1.926378
450	5.117628E-10	.8002	1.821084
460	5.230325E-10	.7214	1.719927
470	5.35989E-10	.6427	1.622638
480	5.508468E-10	.5639	1.528973
490	5.678302E-10	.4852	1.438716
500	5.871727E-10	.4458	1.351682
510	6.091175E-10	.4064	1.267723
520	6.339171E-10	.367	1.186723
530	6.618338E-10	.3276	1.108606
540	6.931388E-10	.2883	1.033334
550	7.281135E-10	.2883	.9609026
560	7.670483E-10	.2489	.8913422
570	8.102431E-10	.2489	.8247109
580	8.580076E-10	.2095	.7610893
590	9.106607E-10	.2095	.7005728
600	9.685308E-10	.2095	.6432629
610	1.031956E-09	.1701	.5892589
620	1.101284E-09	.1701	.538648
630	1.176871E-09	.1701	.4914979
640	1.259084E-09	.1701	.4478491
650	1.348299E-09	.1701	.40771
660	1.444901E-09	.1308	.3710531

PARAMETRO P : 95.28371
PARAMETRO RMS : 17.35966
LOS VALORES C(I) SON:
C(0) : 1.154475E-10
C(1) : 4.555333E-15
C(2) : 2.868736E-18
C(3) : -1.747008E-22
C(4) : 3.049537E-27

TIEMPO DE EJECUCION : 37.56836 SEGUNDOS

CUADRO 19: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 1 m/s - METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

METODO DE DIFERENCIAS FINITAS - ESQUEMA IMPLICITO
ESTE PROGRAMA ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA
Y SIMULA LA VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD
A TRAVES DEL TIEMPO DE SECADO

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

* SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

NUMERO DE PARTES = 10
ESPEJOR DE LA PLANCHA (m) = .007
INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
HUMEDAD INICIAL (dec. bs) = 15.835
HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec. bs) = .1
DMIN (m²/s) = 1E-10
DMAX (m²/s) = 2E-09
TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 60
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 1
HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 15

TIEMPO DE SECADO (min)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g. agua/g. ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g. agua/g. ms)
0	1.913454E-10	15.835	15.835
10	1.737634E-10	14.6147	14.30913
20	1.624851E-10	14.0045	13.65808
30	1.568648E-10	13.3474	13.16149
40	1.562829E-10	12.7373	12.7438
50	1.601468E-10	12.0802	12.36745
60	1.678907E-10	11.6108	12.01288
70	1.789752E-10	11.0006	11.6682
80	1.928879E-10	10.4374	11.32678
90	2.091428E-10	9.9681	10.98409
100	2.272808E-10	9.3579	10.63758
110	2.468696E-10	8.7947	10.2862
120	2.675033E-10	8.2314	9.929085
130	2.888028E-10	7.8559	9.566728
140	3.104159E-10	7.3866	9.199913
150	3.320169E-10	7.0111	8.829757
160	3.533069E-10	6.6826	8.457653
170	3.740135E-10	6.1663	8.085214
180	3.938913E-10	5.7438	7.714203
190	4.127213E-10	5.4153	7.346472
200	4.303115E-10	5.1337	6.983893
210	4.464964E-10	4.8051	6.62829
220	4.611372E-10	4.5235	6.281373

230	4.741218E-10	4.195	5.944693
240	4.85365E-10	3.8195	5.619599
250	4.94808E-10	3.5379	5.307211
260	5.02419E-10	3.3032	5.008407
270	5.081925E-10	3.0216	4.72382
280	5.121502E-10	2.8338	4.453849
290	5.143401E-10	2.6461	4.198673
300	5.148371E-10	2.5522	3.95827
310	5.137426E-10	2.4114	3.732445
320	5.11185E-10	2.3175	3.520851
330	5.073192E-10	2.1298	3.323013
340	5.023268E-10	1.989	3.138355
350	4.964161E-10	1.8951	2.966217
360	4.898222E-10	1.7543	2.805685
370	4.828069E-10	1.7074	2.656237
380	4.756585E-10	1.6604	2.517008
390	4.686921E-10	1.5666	2.387177
400	4.622497E-10	1.4727	2.265913
410	4.566998E-10	1.3788	2.152378
420	4.524375E-10	1.2849	2.045743
430	4.498848E-10	1.1911	1.945186
440	4.494904E-10	1.1441	1.849902
450	4.517295E-10	1.0503	1.759111
460	4.571042E-10	.9564	1.672061
470	4.641432E-10	.8156	1.588043
480	4.72402E-10	.7217	1.506395
490	4.974627E-10	.6748	1.426523
500	5.20934E-10	.5809	1.347911
510	5.504516E-10	.487	1.270149
520	5.866776E-10	.4401	1.192943
530	6.30301E-10	.3932	1.116145
540	6.826374E-10	.3462	1.039761
550	7.42629E-10	.2993	.9639622
560	8.12845E-10	.2993	.8878106
570	8.93481E-10	.2524	.8126541
580	9.853596E-10	.2054	.7391599
590	1.08933E-09	.1585	.668045
600	1.206267E-09	.1585	.6000486
610	1.337074E-09	.1585	.5358728
620	1.482681E-09	.1116	.4761286

PARAMETRO P : 80.3172
PARAMETRO RMS : 12.30209
LOS VALORES C(i) SON:
C(0) : 1.913454E-10
C(1) : -3.492674E-14
C(2) : 9.686647E-18
C(3) : -5.293896E-22
C(4) : 8.583862E-27

TIEMPO DE EJECUCION : 37.45898 SEGUNDOS

CUADRO 20: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 2 m/s - METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

METODO DE DIFERENCIAS FINITAS - ESQUEMA IMPLICITO
ESTE PROGRAMA ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA
Y SIMULA LA VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD
A TRAVES DEL TIEMPO DE SECADO

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

* SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

NUMERO DE PARTES = 10
ESPESOR DE LA PLANCHA (m) = .007
INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
HUMEDAD INICIAL (dec, bs) = 11.4688
HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec, bs) = .1
DMIN (m²/s) = 1E-10
DMAX (m²/s) = 2E-09
TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 60
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 2
HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 15

TIEMPO DE SECADO (min)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g. agua/g. ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g. agua/g. ms)
0	1.284587E-10	11.4688	11.4688
10	1.387876E-10	10.9845	10.47083
20	1.514018E-10	10.235	10.0037
30	1.659677E-10	9.5755	9.609616
40	1.821737E-10	8.9591	9.254372
50	1.997247E-10	8.4748	8.920923
60	2.18342E-10	8.1225	8.59999
70	2.377632E-10	7.6382	8.286654
80	2.577425E-10	7.2419	7.978701
90	2.780502E-10	6.8016	7.674508
100	2.984731E-10	6.4054	7.372762
110	3.188144E-10	6.0531	7.073353
120	3.388937E-10	5.7449	6.776315
130	3.585469E-10	5.2606	6.481917
140	3.776262E-10	4.9964	6.190634
150	3.960004E-10	4.6882	5.903102
160	4.135546E-10	4.336	5.620075
170	4.3019E-10	4.0278	5.342376
180	4.458247E-10	3.7636	5.070855
190	4.603928E-10	3.5673	4.806347
200	4.738447E-10	3.0591	4.549633
210	4.861476E-10	2.7509	4.30141
220	4.972847E-10	2.5307	4.062271

230	5.072557E-10	2.3546	3.83269
240	5.160767E-10	2.2225	3.613012
250	5.237802E-10	2.1345	3.403457
260	5.304149E-10	2.0024	3.204126
270	5.360462E-10	1.9143	3.015002
280	5.407556E-10	1.7822	2.83597
290	5.446409E-10	1.6061	2.666827
300	5.478167E-10	1.518	2.507289
310	5.504137E-10	1.3419	2.357016
320	5.525788E-10	1.2539	2.215614
330	5.544756E-10	1.2539	2.082652
340	5.56284E-10	1.1658	1.957851
350	5.582001E-10	1.0777	1.840616
360	5.604366E-10	.9897	1.730408
370	5.632225E-10	.9016	1.626738
380	5.668032E-10	.8136	1.52912
390	5.714403E-10	.7695	1.437085
400	5.77412E-10	.7255	1.35018
410	5.850128E-10	.6374	1.267976
420	5.945535E-10	.5934	1.19007
430	6.063613E-10	.5494	1.116092
440	6.207802E-10	.4613	1.045703
450	6.381699E-10	.4173	.9786912
460	6.589067E-10	.3733	.9145268
470	6.833835E-10	.3292	.8532609
480	7.120095E-10	.2852	.7946295
490	7.4521E-10	.2852	.7385036
500	7.834271E-10	.2412	.6847984
510	8.27119E-10	.2412	.6334718
520	8.767603E-10	.1971	.5845194
530	9.32842E-10	.1971	.5379693
540	9.958717E-10	.1971	.4938732
550	1.066373E-09	.1531	.452298
560	1.144886E-09	.1531	.4133152
570	1.231967E-09	.1531	.379611
580	1.32819E-09	.1531	.3483548
590	1.434143E-09	.1531	.3195124
600	1.550433E-09	.1091	.2930554

PARAMETRO P :	78.96257
PARAMETRO RMS :	18.05404
LOS VALORES C(i) SON:	
C(0) :	1.284527E-10
C(1) :	1.51363E-14
C(2) :	3.642055E-18
C(3) :	-2.719224E-22
C(4) :	5.265359E-27

TIEMPO DE EJECUCION : 34.82031 SEGUNDOS

CUADRO 21: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 1 m/s - METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

METODO DE DIFERENCIAS FINITAS - ESQUEMA IMPLICITO
 ESTE PROGRAMA ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA
 Y SIMULA LA VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD
 A TRAVES DEL TIEMPO DE SECADO

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)

 * SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

NUMERO DE PARTES = 10
 ESPESOR DE LA PLANCHA (m) = .001
 INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
 HUMEDAD INICIAL (dec. bs) = 12.7363
 HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec. bs) = .08
 DMIN (m²/s) = 1E-10
 DMAX (m²/s) = 2E-09
 TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 70
 VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 1
 HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 10

TIEMPO DE SECADO (min)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g. agua/g. ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g. agua/g. ms)
0	0	12.7363	12.7363
10	8.190813E-12	12.1538	12.2506
20	1.135111E-10	11.3164	11.67609
30	2.031034E-10	10.4791	11.01376
40	2.789173E-10	9.6782	10.36691
50	3.42808E-10	8.8409	9.749419
60	3.965369E-10	8.1127	9.160949
70	4.41771E-10	7.421	8.600166
80	4.800835E-10	6.7293	8.06495
90	5.129531E-10	6.1104	7.553789
100	5.417646E-10	5.4915	7.064776
110	5.678087E-10	4.9091	6.597227
120	5.922819E-10	4.3994	6.149862
130	6.162865E-10	3.9625	5.721635
140	6.408307E-10	3.4892	5.311581
150	6.668288E-10	3.0524	4.918797
160	6.951006E-10	2.6519	4.542474
170	7.263722E-10	2.3607	4.181691
180	7.612753E-10	2.033	3.835895
190	8.003474E-10	1.7418	3.504813
200	8.440321E-10	1.5233	3.188347
210	8.926788E-10	1.2685	2.886627
220	9.465427E-10	1.0137	2.599994

230	1.005785E-09	.8316	2.328956
240	1.070473E-09	.7224	2.072854
250	1.140579E-09	.6132	1.833397
260	1.215981E-09	.504	1.611241
270	1.296466E-09	.3948	1.406916
280	1.381723E-09	.3219	1.22075
290	1.471348E-09	.2855	1.052813
300	1.564844E-09	.2127	.902885
310	1.661618E-09	.1399	.7704508
320	1.760986E-09	.1035	.6571085
330	1.862167E-09	.1035	.5590006
340	1.964286E-09	.1035	.4748637
350	2.066375E-09	.1035	.4060347
360	2.167372E-09	.1035	.3509811

PARAMETRO P :	147.8185
PARAMETRO RMS :	16.31203
LOS VALORES C(I) SON:	
C(0) :	-1.149011E-10
C(1) :	2.211374E-13
C(2) :	-2.7641E-17
C(3) :	1.685814E-21
C(4) :	-3.026134E-26

TIEMPO DE EJECUCION : 26.96875 SEGUNDOS

CUADRO 22: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 2 m/s - METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

METODO DE DIFERENCIAS FINITAS - ESQUEMA IMPLICITO
ESTE PROGRAMA ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA
Y SIMULA LA VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD
A TRAVES DEL TIEMPO DE SECADO

AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO [1995]

* SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA *

LOS DATOS DE ENTRADA SON :

NUMERO DE PARTES = 10
ESPEJOR DE LA PLANCHA (m) = .007
INCREMENTO DE TIEMPO (s) = 600
HUMEDAD INICIAL (dec. bs) = 13.4928
HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec. bs) = .08
DMIN (m²/s) = 1E-10
DMAX (m²/s) = 2E-09
TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) = 70
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) = 2
HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) = 10

TIEMPO DE SECADO (min)	DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m ² /s)	HUMEDAD EXPERIMENTAL (g. agua/g. ms)	HUMEDAD PREDECIDA (g. agua/g. ms)
0	0	13.4928	13.4928
10	2.540809E-11	12.7481	12.85443
20	1.78145E-10	11.656	12.06466
30	3.026414E-10	10.5142	11.21952
40	4.02692E-10	9.4718	10.41386
50	4.818755E-10	8.7271	9.656593
60	5.435548E-10	7.8336	8.94574
70	5.908765E-10	7.1386	8.27991
80	6.267715E-10	6.394	7.656812
90	6.539545E-10	5.7486	7.074537
100	6.749242E-10	5.1529	6.530989
110	6.919634E-10	4.5572	6.02387
120	7.071387E-10	4.0112	5.550637
130	7.223011E-10	3.4651	5.10853
140	7.39085E-10	3.068	4.694698
150	7.589093E-10	2.6708	4.306338
160	7.829766E-10	2.2737	3.940852
170	8.122737E-10	1.9262	3.595978
180	8.475713E-10	1.7276	3.269888
190	8.89424E-10	1.5291	2.961255
200	9.381705E-10	1.3305	2.669259
210	9.939336E-10	1.1319	2.393564
220	1.05662E-09	.983	2.133017

230	1.12592E-09	.8341	1.888988
240	1.201308E-09	.6852	1.662054
250	1.282044E-09	.5362	1.452825
260	1.367169E-09	.4369	1.261798
270	1.455511E-09	.3377	1.089236
280	1.54568E-09	.2384	.9350984
290	1.636071E-09	.1887	.7989982
300	1.724862E-09	.1887	.6825682
310	1.810016E-09	.1391	.5819732
320	1.88928E-09	.1391	.4959063
330	1.960183E-09	.1391	.4255121
340	2.020042E-09	.1391	.3691564
350	2.065954E-09	.1391	.3215106
360	2.094801E-09	.0895	.2844427

PARAMETRO F :	112.7643
PARAMETRO RMS :	13.58577
LOS VALORES C(i) SON:	
C(0) :	-1.595802E-10
C(1) :	3.375082E-13
C(2) :	-5.063911E-17
C(3) :	3.344747E-21
C(4) :	-6.944635E-26

TIEMPO DE EJECUCION : 27.45898 SEGUNDOS

Fig.12: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 1 m/s

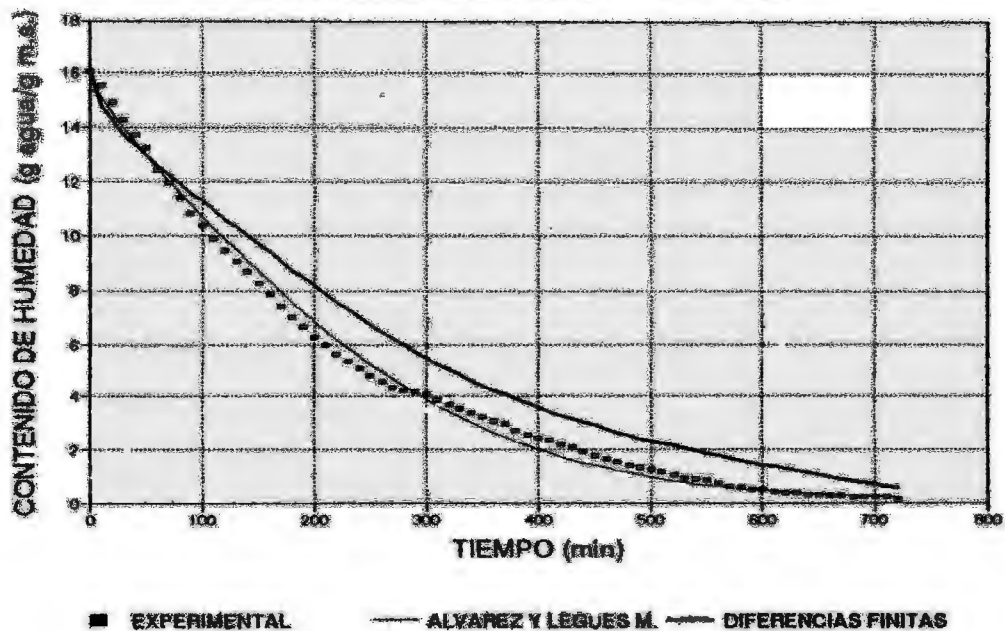


FIG.13: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 50°C Y 2 m/s

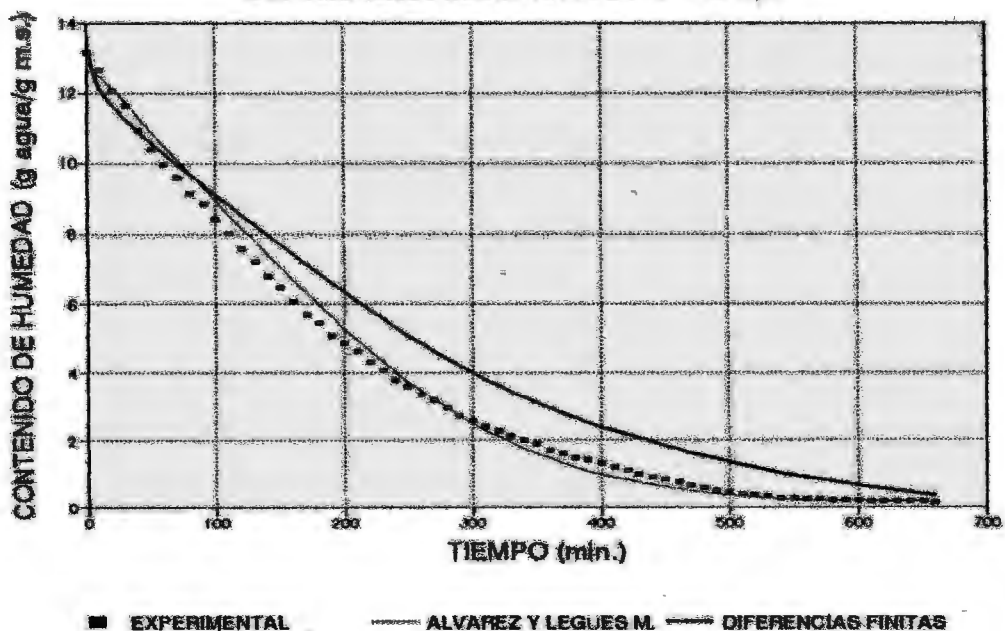


Fig.14: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 1 m/s

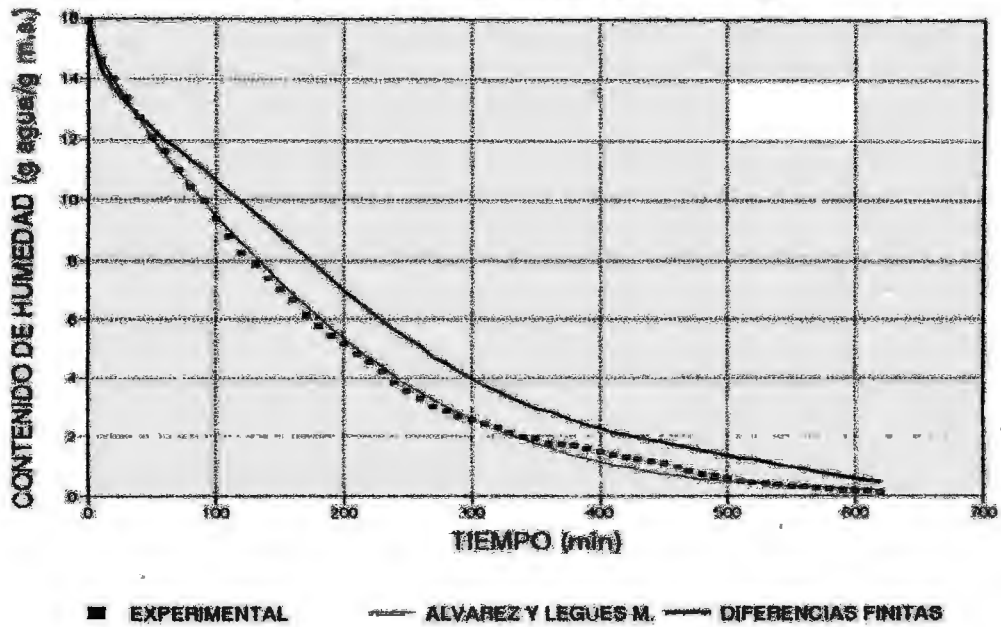


FIG.15: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 60°C Y 2 m/s

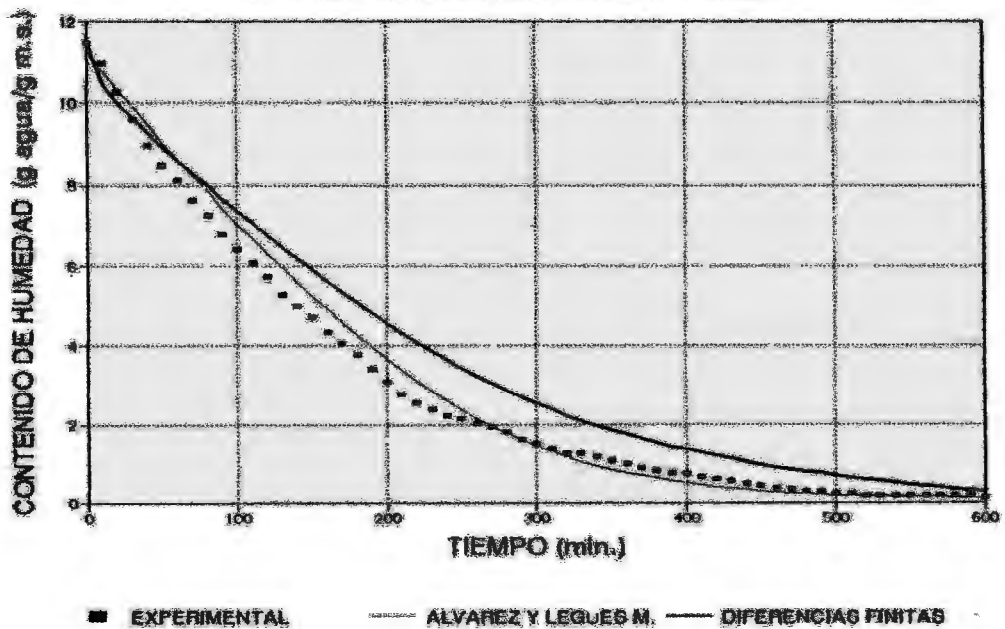


Fig.16: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 1 m/s

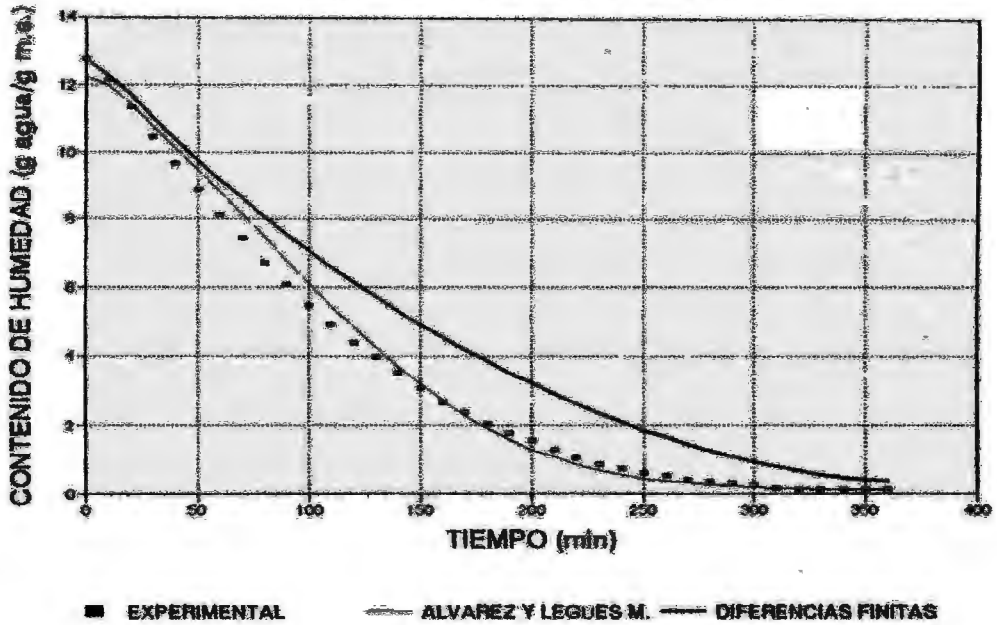
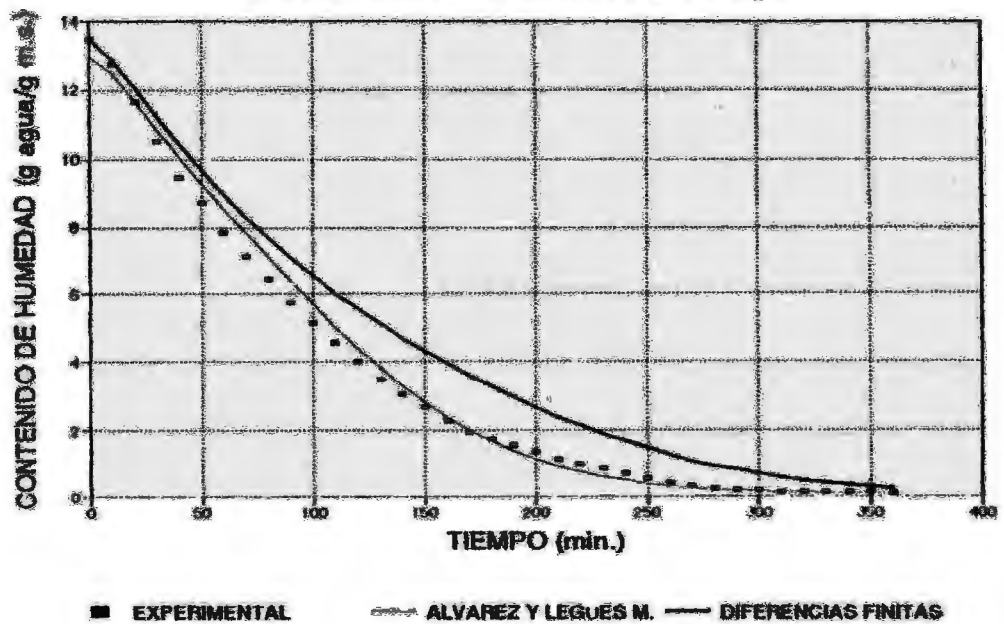


FIG.17: SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 2 m/s



4.10. VALIDACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS

No existe ninguna relación entre los parámetros estadísticos de P y RMS, ni tampoco se cumple siempre que el valor RMS es menor que el valor P. Sin embargo, el parámetro RMS es más confiable según diversas fuentes (Favetto y Chirife, 1984). Por ello, que se tomó en mayor consideración el valor RMS, para efectos de discutir los resultados de la validación.

En los Cuadros 23 y 24 se muestran los parámetros estadísticos P y RMS para cada uno de los tratamientos evaluados, que validarán la metodología de Alvarez y Legües modificada y la metodología de diferencias finitas, respectivamente. Es importante recalcar que la validación de los métodos se efectuó a partir de datos experimentales de cebolla blanca que es un producto anisotrópico y de alto contenido de humedad inicial, y que podrían cambiar si se aplican otros productos del tipo homogéneos y con baja humedad inicial.

Para el método de Alvarez y Legües modificado, se puede apreciar que estos valores estadísticos son bastante bajos, lo cual indica que la correlación es bastante buena y que el modelo matemático propuesto tiene buen ajuste. Para todos los casos, el parámetro estadístico RMS resultó ser menor que el valor P, y se

encontraba entre los valores de 1.94 y 11.45, que son valores bastante bajos.

Para el método basado en las diferencias finitas, se puede apreciar que estos valores estadísticos son altos, lo cual indica que la correlación es mala y que el modelo matemático propuesto no tiene buen ajuste. Para todos los casos, el parámetro estadístico RMS resultó ser menor que el valor P, y se encontraba entre los valores de 12.30 y 21.65, que son valores altos para una correlación aceptable.

Estos resultados de parámetros estadísticos de validación de los programas computacionales P y RMS, reafirman lo discutido sobre los resultados de la simulación, en la que se menciona que el método de Alvarez y Legües modificado es un buen método para predecir las curvas de secado de cebolla blanca mientras que el método basado en las diferencias finitas no lo es.

En cuanto a las diferencias entre los valores de los parámetros P y RMS obtenidos, existe toda una teoría conocida como teoría del error, y que se prefirió no profundizar por no ser motivo de la presente investigación.

CUADRO 23: PARAMETROS ESTADISTICOS P Y RMS PARA LA SIMULACION DEL SECADO, UTILIZANDO LA METODOLOGIA DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADA

TRATAMIENTO	PARAMETROS ESTADISTICOS	
	P (%)	RMS (%)
50.1	12.87	11.45
50.2	10.73	6.84
60.1	11.83	1.94
60.2	15.64	9.11
70.1	12.79	8.12
70.2	11.26	8.22

CUADRO 24: PARAMETROS ESTADISTICOS P Y RMS PARA LA SIMULACION DEL SECADO, UTILIZANDO LA METODOLOGIA DE DIFERENCIAS FINITAS.

TRATAMIENTO	PARAMETROS ESTADISTICOS	
	P (%)	RMS (%)
50.1	87.86	21.66
50.2	95.28	17.36
60.1	80.32	12.30
60.2	78.96	18.05
70.1	147.82	16.31
70.2	112.76	13.39

4.11. CINÉTICA DE LA PERDIDA DE PUNGENCIA DE CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO

En el Cuadro 25 se muestran los valores de las constantes "k" para la solución de las ecuaciones diferenciales de primer orden que describen la cinética de la pérdida de pungencia durante el secado de cebolla blanca, en los diferentes tratamientos. Los cálculos respectivos se presentan en el Anexo 12.

En la Figura 18 se muestran las curvas ajustadas que describen la pérdida de pungencia a través del tiempo de secado en cebolla blanca, a diferentes temperaturas y velocidades de aire de secado.

Como se puede apreciar en las gráficas, no existe una buena correlación entre los valores experimentales para cada tratamiento, lo que se puede explicar por la anisotropía de la cebolla (no es homogénea). Sin embargo, en el análisis entre tratamientos, se aprecia que existe una buena correlación y que existe una buena lógica entre las tendencias de las curvas. Es decir, a mayores temperaturas de secado mayor pérdida de pungencia, y, a mayores velocidades del aire de secado también mayor pérdida de pungencia.

CUADRO 25: VALORES DE LAS CONSTANTES "K" PARA LA ECUACION DIFERENCIAL DE PRIMER ORDEN QUE DESCRIBE LA CINETICA DE PERDIDA DE PUNGENCIA DE LA CEBOLLA BLANCA DURANTE EL SECADO.

TRATAMIENTO	CONSTANTE "K"
50.1	=
50.2	0.016231
60.1	0.007297
60.2	0.093325
70.1	0.091010
70.2	0.104157

Tratamiento " i,j " quiere decir:

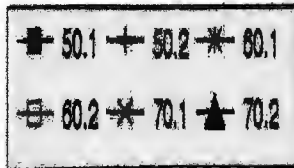
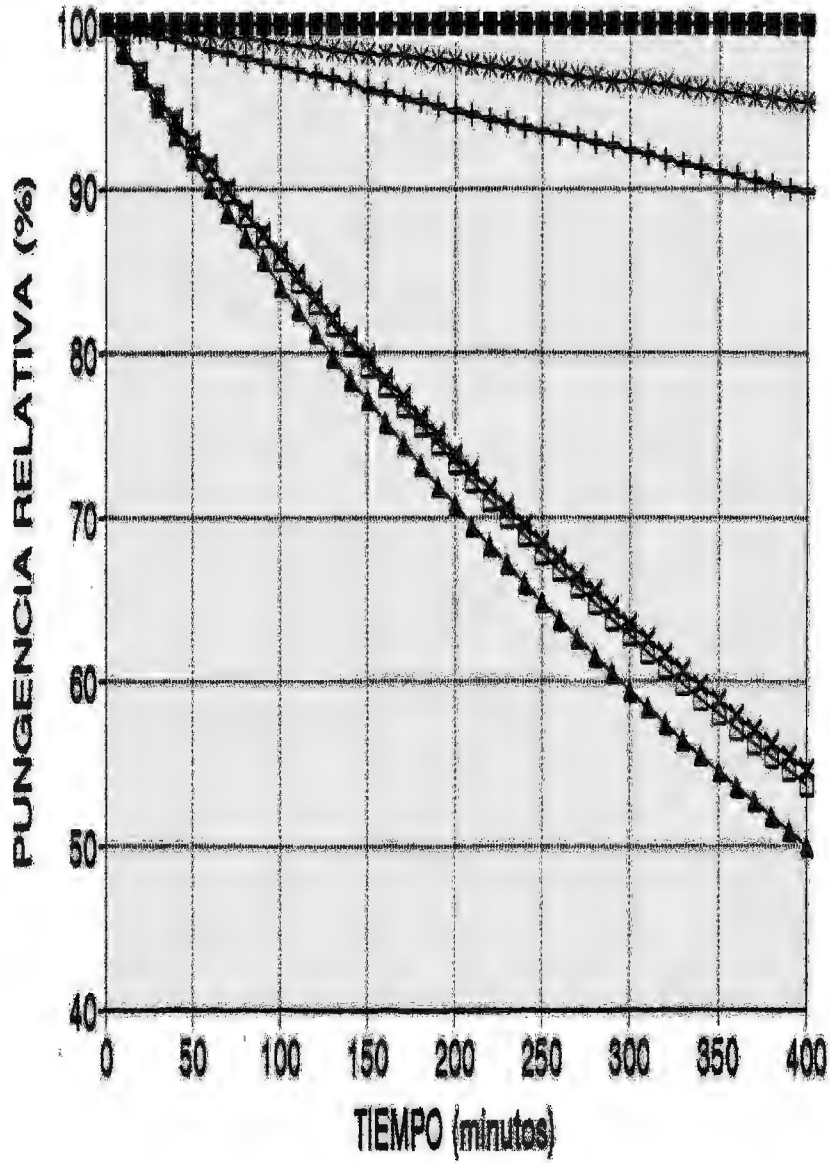
Temperatura : i °C

Velocidad de aire : j m/s

ECUACION:

$$\frac{dP}{dt} = -KP$$

Fig.14: PERDIDA DE PUNGENCIA EN CEBOLLA BLANCA DURANTE EL PROCESO DE SECADO



V. CONCLUSIONES

1. Bajo las condiciones externas del aire, las temperaturas de 70°C resultaron ser más adecuadas para el secado de cebolla blanca arrojando tiempos aproximados de 6 horas, versus las temperaturas de 60 y 50°C, donde los tiempos de secado sobrepasaban las 10 horas.
2. Las temperaturas y las velocidades del aire de secado influyen en la pungencia de la cebolla, acentuándose tales pérdidas a las temperaturas de 70°C o a las velocidades de aire de 2 m/s, por lo que deberían utilizarse técnicas de optimización del proceso.
3. Los resultados de la simulación del secado de cebolla blanca obtenidos por el método de Alvarez y Legües modificado correlacionan mejor que los obtenidos por el método de diferencias finitas.

4. El modelo propuesto para dar solución al problema de transferencia de masa, utilizando el método de Alvarez y Legües modificado, es más adecuado para el caso de cebolla. El modelo bajo la forma de diferencias finitas, por el contrario, no es adecuado para el caso de la cebolla donde muchos supuestos no se cumplen en la realidad.
5. Teniendo como base el método de Alvarez y Legües modificado se encontró que la difusividad efectiva del agua en la cebolla blanca varió considerablemente durante el tiempo de secado, obteniéndose valores entre 1×10^{-10} a 3×10^{-9} , dependiendo las temperaturas y velocidades de aire utilizadas.
6. La pérdida de pungencia en la cebolla blanca durante el proceso de secado puede modelarse bajo la forma de una ecuación diferencial de primer orden con pendiente negativa.
7. Los programas de cómputo utilizados convergen de manera eficiente y pueden ser utilizados para simular otros procesos de secado.

VI. RECOMENDACIONES

1. Compilar los programas sobre la base de otros resultados experimentales de curvas de secado de distintos materiales biológicos.
2. Optimizar el Software, validarlo y mejorar las versiones con lenguajes más modernos (ambiente Windows), buscando siempre acercarnos a la perfección.
3. Evaluar la pérdida de pungencia de la cebolla deshidratada en almacenamiento.
4. Desarrollar otros métodos de determinación de la pungencia en cebollas deshidratadas y comparar.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. ALVAREZ, P.I.; LEGUES, P. 1986. "Deshidratación de agroproductos: Desarrollo de un Modelo Matemático para la Interpretación de las Curvas Experimentales de Secado". Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Chile.
2. AOAC. 1985. Official Methods of Analysis of the Association of Official Agricultural Chemists. Ed. Board USA.
3. BERNHARD, R.A. 1968. "Comparative Distribution of Volatile Aliphatic Disulfides Derived from Fresh and Dehydrated Onions". Journal of Food Science. Vol 33: 298.
4. BLOCK, E. 1985. "Química del Ajo y la Cebolla". Investigación y Ciencia. Rev: 104. Barcelona - España.
5. BRANDWEIN, B.J. 1965. "The Pigments in Three Cultivars of The Common Onion (Allium cepa)". Chemistry Department, South Dakota State University. Pg. 680.

6. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. 1978. "Drying Cereal Grains". The Avi Publishing Company, Inc. USA.
7. COLLAZOS, C. 1974. "La Composición de los Alimentos Peruanos". Instituto Nacional de Salud - Instituto de Nutrición. Lima - Perú.
8. CURRAH, L.; PROCTOR, F. J. 1990. "Onions in Tropical Regions". Natural Resources Institute. Bulletin N° 35.
9. CHIRIFE, J. 1971. "Diffusional Process in the Drying of Tapioca Root", Journal of Food Science. Vol 36: 327.
10. CHIRIFE, J.; FERRO FONTAN, C.; BOQUET, R. 1980. "Correlation of Water Activity Data in Whole Tomato Concentrates. A research Note". Extraído de: Chirife, J. 1986. "Curso: Preservación de Alimentos por Control de la Actividad de Agua". USACH.
11. DJELVEH, G.; GROS, J.B.; BORIES, B. 1989. "An Improvement of the Cell Diffusion Constants in Gels or Foods", Journal of Food Science. Vol 54: 166.

12. FAO. 1992. "Producción Poscosecha, Procesamiento y Comercialización de Ajo, Cebolla y Tomate". Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago. Chile.
13. FAO.(s/a). "Manual de Producción de Semilla de Cebolla". ONU para la Agricultura.
14. FARAG, E.S.; SHABANA, M.R.; SALLAM, H.A. 1981. "Biochemical Studies on Some Chemical Characteristics of Sliced Egyptian Onions". Journal of Food Science. Vol 46: 1394.
15. FAVETTO, G.J.; CHIRIFE, J. 1984. "Simplified Method for the Prediction of Water Activity in Binary Aqueous Solutions". Extraído de: Chirife, J. 1986. "Curso: Preservación de Alimentos por Control de la Actividad de Agua". USACH.
16. FULEKI, T. 1969. "The Anthocyanins of Strawberry, Rhubarb, Radish and Onions". Journal of Food Science. Vol 34: 365.
17. GEANKOPLIS, CH. 1993. "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias". Ed Continental S.A. México.

18. HENDERSON, S.M.; PERRY, R.L. 1966. "Agricultural Process Engineering", Second Edition. USA.
19. HONG, Y.C.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. 1986. "Finite Element Modeling of Moisture Transfer During Storage of Mixed Multicomponent Dried Foods". Journal of Food Science. Vol 51: 554.
20. HSU, K.H. 1983. "A Diffusion Model With a Concentration-Dependent Diffusion Coefficient for Describing Water Movement in Legumes During Soaking". Journal of Food Science. Vol 48: 618.
21. HURST, W.C.; SHEWFELT, R.L.; SCHULER, G.A. 1985. "Shelf-Life and Quality Changes in Summer Storage Onions (Allium cepa)". Journal of Food Science. Vol 50: 761.
22. INGELS, D.M. 1985. "Computer Modeling and Simulation". Marcel Decker Inc. USA.
23. INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA AGRICULTURA (IICA). 1987. "Investigación de Costos de Producción y Comercialización de Cebolla". Ministerio de Agricultura. Lima - Perú.

24. INTERMEDIANTE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP (ITDG). 1988. "Principio de Conservación de Alimentos por Secado". Conservación de Alimentos. Lima - Perú.
25. JONES, H.; MANN, L. 1963. "Onions and Their Allies". Interscience Publishers, Inc. USA.
26. KARATHANOS, V.T.; VILLALOBOS, G.; SARAVACOS. G.D. 1990. "Comparison of Two Methods of Estimation of the Effective Moisture Diffusivity from Drying Data". Journal of Food Science. Vol 55 : 218.
27. KUON, J. 1963. "Un acceso Químico a la Taxonomía: Examen de los Aminoácidos Libres de la Cebolla Común (Allium cepa L.)". Folleto de la Universidad San Pedro de Abad. Cuzco - Perú.
28. LEGÜES, P.; ALVAREZ, P.I. 1983. "Aplicación de un Modelo Semiteórico al Secado de Uva Sultanina". Contribuciones Científicas y Tecnológicas, N° 59. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Chile.
29. LIOU, J.K. 1982. "An Aproximate Method for Nonlinear Diffusion Applied to Enzyme Inactivation During Drying". Doctoral Thesis, Agricultural University Wageningen.

30. LOMAURO, G.L.; BAKSHI, A.S. 1985. "Finite Element Analysis of Moisture Diffusion in Stored Foods". *Journal of Food Science*. Vol 50: 392.
31. LOMAURO, G.L.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. 1985. "Moisture Transfer Properties of Dry and Semimoist Foods". *Journal of Food Science*. Vol 50: 397.
32. LUH, B.; WOODROOF, J.G. 1975. "Commercial Vegetable Processing". The Avi Publishing Company, Inc. USA.
33. MARCELO, O.J. 1982. "Preservación de Cebollas por Radiación Gamma". Tesis Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima - Perú.
34. MAROUSIS, S.N.; KARATHANOS, V.T.; SARAVACOS, G.D. 1989. "Effect of Sugars on the Water Diffusivity in Hydrated Granular Starches". *Journal of Food Science*. Vol 54: 1496.
35. MAZZA, G. 1984. "Sorpton Isotherms and Drying Rates of Jerusalem Artichoke (Helianthus tuberosus L.)". *Journal of Food Science*. Vol 49: 384.
36. MISHKIN, M.; KAREL, M.; SAGUY, I. 1982. "Applications of Optimization in Food Dehydration". *Food Technology*. July 1982: 101.

37. MISHKIN, M.; SAGUY, I.; KAREL, M. 1983. "Dynamic optimization of Dehydration Processes: Minimizing Browning in Dehydration of Potatoes". Journal of Food Science, Vol 48: 1617.
38. MORALES, E. 1993. "Simulación numérica de la Congelación de Alimentos de Forma Esférica, Utilizando el Criterio de la Depresión del Punto de Congelación de una Solución Binaria Ideal". Tesis de Ingeniero. UNALM. Lima - Perú.
39. MYERS, G. E., 1971. "Analytical Methods in Conduction Heat Transfer". Ed. Mc. Graw Gill. Estados Unidos de Norteamérica.
40. PERRY, R.H.; CHILTON, C. 1984. "Manual del Ingeniero Químico". Quinta Edición. USA.
41. PEZZUTTI, A.; CRAPISTE, G.H. 1992. "Simulación de la Cinética de Secado y el Deterioro Organoléptico de Ajo y Cebolla". Planta Piloto de Ingeniería Química (UNS - CONICET), 12 de Octubre de 1842 - 8000 - Bahía Blanca. Argentina.
42. RODRIGUEZ, C.; SAAVEDRA, A.; MOLINA, R. 1987. "Efectos de la Temperatura en la Deshidratación de Hortalizas". Alimentos. Vol. 12 : 7.

43. SAGUY, I.; KAREL, M. 1980. "Modeling of Quality Deterioration During Food Processing and Storage". Food Technology. February, 1980 :78.
44. SAKAI, N.; HAYAKAWA, K. 1993. "Heat and Moisture Transfer in Composite Food - Theoretical Analysis of Influence of Surface Conductance and Component Arrangement". Journal of Food Science. Vol 58: 1335.
45. SARAVACOS, G.D.; CHARM, S.E. 1962. "A study of the Mechanism of Fruit and Vegetable Dehydration". Food Technology. January 1962: 78.
46. SCHWIMMER, S.; WESTON, W.J. 1961. "Enzymatic Development of Pyruvic Acid in Onions as a Measure of Pungency". Agricultural and Food Chemistry. Vol 9: 301.
47. SCHWIMMER, S.; VENSTROM, D.W.; GUADAGNI, D.G. 1964. "Relation Between Pyruvate Content and Olor Strength of Reconstituted Onion Powder". Food Technology. 1964.
48. SHOUP, T. 1984. "Applied Numerical Methods for the Microcomputer". Ed. Lynn Frankel. New Jersey -USA.

49. SINGH, R.K.; LUND, D.B.; BUELOW, F.H. 1984. "Computer Simulation of Storage Stability in Intermediate Moisture Apples". *Journal of Food Science*. Vol 49: 759.
50. TOLEDO, J. 1985. "Nonstructural Carbohydrates Changes During Growth and Storage of Florida Onions (*Allium cepa* L.). University of Florida. PhD Degree.
51. TSUKADA, T.; SAKAI, N.; HAYAKAWA, K. 1991. "Computerized Model for Strain-Stress Analysis of Food Undergoing Simultaneous Heat and Mass Transfer". *Journal of Food Science*. Vol 56: 1438.
52. VAN ARSDEL, B.S.; COPLEY, M. 1969. "Food Dehydration". The Avi Publishing Company, Inc. USA.
53. ZHANG, T.; BAKSHI, A.S.; GUSTAFSON, R.J.; LUND, D.B. 1984. "Finite Element Analysis of Nonlinear Water Diffusion During Rice Soaking". *Journal of Food Science*. Vol 49: 246.

VIII. ANEXOS

**ANEXO 1: DETERMINACION ESPECTROFOTOMETRICA DE ACIDO
PIRUVICO EN CEBOLLAS.**

(METODO DE SCHWIMMER Y WESTON, 1961)

El método recomendado por Schwimmer y Weston (1961) que consiste en la comparación colorimétrica en un espectrofotómetro midiendo la absorbancia y elaborando una curva estándar empleando piruvato de sodio, se explica detalladamente a continuación:

- Para la preparación de la curva estándar, se toma 110 mg de piruvato de sodio completamente seco, se lleva a 1 lt con agua destilada previamente desionizada, luego se extrae una alícuota de 10 ml llevando a 100 ml en una fiola del mismo volumen con agua destilada. De la fiola de 100 ml se toman alícuotas de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 ml enrazando con agua destilada en fiolas de 100 ml.

- De cada una de las fiolas se toma 1 ml de solución estándar en un tubo de ensayo, se le agrega 1 ml de agua destilada, más 1 ml de 2,4 dinitrofenilhidrazina, se deja en baño María a 37°C por 10 minutos; se le agrega 5 ml de hidróxido de sodio 0.6 N para el proceso de coloración, inmediatamente se procede a la lectura de la absorbancia en un espectrofotómetro a 420 mμ de longitud de onda. Este procedimiento se efectúa con

cada uno de los tubos de ensayo identificando 8 puntos que se plotean.

- Para la determinación del ácido pirúvico se pesan 500 g de cebolla, se licúan por 5 minutos agregando previamente 100 ml de agua destilada. Del licuado se extrae 3 porciones de cebolla licuada de 5 g cada una, y se introduce en un tubo de prueba, se le agrega 5 ml de ácido tricloroacético al 30% y se deja reposar durante 1 hora adicionándole una pequeña porción de celite con la finalidad de acelerar la extracción del ácido pirúvico.
- Cada porción tratada se somete a un filtrado con un embudo Buchner, con papel filtro Whatman N°2 ayudado por una bomba de vacío; luego se lavaron con 200 ml de agua destilada con la finalidad de que todo el ácido pirúvico pase por el embudo y se reciba en un kitazato.
- Una vez obtenido el filtrado, se adiciona 1 g de carbón activado para disminuir el color de los pigmentos naturales de la cebolla, se lleva a un agitador magnético por 30 minutos, inmediatamente se centrifuga, quedando expedito para el proceso de coloración.
- A 1 ml de la muestra se le agrega 1 ml de agua destilada, más 1 ml de 2,4 dinitrofenilhidrazina al 0.0125% disuelto en ácido clorhídrico 2 N y se lleva

a un baño María por 10 minutos a 37°C. Transcurrido el tiempo se retira del baño María y se le agrega 5 ml de NaOH 0.6 N para que precipite el color y se lleva inmediatamente al espectrofotómetro procediendo a la lectura a 420 mμ tomando como blanco agua destilada y colocando en cero el tablero.

- Una vez obtenida la lectura, se realizan las transformaciones y se busca en el gráfico patrón, encontrándose el contenido de ácido pirúvico en ppm de ácido pirúvico por g de cebolla.

NOTAS:

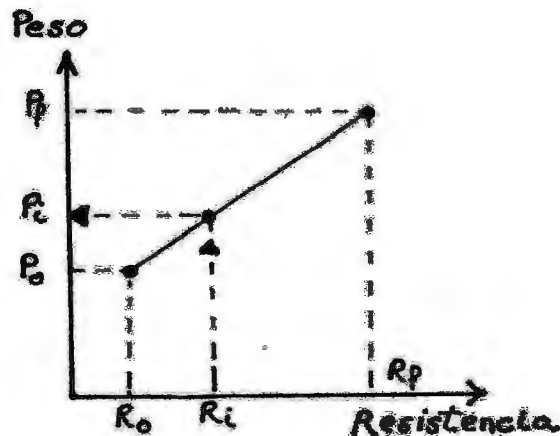
- Para cebollas deshidratadas y parcialmente deshidratadas se aplicó un micrométodo (Laboratorio de Análisis Químicos, Departamento de Química - UNALM).
- Durante el secado no se inactiva la enzima ni tampoco se descompone el precursor lacrimógeno, y la utilización de este método es completamente factible para productos deshidratados, siempre y cuando se valore la pérdida de pungencia bajo términos relativos, es decir como porcentajes (Schwimmer *et al.*, 1964)

ANEXO 2: PRINCIPIO DEL STRAIN GAUGE

El Strain Gauge (medidor de estiramiento) es un dispositivo conformado por 4 resistencias eléctricas apoyadas sobre flejes metálicos bastante maleables, construido a base de materiales especiales, el cual actúa como un "puente de wheatstone". Al pasar una cierta intensidad de corriente estable "I" a través de este dispositivo, el medidor de resistencia indicará un valor tal como "R". Pero cuando este dispositivo es estirado, siendo la intensidad de corriente estable "I", el valor de resistencia disminuye a un valor tal como "R'". Existe una ley física que indica que dentro de un rango de voltajes, éstos varían directamente con el estiramiento, y en ello se fundamenta el principio del Strain Gauge.

Antes de empezar el secado, se pesaron las muestras húmedas en una balanza y se obtuvo un peso " P_0 ", luego se introdujeron las muestras en el secador y el registrador arrojaba un valor de resistencia eléctrica " R_0 " expresado en ohms. Durante el proceso de secado, el registrador marcaba valores de resistencias eléctricas " R_1 ", los cuales iban disminuyendo a medida que transcurría el tiempo, hasta hacerse constante (culminación del proceso

de secado); estos valores finales de resistencia eléctrica " R_f " fueron anotados. Al terminar el proceso de secado se retiraron las muestras deshidratadas cuyo valor de resistencia eléctrica " R_f " permanecía constante y se pesaron, obteniéndose un peso " P_f ". Los diseñadores del secador han demostrado que por una simple regla de tres se puede estimar el peso en los puntos intermedios durante todo el proceso del secado, pues los valores de peso y resistencia eléctrica de dicho instrumento guardan una relación lineal (principio del "Strain Gauge").



Las balanzas eléctricas modernas de alta precisión operan bajo este principio.

ANEXO 1

MATRIZ DESARROLLADA DEL SISTEMA DE ECUACIONES LINEALES.

METODO DE DIFERENCIAS FINITAS - ESQUEMA IMPLICITO

	t										t	$t-dt$
$1+2D/W$	$-2D/W$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	M0	M0
$-D/W$	$1+2D/W$	$-D/W$	0	0	0	0	0	0	0	0	M1	M1
0	$-D/W$	$1+2D/W$	$-D/W$	0	0	0	0	0	0	0	M2	M2
0	0	$-D/W$	$1+2D/W$	$-D/W$	0	0	0	0	0	0	M3	M3
0	0	0	$-D/W$	$1+2D/W$	$-D/W$	0	0	0	0	0	M4	M4
0	0	0	0	$-D/W$	$1+2D/W$	$-D/W$	0	1	0	0	M5	M5
0	0	0	0	0	$-D/W$	$1+2D/W$	$-D/W$	0	0	0	M6	M6
0	0	0	0	0	0	$-D/W$	$1+2D/W$	$-D/W$	0	0	M7	M7
0	0	0	0	0	0	0	$-D/W$	$1+2D/W$	$-D/W$	0	M8	M8
0	0	0	0	0	0	0	0	$-D/W$	$1+2D/W$	$-D/W$	M9	M9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	M10	M0

$${}^t [B] \times {}^t [M] = {}^{t-dt} [M]$$

**ANEXO 4: VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION
AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA
BLANCA A 50°C Y 1 M/S**

TEMPERATURA = 50°C
VELOCIDAD DEL AIRE = 1 m/s
HUMEDAD RELATIVA = 20%

HUMEDAD INICIAL = 94.15 %bh; 16.09 bs
HUMEDAD FINAL = 12.09% bh ; 0.14 bs.
TIEMPO DE SECADO = 12h 00min.

TIEMPO (min)	RESISTENCIA (ohm)	PESO (g)	HUMEDAD (% bh)	HUMEDAD (bs.,dec.)	HUMEDAD ADIMENSIONAL
0	8.2220	166.8000	94.1500	16.0940	1.0000
10	8.2120	161.5220	93.9588	15.5531	0.9661
20	8.2000	155.1885	93.7123	14.9040	0.9255
30	8.1890	149.3827	93.4679	14.3091	0.8883
40	8.1780	143.5769	93.2038	13.7141	0.8510
50	8.1690	138.8268	92.9712	13.2273	0.8205
60	8.1540	130.9098	92.5462	12.4159	0.7697
70	8.1450	126.1597	92.2655	11.9291	0.7393
80	8.1350	120.8817	91.9278	11.3882	0.7054
90	8.1240	115.0759	91.5208	10.7932	0.6682
100	8.1160	110.8536	91.1976	10.3605	0.6411
110	8.1070	106.1034	90.8035	9.8737	0.6106
120	8.0990	101.8810	90.4224	9.4410	0.5835
130	8.0920	98.1864	90.0620	9.0624	0.5598
140	8.0850	94.4819	89.6734	8.6837	0.5361
150	8.0770	90.2695	89.1904	8.2510	0.5090
160	8.0700	86.5749	88.7291	7.8724	0.4853
170	8.0620	82.3525	88.1512	7.4397	0.4582
180	8.0550	78.6580	87.5946	7.0610	0.4345
190	8.0480	74.9634	86.9832	6.6824	0.4108
200	8.0410	71.2688	86.3085	6.3038	0.3871
210	8.0350	68.1020	85.6718	5.9792	0.3668
220	8.0290	64.9353	84.9730	5.6547	0.3465
230	8.0240	62.2963	84.3385	5.3843	0.3296
240	8.0180	59.1295	83.4976	5.0597	0.3092
250	8.0130	56.4905	82.7267	4.7893	0.2923
260	8.0090	54.3793	82.0560	4.5729	0.2788
270	8.0050	52.2681	81.3313	4.3565	0.2652
280	8.0030	51.2125	80.9465	4.2484	0.2584
290	8.0020	50.6847	80.7481	4.1943	0.2551
300	8.0000	49.6292	80.3386	4.0861	0.2483
310	7.9960	47.5180	79.4650	3.8697	0.2347
320	7.9930	45.9346	78.7572	3.7075	0.2246

330	7.9900	44.3512	77.9988	3.5452	0.2144
340	7.9870	42.7878	77.1842	3.3829	0.2043
350	7.9840	41.1844	76.3071	3.2207	0.1941
360	7.9810	39.6010	75.3597	3.0584	0.1839
370	7.9790	38.5454	74.6849	2.9502	0.1772
380	7.9750	36.4342	73.2180	2.7339	0.1636
390	7.9720	34.8508	72.0013	2.5716	0.1535
400	7.9700	33.7953	71.1267	2.4634	0.1467
410	7.9680	32.7397	70.1958	2.3552	0.1399
420	7.9650	31.1563	68.6811	2.1930	0.1298
430	7.9630	30.1007	67.5828	2.0848	0.1230
440	7.9600	28.5173	65.7829	1.9225	0.1128
450	7.9570	26.9339	63.7713	1.7602	0.1027
460	7.9550	25.8783	62.2935	1.6521	0.0959
470	7.9530	24.8227	60.6900	1.5439	0.0891
480	7.9510	23.7871	58.9441	1.4357	0.0824
490	7.9490	22.7115	57.0359	1.3275	0.0756
500	7.9470	21.6559	54.9417	1.2193	0.0688
510	7.9460	21.1281	53.8181	1.1653	0.0654
520	7.9440	20.0725	51.3873	1.0571	0.0587
530	7.9420	19.0169	48.6889	0.9489	0.0519
540	7.9410	18.4892	47.2242	0.8948	0.0485
550	7.9400	17.9614	45.6734	0.8407	0.0451
560	7.9380	16.9058	42.2812	0.7325	0.0383
570	7.9360	15.8502	38.4373	0.6244	0.0316
580	7.9350	15.3224	36.3167	0.5703	0.0282
590	7.9340	14.7946	34.0447	0.5162	0.0248
600	7.9330	14.2668	31.6047	0.4621	0.0214
610	7.9320	13.7390	28.9773	0.4080	0.0180
620	7.9310	13.2112	26.1399	0.3539	0.0146
630	7.9310	13.2112	26.1399	0.3539	0.0146
640	7.9300	12.6834	23.0663	0.2998	0.0113
650	7.9300	12.6834	23.0663	0.2998	0.0113
660	7.9290	12.1556	19.7258	0.2457	0.0079
670	7.9290	12.1556	19.7258	0.2457	0.0079
680	7.9280	11.6278	16.0821	0.1916	0.0045
690	7.9280	11.6278	16.0821	0.1916	0.0045
700	7.9280	11.6278	16.0821	0.1916	0.0045
710	7.9280	11.6278	16.0821	0.1916	0.0045
720	7.9270	11.1000	12.0919	0.1376	0.0011

**ANEXO 5: VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION
AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA
BLANCA A 50°C Y 2 M/S**

TEMPERATURA = 50°C
VELOCIDAD DEL AIRE = 2 m/s
HUMEDAD RELATIVA = 20%

HUMEDAD INICIAL = 92.94 %bh; 13.16 bs
HUMEDAD FINAL = 11.56% bh ; 0.13 bs.
TIEMPO DE SECADO = 11h 00min.

TIEMPO (min)	RESISTENCIA (ohm)	PESO (g)	HUMEDAD (%bh)	HUMEDAD (bs. dec.)	HUMEDAD ADIMENSIONAL
0	8.1350	166.6000	92.9400	13.1643	1.0000
10	8.1210	160.1160	92.6541	12.6130	0.9577
20	8.1070	153.6320	92.3441	12.0618	0.9155
30	8.0960	148.5375	92.0815	11.6286	0.8823
40	8.0780	140.2009	91.6106	10.9199	0.8279
50	8.0640	133.7169	91.2038	10.3686	0.7857
60	8.0540	129.0855	90.8882	9.9748	0.7555
70	8.0440	124.4541	90.5492	9.5811	0.7253
80	8.0320	118.8964	90.1074	9.1086	0.6891
90	8.0250	115.6544	89.8301	8.8329	0.6679
100	8.0140	110.5598	89.3615	8.3998	0.6347
110	8.0040	105.9284	88.8963	8.0060	0.6046
120	7.9930	100.8338	88.3353	7.5729	0.5714
130	7.9840	96.6656	87.8323	7.2185	0.5442
140	7.9730	91.5710	87.1554	6.7854	0.5110
150	7.9650	87.8659	86.6137	6.4703	0.4866
160	7.9550	83.2344	85.8689	6.0766	0.4566
170	7.9450	78.6030	85.0362	5.6828	0.4265
180	7.9390	75.8242	84.4878	5.4466	0.4063
190	7.9300	71.6559	83.5855	5.0922	0.3812
200	7.9240	68.8770	82.9232	4.8559	0.3631
210	7.9180	66.0982	82.2053	4.6197	0.3450
220	7.9100	62.3931	81.1486	4.3046	0.3208
230	7.9040	59.6142	80.2699	4.0684	0.3027
240	7.8970	56.3722	79.1352	3.7928	0.2816
250	7.8920	54.0565	78.2414	3.5959	0.2665
260	7.8860	51.2776	77.0622	3.3596	0.2484
270	7.8810	48.9619	75.9773	3.1627	0.2333
280	7.8750	46.1831	74.5319	2.9265	0.2151
290	7.8700	43.8674	73.1875	2.7296	0.2001
300	7.8660	42.0148	72.0052	2.5721	0.1880
310	7.8620	40.1622	70.7139	2.4146	0.1759
320	7.8580	38.3097	69.2977	2.2571	0.1638

330	7.8540	36.4571	67.7375	2.0996	0.1518
340	7.8510	35.0677	66.4593	1.9814	0.1427
350	7.8480	33.6782	65.0755	1.8633	0.1336
360	7.8440	31.8257	63.0425	1.7058	0.1216
370	7.8410	30.4363	61.3554	1.5877	0.1125
380	7.8380	29.0468	59.5069	1.4896	0.1035
390	7.8360	28.1205	58.1731	1.3908	0.0974
400	7.8340	27.1943	56.7484	1.3121	0.0914
410	7.8310	25.8048	54.4195	1.1939	0.0823
420	7.8290	24.8785	52.7225	1.1152	0.0763
430	7.8260	23.4891	49.9259	0.9970	0.0672
440	7.8230	22.0997	46.7777	0.8789	0.0582
450	7.8210	21.1734	44.4494	0.8002	0.0521
460	7.8190	20.2471	41.9080	0.7214	0.0461
470	7.8170	19.3208	39.1230	0.6427	0.0401
480	7.8150	18.3946	36.0574	0.5639	0.0340
490	7.8130	17.4683	32.6667	0.4852	0.0280
500	7.8120	17.0051	30.8329	0.4456	0.0250
510	7.8110	16.5420	28.8964	0.4064	0.0220
520	7.8100	16.0789	26.8483	0.3670	0.0189
530	7.8090	15.6157	24.6787	0.3276	0.0159
540	7.8080	15.1526	22.3765	0.2883	0.0129
550	7.8080	15.1526	22.3765	0.2883	0.0129
560	7.8070	14.6894	19.9291	0.2489	0.0099
570	7.8070	14.6894	19.9291	0.2489	0.0099
580	7.8060	14.2263	17.3223	0.2095	0.0069
590	7.8060	14.2263	17.3223	0.2095	0.0069
600	7.8060	14.2263	17.3223	0.2095	0.0069
610	7.8050	13.7631	14.5402	0.1701	0.0038
620	7.8050	13.7631	14.5402	0.1701	0.0038
630	7.8050	13.7631	14.5402	0.1701	0.0038
640	7.8050	13.7631	14.5402	0.1701	0.0038
650	7.8050	13.7631	14.5402	0.1701	0.0038
660	7.8040	13.3000	11.5642	0.1308	0.0008

**ANEXO 6: VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION
AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA
BLANCA A 60°C Y 1 M/S**

TEMPERATURA = 60°C
VELOCIDAD DEL AIRE = 1 m/s
HUMEDAD RELATIVA = 15%

HUMEDAD INICIAL = 94.06 %bh; 15.84 bs
HUMEDAD FINAL = 10.0 %bh ; 0.11 bs.
TIEMPO DE SECADO = 10h 20min.

TIEMPO (min.)	RESISTENCIA (ohm)	PESO (g.)	HUMEDAD (% bh)	HUMEDAD (bs..dec.)	HUMEDAD ADIMENSIONAL
0	8.0600	166.6000	94.0600	15.8350	1.0000
10	8.0340	154.5236	93.5956	14.6147	0.9224
20	8.0210	148.4854	93.3353	14.0045	0.8637
30	8.0070	141.9827	93.0301	13.3474	0.8419
40	7.9940	135.9445	92.7205	12.7373	0.8031
50	7.9800	129.4418	92.3548	12.0802	0.7614
60	7.9700	124.7970	92.0703	11.6108	0.7315
70	7.9570	118.7588	91.6671	11.0006	0.6928
80	7.9450	113.1851	91.2568	10.4374	0.6570
90	7.9350	108.5403	90.8826	9.9681	0.6271
100	7.9220	102.5021	90.3455	9.3579	0.5884
110	7.9100	96.9284	89.7904	8.7947	0.5528
120	7.8980	91.3548	89.1674	8.2314	0.5188
130	7.8900	87.6388	88.7082	7.8559	0.4929
140	7.8800	82.9940	88.0762	7.3866	0.4631
150	7.8720	79.2782	87.5173	7.0111	0.4392
160	7.8650	76.0289	86.9835	6.6826	0.4183
170	7.8540	70.9176	86.0457	6.1683	0.3855
180	7.8450	66.7373	85.1717	5.7438	0.3587
190	7.8380	63.4880	84.4122	5.4153	0.3378
200	7.8320	60.6991	83.6966	5.1337	0.3199
210	7.8250	57.4478	82.7738	4.8051	0.2990
220	7.8190	54.6609	81.8956	4.5235	0.2811
230	7.8120	51.4096	80.7506	4.1950	0.2602
240	7.8040	47.6937	79.2509	3.8195	0.2364
250	7.7980	44.9069	77.9832	3.5379	0.2185
260	7.7930	42.5845	76.7614	3.3032	0.2038
270	7.7870	39.7976	75.1341	3.0216	0.1857
280	7.7830	37.9397	73.9164	2.8338	0.1737
290	7.7790	36.0818	72.5733	2.6461	0.1616
300	7.7770	35.1528	71.8485	2.5522	0.1558
310	7.7740	33.7594	70.8866	2.4114	0.1469
320	7.7720	32.8304	69.8571	2.3175	0.1409

330	7.7680	30.9725	68.0490	2.1296	0.1290
340	7.7650	29.5791	66.5438	1.9890	0.1200
350	7.7630	28.6501	65.4590	1.8951	0.1144
360	7.7600	27.2567	63.6932	1.7543	0.1051
370	7.7590	26.7922	63.0638	1.7074	0.1022
380	7.7580	26.3278	62.4121	1.6604	0.0992
390	7.7560	25.3988	61.0374	1.5666	0.0932
400	7.7540	24.4699	59.5582	1.4727	0.0872
410	7.7520	23.5409	57.9623	1.3788	0.0813
420	7.7500	22.6119	56.2353	1.2849	0.0753
430	7.7480	21.6830	54.3603	1.1911	0.0693
440	7.7470	21.2185	53.3613	1.1441	0.0664
450	7.7450	20.2896	51.2259	1.0503	0.0604
460	7.7430	19.3606	48.8857	0.9564	0.0544
470	7.7400	17.9672	44.9215	0.8156	0.0455
480	7.7380	17.0382	41.9185	0.7217	0.0395
490	7.7370	16.5737	40.2908	0.6748	0.0365
500	7.7350	15.6448	36.7454	0.5809	0.0306
510	7.7330	14.7158	32.7524	0.4870	0.0246
520	7.7320	14.2513	30.5607	0.4401	0.0216
530	7.7310	13.7869	28.2212	0.3932	0.0186
540	7.7300	13.3224	25.7187	0.3462	0.0156
550	7.7290	12.8579	23.0354	0.2993	0.0127
560	7.7290	12.8579	23.0354	0.2993	0.0127
570	7.7280	12.3934	20.1509	0.2524	0.0097
580	7.7270	11.9290	17.0419	0.2054	0.0067
590	7.7260	11.4645	13.6806	0.1585	0.0037
600	7.7260	11.4645	13.6806	0.1585	0.0037
610	7.7260	11.4645	13.6806	0.1585	0.0037
620	7.7250	11.0000	10.0360	0.1116	0.0007

**ANEXO 7: VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION
AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA
BLANCA A 60°C Y 2 M/S**

TEMPERATURA = 60°C
VELOCIDAD DEL AIRE = 2 m/s
HUMEDAD RELATIVA = 15%

HUMEDAD INICIAL = 91.98% bh; 11.47 bs
HUMEDAD FINAL = 9.84% bh ; 0.11 bs.
TIEMPO DE SECADO = 10h 00min

TIEMPO (min.)	RESISTENCIA (ohm)	PESO (g.)	HUMEDAD (% bh)	HUMEDAD (bs.,dec.)	HUMEDAD ADIMENSIONAL
0	8.3910	148.4000	91.9800	11.4688	1.0000
10	8.3800	142.6357	91.6559	10.9845	0.9574
20	8.3690	133.7271	91.1000	10.2360	0.8916
30	8.3480	125.8667	90.5442	9.5755	0.8335
40	8.3340	118.5302	89.9589	8.9591	0.7792
50	8.3230	112.7659	89.4457	8.4748	0.7366
60	8.3150	108.5736	89.0381	8.1225	0.7057
70	8.3040	102.8093	88.4235	7.6382	0.6831
80	8.2950	98.0930	87.8669	7.2419	0.6282
90	8.2850	92.8527	87.1822	6.8016	0.5895
100	8.2760	88.1364	86.4963	6.4054	0.5546
110	8.2680	83.9442	85.8219	6.0531	0.5236
120	8.2610	80.2760	85.1740	5.7449	0.4965
130	8.2500	74.5118	84.0271	5.2606	0.4539
140	8.2440	71.3674	83.3234	4.9964	0.4307
150	8.2370	67.6992	82.4198	4.6882	0.4036
160	8.2290	63.5070	81.2593	4.3360	0.3726
170	8.2220	59.8388	80.1104	4.0278	0.3455
180	8.2160	56.6946	79.0074	3.7636	0.3222
190	8.2070	51.9783	77.1026	3.3673	0.2874
200	8.2000	48.3101	75.3640	3.0591	0.2603
210	8.1930	44.6419	73.3398	2.7509	0.2332
220	8.1880	42.0217	71.6773	2.5307	0.2138
230	8.1840	39.9256	70.1903	2.3548	0.1983
240	8.1810	38.3535	68.9685	2.2225	0.1867
250	8.1790	37.3054	68.0967	2.1345	0.1790
260	8.1760	35.7333	66.6931	2.0024	0.1673
270	8.1740	34.6853	65.6866	1.9143	0.1596
280	8.1710	33.1132	64.0576	1.7822	0.1480
290	8.1670	31.0171	61.8286	1.6061	0.1325
300	8.1650	29.9690	60.2867	1.5180	0.1247
310	8.1610	27.8729	57.3001	1.3419	0.1092
320	8.1590	26.8248	55.8318	1.2539	0.1015

330	8.1590	26.8248	55.8318	1.2539	0.1015
340	8.1570	25.7767	53.8278	1.1658	0.0937
350	8.1550	24.7287	51.8709	1.0777	0.0860
360	8.1530	23.6806	49.7408	0.9897	0.0783
370	8.1510	22.6326	47.4135	0.9016	0.0705
380	8.1490	21.5845	44.8601	0.8136	0.0628
390	8.1480	21.0605	43.4880	0.7695	0.0589
400	8.1470	20.5364	42.0460	0.7255	0.0550
410	8.1450	19.4884	38.9293	0.6374	0.0473
420	8.1440	18.9643	37.2418	0.5934	0.0434
430	8.1430	18.4403	35.4584	0.5494	0.0395
440	8.1410	17.3922	31.5691	0.4613	0.0318
450	8.1400	16.8682	29.4432	0.4173	0.0279
460	8.1390	16.3442	27.1810	0.3733	0.0240
470	8.1380	15.8202	24.7689	0.3292	0.0202
480	8.1370	15.2961	22.1915	0.2852	0.0163
490	8.1370	15.2961	22.1915	0.2852	0.0163
500	8.1360	14.7721	19.4313	0.2412	0.0124
510	8.1360	14.7721	19.4313	0.2412	0.0124
520	8.1350	14.2481	16.4681	0.1971	0.0085
530	8.1350	14.2481	16.4681	0.1971	0.0085
540	8.1350	14.2481	16.4681	0.1971	0.0085
550	8.1340	13.7240	13.2785	0.1531	0.0047
560	8.1340	13.7240	13.2785	0.1531	0.0047
570	8.1340	13.7240	13.2785	0.1531	0.0047
580	8.1340	13.7240	13.2785	0.1531	0.0047
590	8.1340	13.7240	13.2785	0.1531	0.0047
600	8.1330	13.2000	9.8358	0.1091	0.0008

**ANEXO 8: VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION
AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA
BLANCA A 70°C Y 1 M/S**

TEMPERATURA = 70°C
VELOCIDAD DEL AIRE = 1 m/s
HUMEDAD RELATIVA = 10%

HUMEDAD INICIAL = 92.72% bh; 12.74 bs
HUMEDAD FINAL = 9.38% bh ; 0.10 bs.
TIEMPO DE SECADO = 6h 00min.

TIEMPO (min.)	RESISTENCIA (ohm)	PESO (g.)	HUMEDAD (% bh)	HUMEDAD (bs.,dec.)	HUMEDAD ADIMENSIONAL
0	8.4870	166.8000	92.7200	12.7363	1.0000
10	8.4710	159.7266	92.3976	12.1538	0.9540
20	8.4480	149.5591	91.8808	11.3164	0.8879
30	8.4250	139.3914	91.2885	10.4791	0.8218
40	8.4030	129.6657	90.6351	9.6782	0.7586
50	8.3800	119.4980	89.8383	8.8409	0.6925
60	8.3600	110.6565	89.0264	8.1127	0.6350
70	8.3410	102.2571	88.1250	7.4210	0.5804
80	8.3220	93.8576	87.0623	6.7293	0.5258
90	8.3050	86.3424	85.9362	6.1104	0.4769
100	8.2880	78.8271	84.5953	5.4915	0.4280
110	8.2720	71.7539	83.0768	4.9091	0.3820
120	8.2580	65.5648	81.4793	4.3994	0.3418
130	8.2460	60.2599	79.8489	3.9625	0.3073
140	8.2330	54.5130	77.7245	3.4892	0.2699
150	8.2210	49.2081	75.3231	3.0524	0.2355
160	8.2100	44.3452	72.6170	2.6519	0.2038
170	8.2020	40.8086	70.2440	2.3607	0.1808
180	8.1930	36.8300	67.0295	2.0330	0.1550
190	8.1850	33.2934	63.5272	1.7418	0.1320
200	8.1780	30.6409	60.3699	1.5233	0.1147
210	8.1720	27.5464	55.9179	1.2685	0.0948
220	8.1650	24.4519	50.3390	1.0137	0.0745
230	8.1600	22.2415	45.4037	0.8316	0.0601
240	8.1570	20.9153	41.9418	0.7224	0.0515
250	8.1540	19.5890	38.0111	0.6132	0.0429
260	8.1510	18.2628	33.5095	0.5040	0.0343
270	8.1480	16.9366	28.3030	0.3948	0.0256
280	8.1460	16.0524	24.3540	0.3219	0.0199
290	8.1450	15.6104	22.2117	0.2855	0.0170
300	8.1430	14.7282	17.5414	0.2127	0.0113
310	8.1410	13.8421	12.2744	0.1399	0.0055
320	8.1400	13.4000	9.3803	0.1035	0.0026
330	8.1400	13.4000	9.3803	0.1035	0.0026
340	8.1400	13.4000	9.3803	0.1035	0.0026
350	8.1400	13.4000	9.3803	0.1035	0.0026
360	8.1400	13.4000	9.3803	0.1035	0.0026

**ANEXO 9: VARIACION DE LA HUMEDAD EN FUNCION
AL TIEMPO DURANTE EL SECADO DE CEBOLLA
BLANCA A 70°C Y 2 M/S**

TEMPERATURA = 70°C
VELOCIDAD DEL AIRE = 2 m/s
HUMEDAD RELATIVA = 10%

HUMEDAD INICIAL = 93.1% bh; 13.49 bs
HUMEDAD FINAL = 8.21% bh ; 0.09 bs.
TIEMPO DE SECADO = 6h 00min.

TIEMPO (min.)	RESISTENCIA (ohm)	PESO (g.)	HUMEDAD (% bh)	HUMEDAD (dec., bs)	HUMEDAD ADIMENSIONAL
0	8.4600	145.0000	93.1000	13.4928	1.0000
10	8.4450	137.5500	92.7283	12.7481	0.9445
20	8.4230	126.6233	92.0986	11.6560	0.8631
30	8.4000	115.2000	91.3151	10.5142	0.7779
40	8.3790	104.7700	90.4505	9.4718	0.7002
50	8.3640	97.3200	89.7195	8.7271	0.6447
60	8.3460	88.3800	88.6796	7.8336	0.5781
70	8.3320	81.4287	87.7129	7.1388	0.5263
80	8.3170	73.9767	86.4755	6.3940	0.4707
90	8.3040	67.5200	85.1822	5.7486	0.4226
100	8.2920	61.5600	83.7476	5.1529	0.3782
110	8.2800	55.6000	82.0054	4.5572	0.3338
120	8.2690	50.1367	80.0445	4.0112	0.2931
130	8.2580	44.6733	77.6041	3.4651	0.2524
140	8.2500	40.7000	75.4177	3.0680	0.2228
150	8.2420	36.7267	72.7582	2.6708	0.1932
160	8.2340	32.7533	69.4535	2.2737	0.1636
170	8.2270	29.2767	65.8260	1.9262	0.1376
180	8.2230	27.2900	63.3382	1.7276	0.1228
190	8.2190	25.3033	60.4598	1.5291	0.1080
200	8.2150	23.3167	57.0908	1.3305	0.0932
210	8.2110	21.3300	53.0942	1.1319	0.0784
220	8.2080	19.8400	49.5716	0.9630	0.0673
230	8.2050	18.3500	45.4768	0.8341	0.0562
240	8.2020	16.8600	40.6584	0.6852	0.0451
250	8.1990	15.3700	34.9057	0.5362	0.0340
260	8.1970	14.3767	30.4081	0.4369	0.0266
270	8.1950	13.3833	25.2428	0.3377	0.0192
280	8.1930	12.3900	19.2494	0.2384	0.0118
290	8.1920	11.8933	15.8772	0.1887	0.0081
300	8.1920	11.8933	15.8772	0.1887	0.0081
310	8.1910	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
320	8.191	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
330	8.191	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
340	8.191	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
350	8.191	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
360	8.19	10.9000	8.2110	0.0895	0.0007

**ANEXO 10: LISTADO DEL PROGRAMA DE COMPUTO DEL METODO
DE ALVAREZ Y LEGÜES MODIFICADO**

CLS

REM * AUTOR DEL PROGRAMA DE COMPUTO : FERNANDO VARGAS DELGADO *
 REM * 1995 *
 REM 12 ESPACIOS PARA EL TITULO

REM ***** T E S T *****

100 LPRINT : LPRINT
 102 LPRINT TAB(5); " METODO DE ALVAREZ Y LEGUES MODIFICADO"
 104 LPRINT TAB(5); " ESTE PROGRAMA SIMULA LA VARIACION DE LA HUMEDAD"
 106 LPRINT TAB(5); " A TRAVES DEL TIEMPO EN UNA PLANCHA INFINITA "
 108 LPRINT TAB(5); " Y ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA "
 110 LPRINT
 112 LPRINT TAB(5); " AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995) *"
 114 LPRINT : LPRINT

REM *****

REM ***** DIMENSIONAMIENTO *****

120 DIM MINUTO(75), SEGUNDO(75), NEXP(75), ADIMEN.EXP(75), FUNCION(75)
 122 DIM DLINEAL(75), TLINEAL(75), ADIMEN.PRED(75), X(75)
 124 DIM DIF.EFECT(75), ERRPONEO(75), ERNSONEO(75), MPRED(75)

REM *****

REM ***** DATOS DE ENTRADA *****

130 INPUT "ESPESOR DE LA PLANCHA (m) " E
 132 INPUT "INCREMENTO DE TIEMPO (s) " DT
 134 INPUT "HUMEDAD INICIAL (g. agua/g. ms) " HO
 136 INPUT "HUMEDAD DE EQUILIBRIO (g. agua/g. ms) " HE
 138 INPUT "TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) " TT
 140 INPUT "VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) " VV
 142 INPUT "HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%) " HR

REM *****

145 INICIO = TITER

REM ***** CONDICIONES O PARAMETROS ESTABLECIDOS *****

150 X = .0000001 * VALOR INICIAL ASUMIDO DE "INTEGRAL(De dl)"
 152 T = .0000001 * TOLERANCIA PARA EL CALCULO DE X
 154 E = .007 * ESPESOR DE LA PLANCHA INFINITA (METROS).
 156 DT = 600 * VARIACION DE TIEMPO (SEGUNDOS).

REM *****

160 GOSUB 730 'SUBROUTINA DE DATOS EXPERIMENTALES

REM ***** CALCULO DE ADINEN-EXP(K) *****

230 FOR K = 0 TO A
 232 MINUTO(K) = 10 * K * TIEMPO EN MINUTOS
 234 SEGUNDO(K) = MINUTO(K) * 60 * TIEMPO EN SEGUNDOS
 236 ADINEN.EXP(K) = (MEXP(K) - ME) / (MO - ME) * HUM. ADIN. C/10 MINUTOS
 238 NEXT K

REM *****

REM ***** PROCESO ITERATIVO PARA EL CALCULO DE X *****

240 K = 1
 242 DEF FNF (X) = .8105694698 * EXP(-9.8696044018 * X / E ^ 2) +
 .0900652748 * EXP(-88.8264396099999999 * X / E ^ 2) +
 .0324227788 * EXP(-246.740118 * X / E ^ 2) +
 .01654 * EXP(-483.61061578 * X / E ^ 2) +
 .01001 * EXP(-799.43795658 * X / E ^ 2) - ADINEN.EXP(K)
 244 DEF FNG (X) = -(8 * EXP(-9.8696044018 * X / E ^ 2)) / E ^ 2 -
 (8 * EXP(-88.8264396099999999 * X / E ^ 2)) / E ^ 2 -
 (8 * EXP(-246.740118 * X / E ^ 2)) / E ^ 2 -
 (8 * EXP(-483.61061578 * X / E ^ 2)) / E ^ 2 -
 (8 * EXP(-799.43795658 * X / E ^ 2)) / E ^ 2
 246 Y1 = FNF(X1)
 248 dY1 = FNG(X1)
 250 X2 = X1 - Y1 / dY1
 252 Y2 = FNF(X2)
 254 IF ABS(Y2) < T THEN 260
 256 X1 = X2
 258 GOTO 242
 260 X(K) = X2
 262 K = K + 1
 264 IF K > A GOTO 270
 266 GOTO 242

REM *****

REM ***** ELIMINACION DE NEGATIVOS *****

270 FOR K = 0 TO A
 272 IF X(K) > 0 THEN GOTO 276
 274 X(K) = X(K + 1)
 276 NEXT K

REM *****

REM ***** REGRESION POTENCIAL PARA EL CALCULO DE De = f(t) *****

300 FOR K = 1 TO A
 302 DLINEAL(K) = LOG(X(K)) / LOG(10)
 304 TLINEAL(K) = LOG(SEGUNDO(K)) / LOG(10)


```

306 SUMTLINEAL = SUMTLINEAL + TLINEAL(K)
308 SUNDLINEAL = SUNDLINEAL + DLINEAL(K)
310 SUMTLINEAL2 = SUMTLINEAL2 + (TLINEAL(K)) ^ 2
312 SUNDLINEAL2 = SUNDLINEAL2 + (DLINEAL(K)) ^ 2
314 SUMPROD = SUMPROD + DLINEAL(K) * TLINEAL(K)
318 NEXT K

```

```

330 Q = (A * SUMPROD - SUMTLINEAL * SUNDLINEAL) /
      (A * SUMTLINEAL2 - SUMTLINEAL ^ 2)
332 R = (A * SUMPROD - SUMTLINEAL * SUNDLINEAL) /
      SQRT((A * SUMTLINEAL2 - SUMTLINEAL ^ 2) * (A * SUNDLINEAL2 -
      SUNDLINEAL ^ 2))
334 P = 10 ^ ((SUNDLINEAL / A) - Q * (SUMTLINEAL / A))

340 FOR K = 0 TO A
342 FUNCION(K) = P * SEGUNDO(K) ^ Q
344 DIF.EFECT(K) = P * Q * SEGUNDO(K) ^ (Q - 1)
346 NEXT K

```

REM *****

REM ***** SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA *****

```

350 LPRINT : LPRINT
352 LPRINT "*****"
354 LPRINT " * SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA * "
356 LPRINT "*****"
358 LPRINT : LPRINT : LPRINT
360 LPRINT "LOS DATOS DE ENTRADA SON :"; LPRINT : LPRINT
362 LPRINT "ESPESOR DE LA PLANCHA (m)      " : E
364 LPRINT "INCREMENTO DE TIEMPO (s)          " : DT
366 LPRINT "HUMEDAD INICIAL (dec. bs)          " : MO
368 LPRINT "HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec. bs)     " : ME
370 LPRINT "TEMPERATURA DEL BULBO SECO (c)      " : TT
372 LPRINT "VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)           " : VV
374 LPRINT "HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%)       " : HR
376 LPRINT : LPRINT : LPRINT

380 LPRINT "
382 LPRINT " TIEMPO DE      DIFUSIVIDAD      HUMEDAD      HUMEDAD
384 LPRINT " SECADO      EFECTIVA      EXPERIMENTAL  PREDECIDA
386 LPRINT " (MIN)      (m^2/s)      (g agua/g ms) (g agua/g ms)"
388 LPRINT "-----"
390 FOR K = 0 TO A
392 TERMINO1 = .8105694698 * EXP(-9.8696044018 * FUNCION(K) / E ^ 2)
394 TERMINO2 = .0900632748 * EXP(-88.8264396099999998 * FUNCION(K) / E ^ 2)
396 TERMINO3 = .0324227788 * EXP(-246.740118 * FUNCION(K) / E ^ 2)
398 TERMINO4 = .01654 * EXP(-483.61061578 * FUNCION(K) / E ^ 2)
400 TERMINO5 = .01001 * EXP(-799.43795658 * FUNCION(K) / E ^ 2)
402 ADIMEN.PRED(K) = TERMINO1 + TERMINO2 + TERMINO3 + TERMINO4 + TERMINO5
403 MPRED(K) = (MO - ME) * ADIMEN.PRED(K) + ME
404 IF K > 0 THEN GOTO 408
406 ADIMEN.EXP(K) = 1; ADIMEN.PRED(K) = 1
408 LPRINT TAB(3); MINUTO(K); TAB(12); DIF.EFECT(K); TAB(31); NEXP(K);
      TAB(46); MPRED(K)
410 NEXT K
412 LPRINT "

```

REM *****

REM ***** VALIDACION *****


```

422 ERRPONEO(K) = ABS((NEXP(K) - NPRED(K)) / NEXP(K))
424 ERMSONEO(K) = ((NEXP(K) - NPRED(K)) / (NO - NEXP(K))) ** 2
426 ERROR1 = ERROR1 + ERRPONEO(K)
428 ERROR2 = ERROR2 + ERMSONEO(K)
430 K = K + 1
432 IF K > A GOTO 436
434 GOTO 422
436 PP = 100 * ERROR1 / A
438 RMS = 100 * (ERROR2 / A) **.5
440 LPRINT " PARAMETRO P :"; TAB(36); PP
442 LPRINT " PARAMETRO RMS :"; TAB(36); RMS
444 LPRINT : LPRINT
446 LPRINT " MODELO DIFUSIVO:"
447 LPRINT "     DIF.EF. ="; P * Q; "x TIEMPO"; Q - 1
448 LPRINT : LPRINT
450 LPRINT " donde DIF.EF.      en  m2/s"
452 LPRINT "     TIEMPO           en  s"
454 LPRINT

```

```

REM *****

```

```

460 FINAL = TNER

```

```

480 LPRINT "TIEMPO DE EJECUCION : "; FINAL - INICIO; " SEGUNDOS"

```

```

500 END

```

```

730 REM *****
732 REM * SUBROUTINA DE VALORES EXPERIMENTALES DE LOS TRATAMIENTOS *
734 REM *****

```

```

740 IF TT = 50 AND VV = 1 THEN GOSUB 770: RETURN
742 IF TT = 50 AND VV = 2 THEN GOSUB 800: RETURN
744 IF TT = 60 AND VV = 1 THEN GOSUB 830: RETURN
746 IF TT = 60 AND VV = 2 THEN GOSUB 860: RETURN
748 IF TT = 70 AND VV = 1 THEN GOSUB 890: RETURN
750 IF TT = 70 AND VV = 2 THEN GOSUB 910: RETURN

```

```

760 LPRINT : LPRINT : LPRINT : LPRINT "NO EXISTE DICHA OPCION, POR FAVOR VUELVA A INTENTAR": LPRINT : LPRINT : LPRINT
762 GOTO 138

```

```

770 REM ***** SUBROUTINA DE T = 50 C. V = 1 m/s *****

```

```

772 A = 72
774 NEXP(0) = 16.094; NEXP(1) = 15.5531; NEXP(2) = 14.904;
NEXP(3) = 14.3091; NEXP(4) = 13.7141; NEXP(5) = 13.2273
776 NEXP(6) = 12.4159; NEXP(7) = 11.9291; NEXP(8) = 11.3882
NEXP(9) = 10.7932; NEXP(10) = 10.3605; NEXP(11) = 9.8737
778 NEXP(12) = 9.441; NEXP(13) = 9.0624; NEXP(14) = 8.6832
NEXP(15) = 8.251; NEXP(16) = 7.8724; NEXP(17) = 7.4397
780 NEXP(18) = 7.061; NEXP(19) = 6.6824; NEXP(20) = 6.3038
NEXP(21) = 5.9792; NEXP(22) = 5.6347; NEXP(23) = 5.3843
782 NEXP(24) = 5.0597; NEXP(25) = 4.7898; NEXP(26) = 4.5729
NEXP(27) = 4.3565; NEXP(28) = 4.2484; NEXP(29) = 4.1943
784 NEXP(30) = 4.0861; NEXP(31) = 3.8697; NEXP(32) = 3.7075
NEXP(33) = 3.5452; NEXP(34) = 3.3829; NEXP(35) = 3.2207
786 NEXP(36) = 3.0584; NEXP(37) = 2.9502; NEXP(38) = 2.7339
NEXP(39) = 2.6712; NEXP(40) = 2.5272; NEXP(41) = 2.4222; NEXP(42) = 2.3222

```

788 MEXP(42) = 2.193; MEXP(43) = 2.0848; MEXP(44) = 1.9225
 MEXP(45) = 1.7602; MEXP(46) = 1.6521; MEXP(47) = 1.5439
 790 MEXP(48) = 1.4357; MEXP(49) = 1.3275; MEXP(50) = 1.2193
 MEXP(51) = 1.1653; MEXP(52) = 1.0571; MEXP(53) = .9489
 792 MEXP(54) = .8948; MEXP(55) = .8407; MEXP(56) = .7325
 MEXP(57) = .6244; MEXP(58) = .5703; MEXP(59) = .5162
 794 MEXP(60) = .4621; MEXP(61) = .408; MEXP(62) = .3539
 MEXP(63) = .3339; MEXP(64) = .2998; MEXP(65) = .2998
 796 MEXP(66) = .2457; MEXP(67) = .2457; MEXP(68) = .1916
 MEXP(69) = .1916; MEXP(70) = .1916; MEXP(71) = .1916
 MEXP(72) = .1376
 798 RETURN

800 REM ***** SUBROUTINA DE T = 50 C, V = 2 m/s *****
 802 A = 66
 804 MEXP(0) = 13.1643; MEXP(1) = 12.613; MEXP(2) = 12.0618
 MEXP(3) = 11.6286; MEXP(4) = 10.9199; MEXP(5) = 10.3686
 806 MEXP(6) = 9.9748; MEXP(7) = 9.5811; MEXP(8) = 9.1086
 MEXP(9) = 8.8329; MEXP(10) = 8.3998; MEXP(11) = 8.006
 808 MEXP(12) = 7.5729; MEXP(13) = 7.2185; MEXP(14) = 6.7854
 MEXP(15) = 6.4703; MEXP(16) = 6.0766; MEXP(17) = 5.6828
 810 MEXP(18) = 5.4466; MEXP(19) = 5.0922; MEXP(20) = 4.8559
 MEXP(21) = 4.6197; MEXP(22) = 4.3046; MEXP(23) = 4.0684
 812 MEXP(24) = 3.7928; MEXP(25) = 3.5959; MEXP(26) = 3.3596
 MEXP(27) = 3.1627; MEXP(28) = 2.9265; MEXP(29) = 2.7296
 814 MEXP(30) = 2.5721; MEXP(31) = 2.4146; MEXP(32) = 2.2571
 MEXP(33) = 2.0996; MEXP(34) = 1.9814; MEXP(35) = 1.8633
 816 MEXP(36) = 1.7058; MEXP(37) = 1.5877; MEXP(38) = 1.4696
 MEXP(39) = 1.3908; MEXP(40) = 1.3121; MEXP(41) = 1.1939
 818 MEXP(42) = 1.1152; MEXP(43) = .997; MEXP(44) = .8789
 MEXP(45) = .8002; MEXP(46) = .7214; MEXP(47) = .6427
 820 MEXP(48) = .5639; MEXP(49) = .4852; MEXP(50) = .4458
 MEXP(51) = .4064; MEXP(52) = .367; MEXP(53) = .3276
 822 MEXP(54) = .2883; MEXP(55) = .2883; MEXP(56) = .2489
 MEXP(57) = .2489; MEXP(58) = .2095; MEXP(59) = .2095
 824 MEXP(60) = .2095; MEXP(61) = .1701; MEXP(62) = .1701
 MEXP(63) = .1701; MEXP(64) = .1701; MEXP(65) = .1701
 MEXP(66) = .1308
 826 RETURN

830 REM ***** SUBROUTINA DE T = 60 C, V = 1 m/s *****
 832 A = 62
 834 MEXP(0) = 15.835; MEXP(1) = 14.6147; MEXP(2) = 14.0045
 MEXP(3) = 13.3474; MEXP(4) = 12.7373; MEXP(5) = 12.0802
 836 MEXP(6) = 11.6108; MEXP(7) = 11.0006; MEXP(8) = 10.4374
 MEXP(9) = 9.9681; MEXP(10) = 9.3579; MEXP(11) = 8.7947
 838 MEXP(12) = 8.2314; MEXP(13) = 7.8559; MEXP(14) = 7.3866
 MEXP(15) = 7.0111; MEXP(16) = 6.6826; MEXP(17) = 6.1663
 840 MEXP(18) = 5.7438; MEXP(19) = 5.4153; MEXP(20) = 5.1337
 MEXP(21) = 4.8051; MEXP(22) = 4.5235; MEXP(23) = 4.195
 842 MEXP(24) = 3.8195; MEXP(25) = 3.5379; MEXP(26) = 3.3032
 MEXP(27) = 3.0216; MEXP(28) = 2.8338; MEXP(29) = 2.6461
 844 MEXP(30) = 2.5522; MEXP(31) = 2.4114; MEXP(32) = 2.3175
 MEXP(33) = 2.1298; MEXP(34) = 1.989; MEXP(35) = 1.8951
 846 MEXP(36) = 1.7943; MEXP(37) = 1.7074; MEXP(38) = 1.6604
 MEXP(39) = 1.5666; MEXP(40) = 1.4727; MEXP(41) = 1.3788
 848 MEXP(42) = 1.2849; MEXP(43) = 1.1911; MEXP(44) = 1.1441
 MEXP(45) = 1.0503; MEXP(46) = .9564; MEXP(47) = .8156
 850 MEXP(48) = .7217; MEXP(49) = .6748; MEXP(50) = .5809
 MEXP(51) = .487; MEXP(52) = .4401; MEXP(53) = .3932
 852 MEXP(54) = .3462; MEXP(55) = .2993; MEXP(56) = .2993
 MEXP(57) = .2524; MEXP(58) = .2054; MEXP(59) = .1585
 854 MEXP(60) = .1585; MEXP(61) = .1585; MEXP(62) = .1116
 856 RETURN

860 REM ***** SUBROUTINA DE T = 60 C, V = 2 m/s *****

862 A = 60
 864 NEXP(0) = 11.4688; NEXP(1) = 10.9845; NEXP(2) = 10.235
 NEXP(3) = 9.5755; NEXP(4) = 8.9591; NEXP(5) = 8.4748
 866 NEXP(6) = 8.1225; NEXP(7) = 7.6382; NEXP(8) = 7.2419
 NEXP(9) = 6.8016; NEXP(10) = 6.4054; NEXP(11) = 6.0531
 868 NEXP(12) = 5.7449; NEXP(13) = 5.2606; NEXP(14) = 4.9964
 NEXP(15) = 4.6882; NEXP(16) = 4.336; NEXP(17) = 4.0278
 870 NEXP(18) = 3.7636; NEXP(19) = 3.3673; NEXP(20) = 3.0591
 NEXP(21) = 2.7509; NEXP(22) = 2.5307; NEXP(23) = 2.3546
 872 NEXP(24) = 2.2225; NEXP(25) = 2.1345; NEXP(26) = 2.0024
 NEXP(27) = 1.9343; NEXP(28) = 1.7822; NEXP(29) = 1.6061
 874 NEXP(30) = 1.518; NEXP(31) = 1.3419; NEXP(32) = 1.2539
 NEXP(33) = 1.2539; NEXP(34) = 1.1658; NEXP(35) = 1.0777
 876 NEXP(36) = .9897; NEXP(37) = .9016; NEXP(38) = .8136
 NEXP(39) = .7695; NEXP(40) = .7255; NEXP(41) = .6374
 878 NEXP(42) = .5934; NEXP(43) = .5494; NEXP(44) = .4613
 NEXP(45) = .4173; NEXP(46) = .3733; NEXP(47) = .3292
 880 NEXP(48) = .2852; NEXP(49) = .2852; NEXP(50) = .2412
 NEXP(51) = .2412; NEXP(52) = .1971; NEXP(53) = .1971
 882 NEXP(54) = .1971; NEXP(55) = .1531; NEXP(56) = .1531
 NEXP(57) = .1531; NEXP(58) = .1531; NEXP(59) = .1531; NEXP(60) = .1091
 884 RETURN

890 REN ***** SUBROUTINA DE F = 70 C, V = 1 m/s *****
 892 A = 36
 894 NEXP(0) = 12.7363; NEXP(1) = 12.1538; NEXP(2) = 11.3164
 NEXP(3) = 10.4791; NEXP(4) = 9.6782; NEXP(5) = 8.8409
 896 NEXP(6) = 8.1127; NEXP(7) = 7.421; NEXP(8) = 6.7293
 NEXP(9) = 6.1104; NEXP(10) = 5.4915; NEXP(11) = 4.9091
 898 NEXP(12) = 4.3994; NEXP(13) = 3.9625; NEXP(14) = 3.4892
 NEXP(15) = 3.0524; NEXP(16) = 2.6519; NEXP(17) = 2.3607
 900 NEXP(18) = 2.033; NEXP(19) = 1.7418; NEXP(20) = 1.5233
 NEXP(21) = 1.2685; NEXP(22) = 1.0137; NEXP(23) = .8316
 902 NEXP(24) = .7224; NEXP(25) = .6132; NEXP(26) = .504
 NEXP(27) = .3948; NEXP(28) = .3219; NEXP(29) = .2855
 904 NEXP(30) = .2127; NEXP(31) = .1399; NEXP(32) = .1035
 NEXP(33) = .1035; NEXP(34) = .1035; NEXP(35) = .1035; NEXP(36) = .1035
 906 RETURN

910 REN ***** SUBROUTINA DE F = 70 C, V = 2 m/s *****
 912 A = 36
 914 NEXP(0) = 13.4928; NEXP(1) = 12.7481; NEXP(2) = 11.656
 NEXP(3) = 10.5142; NEXP(4) = 9.4718; NEXP(5) = 8.7271
 916 NEXP(6) = 7.8336; NEXP(7) = 7.1386; NEXP(8) = 6.394
 NEXP(9) = 5.7486; NEXP(10) = 5.1529; NEXP(11) = 4.5572
 918 NEXP(12) = 4.0112; NEXP(13) = 3.4651; NEXP(14) = 3.068
 NEXP(15) = 2.4708; NEXP(16) = 2.2737; NEXP(17) = 1.9262
 920 NEXP(18) = 1.7276; NEXP(19) = 1.5291; NEXP(20) = 1.3305
 NEXP(21) = 1.1319; NEXP(22) = .983; NEXP(23) = .8341
 922 NEXP(24) = .6852; NEXP(25) = .5362; NEXP(26) = .4369
 NEXP(27) = .3377; NEXP(28) = .2384; NEXP(29) = .1887
 924 NEXP(30) = .1887; NEXP(31) = .1391; NEXP(32) = .1391
 NEXP(33) = .1391; NEXP(34) = .1391; NEXP(35) = .1391
 NEXP(36) = .0895
 926 RETURN

**ANEXO 11: LISTADO DEL PROGRAMA DE COMPUTO DEL METODO
DE DIFERENCIAS FINITAS**

CLS

REM " AUTOR DEL PROGRAMA DE COMPUTO = FERNANDO VARGAS DELGADO"
REM " 1995 "

REM ***** T E S T S *****

100 LPRINT : LPRINT
102 LPRINT TAB(5); " METODO DE DIFERENCIAS FINITAS = ESQUEMA IMPLICITO"
104 LPRINT TAB(5); " ESTE PROGRAMA ESTIMA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA"
106 LPRINT TAB(5); " Y SIMULA LA VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD"
108 LPRINT TAB(5); " A TRAVES DEL TIEMPO DE SECADO "
110 LPRINT
112 LPRINT TAB(5); " AUTOR : FERNANDO VARGAS DELGADO (1995)"
114 LPRINT : LPRINT

REM *****

REM ***** DIMENSIONAMIENTO *****

120 DIM HEXP(75) * HUMEDAD EXPERIMENTAL (bs)
122 DIM HPRED(75, 20) * HUMEDAD PREDECIDA (bs)
124 DIM ADIMEN.EXP(75) * HUMEDAD ADIMENSIONAL EXPERIMENTAL
126 DIM ADIMEN.PRED(75, 20) * HUMEDAD ADIMENSIONAL PREDECIDA
128 DIM MINUTO(80) * TIEMPO EN MINUTOS
130 DIM SEGUNDO(75) * TIEMPO EN SEGUNDOS
132 DIM F(75, 20) * VARIANCIA (bs)
134 DIM D(75, 20) * DIFUSIVIDAD EFECTIVA (m²/s)
136 DIM N(20, 20) * HUMEDAD NODAL EN EL TIEMPO (t)
138 DIM NN(20, 20) * HUMEDAD NODAL EN EL TIEMPO (t-dt)
140 DIM Y(20, 20) * HUMEDAD NODAL PRE-CALCULADA
142 DIM FSOLO(75)
144 DIM DSOLO(75)
146 DIM ERAPONEO(75) * PARAMETRO ESTADISTICO "P"
148 DIM ERNSONEO(75) * PARAMETRO ESTADISTICO "RMS"

REM *****

REM ***** UNA RECOMENDACION *****

150 PRINT "AVISO IMPORTANTE: SE RECOMIENDA TENER ALGUNA IDEA ACERCA DEL VALOR"
152 PRINT "DE LOS VALORES DE DIFUSIVIDAD EFECTIVA. SI NO SE CONTARA CON ESTA "
154 PRINT "INFORMACION, SE PUEDEN REALIZAR PRUEBAS."
156 PRINT : PRINT

REM *****

REM ***** DATOS DE ENTRADA *****

```

160 INPUT "ESPESOR DE LA PLANCHA (m) " E
161 INPUT "INCREMENTO DE TIEMPO (s) " DT
162 INPUT "HUMEDAD INICIAL (g. agua/g. ms) " MO
163 INPUT "HUMEDAD DE EQUILIBRIO (g. agua/g. ms) " ME
164 PRINT "DIFUSIVIDAD MASICA MINIMA (m^2/s). (Se "
165 INPUT "recomienda 1e-10 para cebolla blanca) " DMIN
166 PRINT "DIFUSIVIDAD MASICA MAXIMA (m^2/s). (Se "
167 INPUT "recomienda 2e-09 para cebolla blanca) " DMAX
168 INPUT "TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C) " TT
169 INPUT "VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) " VV
170 INPUT "HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%)" , HR

```

REM *****

175 INICIO = TIMER

REM ***** CONDICIONES O PARAMETROS ESTABLECIDOS *****

```

180 N = 10      ' N ES EL NUMERO DE PARTES EN QUE SE DIVIDE LA PLANCHA
182 E = .007    ' E ES EL ESPESOR DE LA PLANCHA INFINITA (METROS)
184 DT = 600    ' DT ES LA VARIACION DE TIEMPO (SEGUNDOS).
186 Z = 1E-10  ' Z ES EL INCREMENTO EN LAS ASUMCIONES DE DIFUSIVIDAD

```

REM *****

188 GOSUB 730 'SUBROUTINA DE VALORES EXPERIMENTALES

REM ***** CALCULO DE ADIMEN.EXP(K) *****

```

190 FOR K = 0 TO A
192 MINUTO(K) = 10 * K      ' TIEMPO EN MINUTOS
194 SEGUNDO(K) = MINUTO(K) * 60      ' TIEMPO EN SEGUNDOS
196 ADIMEN.EXP(K) = (MEXP(K) - ME) / (MO - ME) * HUM. ADIM. C/10 MINUTOS
198 NEXT K

```

REM *****

REM ***** PACIENCIA *****

```

200 PRINT : PRINT : PRINT
202 PRINT "          ESPERE UN MOMENTO POR FAVOR"
204 PRINT "          EL PROGRAMA ESTA ITERANDO"
206 PRINT : PRINT : PRINT

```

REM *****

REM ***** DESARROLLO DEL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS *****

REM CONDICION INICIAL

```

210 ND = ((DMAX - DMIN) / Z) + 1      'ND ES EL NUMERO DE D ASUMIDOS
212 FOR L = 1 TO ND
214 FOR I = 0 TO N
216 N(I, L) = MO

```

```

210 NEXT I
220 NEXT L
222 K = 0
224 L = 1
226 D = DMIN
228 MS2 = 0
230 MS4 = 0
232 W = (E ^ 2) / (4 * DT * N ^ 2)

```

REM METODO DE SOBRE-RELAJACION

```

240 VI = 1.4
242 FOR I = 0 TO N
244 NN(I, L) = N(I, L)
246 NEXT I
248 FOR I = 0 TO N
250 Y(I, L) = N(I, L)
252 NEXT I
254 NBAR = (NN(0, L) + (2 * D / N) * N(I, L)) / ((2 * D / N) * I)
256 N(0, L) = N(0, L) + VI * (NBAR - N(0, L))
258 FOR I = 1 TO N - 1
260 NBAR = (NN(I, L) + (D / N) * N(I - 1, L) + (D / N) * N(I + 1, L)) / ((2 * D / N) + 1)
262 N(I, L) = N(I, L) + VI * (NBAR - N(I, L))
264 NEXT I

```

REM CONDICIONES DE FRONTERA

```

270 IF T = 0 THEN N(N, L) = NO ELSE N(N, L) = NE

```

REM APLICACION DE LA TOLERANCIA

```

280 FOR I = 0 TO N
282 IF ABS(Y(I, L) - N(I, L)) > .01 THEN GOTO 248
284 NEXT I

```

REM *****

REM ***** REGLA DE SIMPSON *****

```

290 FOR I = 2 TO N - 2 STEP 2
292 MS2 = MS2 + 2 * N(I, L)
294 NEXT I
296 FOR I = 1 TO N - 1 STEP 2
298 MS4 = MS4 + 4 * N(I, L)
300 NEXT I
302 NPRED(K, L) = (N(0, L) + N(N, L) + MS2 + MS4) / (3 * W)
304 ADINER.PRED(K, L) = (NPRED(K, L) - NE) / (NO - NE)

```

REM *****

REM *** CALCULO DE LA VARIANCIA F ENTRE VALOR EXPERIMENTAL Y PREDECIDO ***

```

310 D(K, L) = 0
312 F(K, L) = ABS(NEXP(K) - NPRED(K, L))

```

REM *****

REM ***** RE-CALCULOS CON VALOR DE DIFUSIVIDAD ASUMIDA $D = D + \Delta$ *****

320 $D = D + \Delta$
 322 $L = L + 1$
 324 IF $D \leq D_{MAX}$ GOTO 228

REM *****

REM ***** ELECCION DEL VALOR OPTIMO DE "D" EN FUNCION AL F MINIMO *****

330 FOR L = 2 TO ND
 332 IF $F(K, L) < F(K, 1)$ THEN GOTO 336
 334 NEXT L: GOTO 350
 336 $LL = L$
 338 $F(K, 1) = F(K, LL)$
 340 $D(K, 1) = D(K, LL)$
 342 $NPRED(K, 1) = NPRED(K, LL)$
 344 GOTO 334

REM *****

350 PRINT "K= "; K; " D(m^2/s)= "; $D(K, 1)$; " NEXP= "; NEXP(K); " NPRED= "; NPRED(K, 1)

REM ***** RE-CALCULO CON VALOR DE TIEMPO $K = K + 1$ *****

360 $K = K + 1$
 362 $T = T + DT$
 364 IF $K > A$ GOTO 370
 366 IF $NPRED(K - 1, 1) \geq ME$ THEN GOTO 224

REM *****

REM ***** SELECCION DE LOS VALORES OPTIMOS DE "D" VERSUS "T" *****

370 FOR K = 0 TO A
 372 $FSOLO(K) = F(K, 1)$
 374 IF $FSOLO(K) = 0$ THEN GOTO 378
 376 $DSOLO(K) = D(K, 1)$
 378 NEXT K

REM *****

380 GOSUB 70100 * SUBROUTINA DE APROXIMACION POLINOMIAL DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA*

REM ***** AJUSTE CON DIFUSIVIDAD VARIABLE *****

REM CONDICION INICIAL

390 $N = 10$
 400 FOR I = 0 TO N
 402 $N(I, 1) = 0$

```

404 NEXT I
406 T = 0
408 K = 0
410 D(K, 1) = C(1) + C(2) * SEGUNDO(K) + C(3) * SEGUNDO(K) ^ 2 *
C(4) * SEGUNDO(K) ^ 3 + C(5) * SEGUNDO(K) ^ 4
412 IF D(K, 1) < 0 THEN D(K, 1) = 0
414 NS2 = 0
416 NS4 = 0
418 W = (E ^ 2) / (4 * DT * N ^ 2)

```

REM METODO DE SOBRE-RELAJACION

```

420 V2 = 1.4
422 FOR I = 0 TO N
424 MH(I, 1) = H(I, 1)
426 NEXT I
428 FOR I = 0 TO N
430 Y(I, 1) = H(I, 1)
432 NEXT I
434 MBAR = (MH(0, 1) + ((2 * D(K, 1) / W) * H(1, 1)) / ((2 * D(K, 1) / W) + 1)
436 M(0, 1) = H(0, 1) + V2 * (MBAR - H(0, 1))
438 FOR I = 1 TO N - 1
440 MBAR = (MH(I, 1) + (D(K, 1) / W) * H(I - 1, 1) + (D(K, 1) / W) *
H(I + 1, 1)) / ((2 * D(K, 1) / W) + 1)
442 M(I, 1) = H(I, 1) + V2 * (MBAR - H(I, 1))
444 NEXT I

```

REM CONDICIONES DE FRONTERA

```

450 IF I = 0 THEN H(N, 1) = ME ELSE H(N, 1) = ME

```

REM APLICACION DE LA TOLERANCIA

```

460 FOR I = 0 TO N
462 IF ABS(Y(I, 1) - M(I, 1)) > .01 THEN GOTO 428
464 NEXT I

```

REM REGLA DE SIMPSON

```

470 FOR I = 2 TO N = 2 STEP 2
472 NS2 = NS2 + 2 * H(I, 1)
474 NEXT I
476 FOR I = 1 TO N = 1 STEP 2
478 NS4 = NS4 + 4 * H(I, 1)
480 NEXT I
482 MPRED(K, 1) = (H(0, 1) + H(N, 1) + NS2 + NS4) / (3 * N)

```

REM RE-CALCULO CON EL VALOR DE TIEMPO K = K+1

```

490 K = K + 1
492 T = T + DT
494 IF K > A GOTO 500
496 IF K = 0 GOTO 410
498 IF MPRED(K - 1, 1) > ME THEN GOTO 410
500 PRINT

```

REM *****


```

600 LPRINT "*****"
602 LPRINT " * SIMULACION DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA * "
604 LPRINT "*****"
606 LPRINT : LPRINT : LPRINT : LPRINT
608 LPRINT "LOS DATOS DE ENTRADA SON : "
610 LPRINT "NUMERO DE PARTES           N"
612 LPRINT "ESPESOR DE LA PLANCHA (m)      E"
614 LPRINT "INCREMENTO DE TIEMPO (s)        DT"
616 LPRINT "HUMEDAD INICIAL (dec, bs)        MO"
618 LPRINT "HUMEDAD DE EQUILIBRIO (dec, bs)  ME"
620 LPRINT "DMIN (m^2/s)                    DMIN"
622 LPRINT "DMAX (m^2/s)                    DMAX"
624 LPRINT "TEMPERATURA DEL BULBO SECO (°C)  TT"
626 LPRINT "VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)         VV"
628 LPRINT "HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%)    HR"

```

```

630 LPRINT : LPRINT : LPRINT
632 LPRINT "*****"
634 LPRINT "TIEMPO DE DIFUSIVIDAD    HUMEDAD    HUMEDAD"
635 LPRINT "SECADO    EFECTIVA    EXPERIMENTAL    PREDECIDA"
636 LPRINT " (min)    (m^2/s)    (g-agua/g.ms)    (g-agua/g.ms)"
638 LPRINT "*****"
640 FOR K = 1 TO 10
642 LPRINT TAB(3); K * 10; TAB(11); D(K, 1); TAB(30); NEXP(K); TAB(46); NPRED(K, 1)
644 NEXT K
646 LPRINT "*****"

```

REM *****

REM ***** VALIDACION *****

```

650 K = 1
652 ERRPONEO(K) = ABS((NEXP(K) - NPRED(K, 1)) / NEXP(K))
654 ERMSONEO(K) = ((NEXP(K) - NPRED(K, 1)) / (MO - NEXP(K))) ^ 2
656 ERROR1 = ERROR1 + ERRPONEO(K)
658 ERROR2 = ERROR2 + ERMSONEO(K)
660 K = K + 1
662 IF K > A GOTO 670
664 GOTO 652

```

```

670 P = 100 * ERROR1 / A
672 RMS = 100 * (ERROR2 / A) ^ .5
674 LPRINT " PARAMETRO P :"; TAB(36); P
676 LPRINT " PARAMETRO RMS :"; TAB(36); RMS
678 LPRINT " EL NUMERO DE PUNTOS ES :"; TAB(36); A + 1
680 LPRINT : LPRINT " LOS VALORES C(i) SON: "
682 LPRINT " C(0) :"; TAB(36); C(1)
684 LPRINT " C(1) :"; TAB(36); C(2)
686 LPRINT " C(2) :"; TAB(36); C(3)
688 LPRINT " C(3) :"; TAB(36); C(4)
690 LPRINT " C(4) :"; TAB(36); C(5)
692 LPRINT : LPRINT

```

REM *****

```

700 FINAL = TIMER

```

```

710 LPRINT "TIEMPO DE EJECUCION : "; FINAL - INICIO; " SEGUNDOS"

```

720 END

```

730 REM *****
732 REM * SUBROUTINA DE VALORES EXPERIMENTALES DE LOS TRATAMIENTOS *
734 REM *****

```

```

740 IF TT = 50 AND VV = 1 THEN GOSUB 770: RETURN
742 IF TT = 50 AND VV = 2 THEN GOSUB 800: RETURN
744 IF TT = 60 AND VV = 1 THEN GOSUB 830: RETURN
746 IF TT = 60 AND VV = 2 THEN GOSUB 860: RETURN
748 IF TT = 70 AND VV = 1 THEN GOSUB 890: RETURN
750 IF TT = 70 AND VV = 2 THEN GOSUB 910: RETURN

```

```

760 PRINT "NO EXISTE DICHA OPCION, POR FAVOR VUELVA A INTENTAR"; PRINT
762 GOTO 160

```

```

770 REM ***** SUBROUTINA DE T = 50 C, V = 1 m/s *****
772 A = 72
774 MEXP(0) = 16.094: MEXP(1) = 15.5531: MEXP(2) = 14.904:
MEXP(3) = 14.3091: MEXP(4) = 13.7141: MEXP(5) = 13.2273
776 MEXP(6) = 12.4159: MEXP(7) = 11.9291: MEXP(8) = 11.3882
MEXP(9) = 10.7932: MEXP(10) = 10.3605: MEXP(11) = 9.8737
778 MEXP(12) = 9.441: MEXP(13) = 9.0624: MEXP(14) = 8.6837
MEXP(15) = 8.251: MEXP(16) = 7.8724: MEXP(17) = 7.4397
780 MEXP(18) = 7.061: MEXP(19) = 6.6824: MEXP(20) = 6.3038
MEXP(21) = 5.9792: MEXP(22) = 5.6547: MEXP(23) = 5.3843
782 MEXP(24) = 5.0597: MEXP(25) = 4.7893: MEXP(26) = 4.5729
MEXP(27) = 4.3585: MEXP(28) = 4.2484: MEXP(29) = 4.1943
784 MEXP(30) = 4.0861: MEXP(31) = 3.8697: MEXP(32) = 3.7075
MEXP(33) = 3.5452: MEXP(34) = 3.3829: MEXP(35) = 3.2207
786 MEXP(36) = 3.0584: MEXP(37) = 2.9502: MEXP(38) = 2.7339
MEXP(39) = 2.5716: MEXP(40) = 2.4634: MEXP(41) = 2.3552
788 MEXP(42) = 2.193: MEXP(43) = 2.0848: MEXP(44) = 1.9225
MEXP(45) = 1.7602: MEXP(46) = 1.6521: MEXP(47) = 1.5439
790 MEXP(48) = 1.4357: MEXP(49) = 1.3275: MEXP(50) = 1.2193
MEXP(51) = 1.1653: MEXP(52) = 1.0571: MEXP(53) = .9489
792 MEXP(54) = .8948: MEXP(55) = .8407: MEXP(56) = .7325
MEXP(57) = .6244: MEXP(58) = .5703: MEXP(59) = .5162
794 MEXP(60) = .4621: MEXP(61) = .408: MEXP(62) = .3539
MEXP(63) = .3339: MEXP(64) = .2998: MEXP(65) = .2998
796 MEXP(66) = .2457: MEXP(67) = .2457: MEXP(68) = .1916
MEXP(69) = .1916: MEXP(70) = .1916: MEXP(71) = .1916
MEXP(72) = .1376
798 RETURN

```

```

800 REM ***** SUBROUTINA DE T = 50 C, V = 2 m/s *****
802 A = 66
804 MEXP(0) = 13.1643: MEXP(1) = 12.613: MEXP(2) = 12.0618
MEXP(3) = 11.6286: MEXP(4) = 10.9199: MEXP(5) = 10.3686
806 MEXP(6) = 9.9748: MEXP(7) = 9.5811: MEXP(8) = 9.1086
MEXP(9) = 8.8329: MEXP(10) = 8.3998: MEXP(11) = 8.006
808 MEXP(12) = 7.5729: MEXP(13) = 7.2385: MEXP(14) = 6.7854
MEXP(15) = 6.4703: MEXP(16) = 6.0766: MEXP(17) = 5.6828
810 MEXP(18) = 5.4466: MEXP(19) = 5.0922: MEXP(20) = 4.8559
MEXP(21) = 4.6197: MEXP(22) = 4.3046: MEXP(23) = 4.0684
812 MEXP(24) = 3.7928: MEXP(25) = 3.5959: MEXP(26) = 3.3596
MEXP(27) = 3.1627: MEXP(28) = 2.9265: MEXP(29) = 2.7296
814 MEXP(30) = 2.5721: MEXP(31) = 2.4146: MEXP(32) = 2.2571

```

```

816 MEXP(33) = 2.0996: MEXP(34) = 1.9814: MEXP(35) = 1.8633
MEXP(36) = 1.7058: MEXP(37) = 1.5877: MEXP(38) = 1.4696
MEXP(39) = 1.3908: MEXP(40) = 1.3121: MEXP(41) = 1.1939
818 MEXP(42) = 1.1152: MEXP(43) = .997: MEXP(44) = .8789
MEXP(45) = .8002: MEXP(46) = .7214: MEXP(47) = .6427
820 MEXP(48) = .5639: MEXP(49) = .4852: MEXP(50) = .4458
MEXP(51) = .4064: MEXP(52) = .367: MEXP(53) = .3276
822 MEXP(54) = .2883: MEXP(55) = .2883: MEXP(56) = .2489
MEXP(57) = .2489: MEXP(58) = .2095: MEXP(59) = .2095
824 MEXP(60) = .2095: MEXP(61) = .1701: MEXP(62) = .1701
MEXP(63) = .1701: MEXP(64) = .1701: MEXP(65) = .1701
MEXP(66) = .1308
826 RETURN

830 REM ***** SUBROUTINA DE T = 60 C, V = 1 m/s *****
832 A = 62
834 MEXP(0) = 15.835: MEXP(1) = 14.6147: MEXP(2) = 14.0045
MEXP(3) = 13.3474: MEXP(4) = 12.7373: MEXP(5) = 12.0802
836 MEXP(6) = 11.6108: MEXP(7) = 11.0006: MEXP(8) = 10.4374
MEXP(9) = 9.9681: MEXP(10) = 9.3579: MEXP(11) = 8.7947
838 MEXP(12) = 8.2314: MEXP(13) = 7.8559: MEXP(14) = 7.3866
MEXP(15) = 7.0111: MEXP(16) = 6.6826: MEXP(17) = 6.1663
840 MEXP(18) = 5.7438: MEXP(19) = 5.4153: MEXP(20) = 5.1337
MEXP(21) = 4.8051: MEXP(22) = 4.5235: MEXP(23) = 4.195
842 MEXP(24) = 3.8195: MEXP(25) = 3.5379: MEXP(26) = 3.3032
MEXP(27) = 3.0216: MEXP(28) = 2.8338: MEXP(29) = 2.6461
844 MEXP(30) = 2.5522: MEXP(31) = 2.4114: MEXP(32) = 2.3175
MEXP(33) = 2.1298: MEXP(34) = 1.989: MEXP(35) = 1.8951
846 MEXP(36) = 1.7543: MEXP(37) = 1.7074: MEXP(38) = 1.6604
MEXP(39) = 1.5666: MEXP(40) = 1.4727: MEXP(41) = 1.3788
848 MEXP(42) = 1.2849: MEXP(43) = 1.1911: MEXP(44) = 1.1441
MEXP(45) = 1.0503: MEXP(46) = .9564: MEXP(47) = .8156
850 MEXP(48) = .7217: MEXP(49) = .6748: MEXP(50) = .5809
MEXP(51) = .487: MEXP(52) = .4401: MEXP(53) = .3932
852 MEXP(54) = .3462: MEXP(55) = .2993: MEXP(56) = .2993
MEXP(57) = .2524: MEXP(58) = .2054: MEXP(59) = .1585
854 MEXP(60) = .1585: MEXP(61) = .1585: MEXP(62) = .1116
856 RETURN

860 REM ***** SUBROUTINA DE T = 60 C, V = 2 m/s *****
862 A = 60
864 MEXP(0) = 11.4688: MEXP(1) = 10.9845: MEXP(2) = 10.235
MEXP(3) = 9.5755: MEXP(4) = 8.9591: MEXP(5) = 8.4748
866 MEXP(6) = 8.1225: MEXP(7) = 7.6382: MEXP(8) = 7.2419
MEXP(9) = 6.8016: MEXP(10) = 6.4054: MEXP(11) = 6.0531
868 MEXP(12) = 5.7449: MEXP(13) = 5.2606: MEXP(14) = 4.9964
MEXP(15) = 4.6882: MEXP(16) = 4.336: MEXP(17) = 4.0278
870 MEXP(18) = 3.7636: MEXP(19) = 3.3673: MEXP(20) = 3.0591
MEXP(21) = 2.7509: MEXP(22) = 2.5307: MEXP(23) = 2.3546
872 MEXP(24) = 2.2225: MEXP(25) = 2.1345: MEXP(26) = 2.0024
MEXP(27) = 1.9143: MEXP(28) = 1.7822: MEXP(29) = 1.6061
874 MEXP(30) = 1.518: MEXP(31) = 1.3419: MEXP(32) = 1.2539
MEXP(33) = 1.2539: MEXP(34) = 1.1658: MEXP(35) = 1.0777
876 MEXP(36) = .9897: MEXP(37) = .9016: MEXP(38) = .8136
MEXP(39) = .7695: MEXP(40) = .7255: MEXP(41) = .6374
878 MEXP(42) = .5934: MEXP(43) = .5494: MEXP(44) = .4613
MEXP(45) = .4173: MEXP(46) = .3733: MEXP(47) = .3292
880 MEXP(48) = .2852: MEXP(49) = .2852: MEXP(50) = .2412
MEXP(51) = .2412: MEXP(52) = .1971: MEXP(53) = .1971
882 MEXP(54) = .1971: MEXP(55) = .1531: MEXP(56) = .1531
MEXP(57) = .1531: MEXP(58) = .1531: MEXP(59) = .1531: MEXP(60) = .1091
884 RETURN

890 REM ***** SUBROUTINA DE T = 70 C, V = 1 m/s *****
892 A = 36
894 MEXP(0) = 12.7363: MEXP(1) = 12.1538: MEXP(2) = 11.3164

```

```

      MEXP(3) = 10.4791: MEXP(4) = 9.6782: MEXP(5) = 8.8409
896  MEXP(6) = 8.1127: MEXP(7) = 7.421: MEXP(8) = 6.7293
      MEXP(9) = 6.1104: MEXP(10) = 5.4915: MEXP(11) = 4.9091
898  MEXP(12) = 4.3994: MEXP(13) = 3.9625: MEXP(14) = 3.4892
      MEXP(15) = 3.0524: MEXP(16) = 2.6519: MEXP(17) = 2.3607
900  MEXP(18) = 2.033: MEXP(19) = 1.7418: MEXP(20) = 1.5233
      MEXP(21) = 1.2685: MEXP(22) = 1.0137: MEXP(23) = .8316
902  MEXP(24) = .7224: MEXP(25) = .6132: MEXP(26) = .504
      MEXP(27) = .3948: MEXP(28) = .3219: MEXP(29) = .2855
904  MEXP(30) = .2127: MEXP(31) = .1399: MEXP(32) = .1035
      MEXP(33) = .1035: MEXP(34) = .1035: MEXP(35) = .1035: MEXP(36) = .1035
906  RETURN

```

```

910  REM ***** SUBROUTINA DE T = 70 C, V = 2 m/s *****
912  A = 36
914  MEXP(0) = 13.4928: MEXP(1) = 12.7481: MEXP(2) = 11.656
      MEXP(3) = 10.5142: MEXP(4) = 9.4718: MEXP(5) = 8.7271
916  MEXP(6) = 7.8336: MEXP(7) = 7.1386: MEXP(8) = 6.394
      MEXP(9) = 5.7486: MEXP(10) = 5.1529: MEXP(11) = 4.5572
918  MEXP(12) = 4.0112: MEXP(13) = 3.4651: MEXP(14) = 3.068
      MEXP(15) = 2.6708: MEXP(16) = 2.2737: MEXP(17) = 1.9262
920  MEXP(18) = 1.7276: MEXP(19) = 1.5291: MEXP(20) = 1.3305
      MEXP(21) = 1.1319: MEXP(22) = .983: MEXP(23) = .8341
922  MEXP(24) = .6852: MEXP(25) = .5362: MEXP(26) = .4369
      MEXP(27) = .3377: MEXP(28) = .2384: MEXP(29) = .1887
924  MEXP(30) = .1887: MEXP(31) = .1391: MEXP(32) = .1391
      MEXP(33) = .1391: MEXP(34) = .1391: MEXP(35) = .1391
      MEXP(36) = .0895
926  RETURN

```

```

701000 REM *****
701010 REM * ESTE PROGRAMA ENCUENTRA UNA APROXIMACION POLINOMIAL A UN GRUPO *
701020 REM * DE VALORES DATOS POR EL METODO DE LOS MINIMOS CUADRADOS. *
701030 REM *****

```

```

701100 REM * CONFIGURAR LA TABLA *

```

```

701120 N = A: KK = 5
701140 DIM AAA(6, 7)
701150 PRINT " LOS VALORES DE ENTRADA INICIALES:"
701160 PRINT "-----"
701170 PRINT "          Tiempo          Difusividad efectiva"
701180 PRINT "          (min)          (x10^-10 m^2/s)"
701190 PRINT "-----"

```

```

701200 FOR K = 1 TO A
701220 PRINT K; TAB(11); SEGUNDO(K); TAB(38); DSOLO(K)
701230 NEXT K
PRINT "K = "; K
701290 PRINT "-----"
701300 'PRINT " ESTE PROGRAMA ES VALIDO SOLO PARA "; TIEMPO(1); "< Tiempo < "; TIEMPO(A)

```

```

701310 REM * ENCONTRAR LOS COEFICIENTES *
GOSUB 703530
701360 REM * ESCRIBIR LA RESPUESTA *

```

```

      PRINT : PRINT : PRINT
701380 PRINT "PARA UN POLINOMIO DE ORDEN "; KK - 1;
701400 PRINT " LOS COEFICIENTES SON:"
701410 PRINT "-----"

```

```

701420 FOR K = 1 TO KK
701430 PRINT "C("; K; ")="; C(K)

```

701440 NEXT K

701450 PRINT "-----"

701460 RETURN

701470 END

703530 REM * CARGAR EL ARREGLO AAA *

703540 FOR LLL = 1 TO KK

703550 FOR MMM = 1 TO KK

703560 S1 = 0!: S2 = 0!

703570 FOR K = 1 TO A

703580 S1 = S1 + SEGUNDO(K) ^ (LLL - 1) * SEGUNDO(K) ^ (MMM - 1)

703590 S2 = S2 + SEGUNDO(K) ^ (LLL - 1) * DSOLD(K)

703600 NEXT K

703610 AAA(LLL, MMM) = S1

703620 AAA(LLL, KK + 1) = S2

703630 NEXT MMM

703640 NEXT LLL

703660 REM * RESOLVER EL SISTEMA DE ECUACIONES POR EL METODO DE CHOLESKY *

703700 NROW = KK: NCOL = KK + 1

703710 GOSUB 704000

703730 RETURN

704000 REM *****

704010 REM * ESTA SUBROUTINA APLICA EL METODO DE CHOLESKY PARA RESOLVER *

704020 REM * AAA(NROW,NCOL), USANDO PIVOTED PARCIAL. *

704030 REM *****

704130 REM * UTILIZAR EL ELEMENTO DE PIVOT MAS GRANDE *

704160 FOR KKK = 1 TO NROW

704190 REM * ENCONTRAR EL PIVOT MAS GRANDE *

704210 PIVOT = AAA(KKK, KKK): IL = KKK

704220 FOR LLL = KKK + 1 TO NROW

704230 IF ABS(AAA(LLL, KKK)) < ABS(PIVOT) THEN GOTO 704260

704240 PIVOT = AAA(LLL, KKK)

704250 IL = LLL

704260 NEXT LLL

704270 IF IL = KKK THEN GOTO 704380

704300 REM * TRADE FILAS PARA OBTENER EL PIVOT MAS GRANDE *

704330 FOR LLLLL = 1 TO NCOL

704340 TEMP = AAA(KKK, LLLLL)

704350 AAA(KKK, LLLLL) = AAA(IL, LLLLL)

704360 AAA(IL, LLLLL) = TEMP

704370 NEXT LLLLL

704380 NEXT KKK

704410 REM * CALCULAR LA PRIMERA FILA *

704430 FOR JJJ = 2 TO NCOL

704440 AAA(1, JJJ) = AAA(1, JJJ) / AAA(1, 1)

704450 NEXT JJJ

704480 REM * HACER LAS ROWS(filas) Y COLS(columnas) *

704500 FOR LLL = 2 TO NROW

704530 REN * HACER LA L-sima COLUMNA *

704550 FOR K = LLL TO NROW

704560 SUM = 0

704570 FOR KKK = 1 TO LLL - 1

704580 SUM = SUM + AAA(K, KKK) * AAA(KKK, LLL)

704590 NEXT KKK

704600 AAA(K, LLL) = AAA(K, LLL) - SUM

704610 NEXT K

704640 REN * HACER LA L-sima FILA *

704660 FOR JJJ = LLL + 1 TO NCOL

704670 SUM = 0

704680 FOR KKK = 1 TO LLL - 1

704690 SUM = SUM + AAA(LLI, KKK) * AAA(KKK, JJJ)

704700 NEXT KKK

704710 AAA(LLI, JJJ) = (AAA(LLI, JJJ) - SUM) / AAA(LLI, LLL)

704720 NEXT JJJ

704730 NEXT LLL

704760 REN * OBTENER LOS VALORES DE C(I) POR SUSTITUCION HACIA ATRAS *

704790 C(NROW) = AAA(NROW, NCOL)

704800 FOR MMH = 1 TO NROW - 1

704810 X = NROW - MMH

704820 SUM = 0

704830 FOR JJJ = X + 1 TO NROW

704840 SUM = SUM + AAA(K, JJJ) * C(JJJ)

704850 NEXT JJJ

704860 C(K) = AAA(K, NCOL) - SUM

704870 NEXT MMH

704880 RETURN

**ANEXO 12: CALCULOS PARA LA DETERMINACION
DE LAS CONSTANTES 'K' DE LA ECUACION
DIFERENCIAL DE PRIMER ORDEN**

**RESULTADOS DE ANALISIS DE ACIDO PIRUVICO EN CEBOLLA BLANCA.
(mg de ac. piruvico/Kg de muestra seca)**

Tiempo (h)	TRATAMIENTO					
	50.1	50.2	60.1	60.2	70.1	70.2
0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	100.00	96.81	85.01	79.14	64.78	73.54
4	100.00	error	130.52	70.27	90.71	85.98
6	100.00	error	-	-	82.73	48.37
7	-	-	error	59.25	-	-

NOTA: RESULTADOS OFICIALES EXPRESADOS EN PORCENTAJES

AJUSTE DE LA CURVA DE CONTENIDO DE ACIDO PIRUVICO (%) A UNA
ECUACION DIFERENCIAL DE PRIMER ORDEN CON PENDIENTE NEGATIVA

$$dP / dt = - K P$$

$$K = [\ln (P_0/P)] / t$$

CASO 70.2		
K1	=	0.153848
K2	=	0.037772
K3	=	0.121051
Kprom	=	0.104157
P	=	100 e ^{-0.104157 t}

CASO 70.1		
K1	=	0.217059
K2	=	0.024383
K3	=	0.031588
Kprom	=	0.09101
P	=	100 e ^{-0.09101 t}

CASO 60.2		
K1	=	0.116993
K2	=	0.08822
K3	=	0.074763
Kprom	=	0.093325
P	=	100 e ^{-0.093325 t}

CASO 60.1		
K1	=	0.081179
K2	=	-0.06658
K3	=	error
Kprom	=	0.007297
P	=	100 e ^{-0.007297 t}

CASO 50.2		
K1	=	0.016231
K2	=	error
K3	=	error
Kprom	=	0.016231
P	=	100 e ^{-0.016231 t}