

DINÁMICA DE LA TRANSFERENCIA DE MASA DE CLOROFILA DE HOJAS DE ALFALFA A MEZCLAS DE ALCOHOL ETÍLICO Y AGUA

AUGUSTO CIURLIZZA G.
Escuela Superior de Ingeniería Textil (ESIT)
Instituto Politécnico Nacional

ALEJANDRA ORTEGA M.
Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV)
Instituto Politécnico Nacional

Resumen: Un gramo de hojas frescas de alfalfa se pusieron en contacto con un litro de una mezcla de alcohol etílico y agua a $25 \pm 2^\circ\text{C}$; se midió, a diferentes tiempos, la absorbancia a 435 n.m. y 460 n.m. del medio dispersante. Esto se llevó a cabo para mezclas de alcohol etílico y agua de 20, 40, 60 y 80 grados Gay Lussac, llegándose a las conclusiones resumidas en el siguiente cuadro:

<i>Graduación del alcohol etílico que extrae</i>	<i>Forma funcional que rige al fenómeno</i>
20° G.L.	Tangente hiperbólica
40° G.L.	Hipérbola exponencial
60° G.L.	Línea recta
80° G.L.	Tangente hiperbólica

Se calcularon y discutieron los coeficientes de transferencia de masa involucrados en cada una de las formas funcionales enlistadas arriba.

DYNAMIC OF THE TRANSFERENCE OF CLOKOPHILIC MASS FROM LUCEN LEAVES TO ETHYLIC ALCOHOL AND WATER MIXTURE

Abstract: One gram of alfalfa fresh leaves were put in contact with one liter mixture of ethylic alcohol and water to $25 \pm 2^\circ\text{C}$, measuring the absorbancy at different times at 435 n.m. and 460 n.m. from the dispersant medium. The above explained was carried out for the purpose of ethylic alcohol and water mixtures of 20, 40, 60 and 80 Gay Lussac grades and the summarized conclusions are explain in the following chart:

<i>Graduation at which the ethylic alcohol extracts</i>	<i>Functional for that manages the phenomom</i>
20° G.L.	Hyperbolic tangent
40° G.L.	Exponential hiperbole
60° G.L.	Straight line
80° G.L.	Hyperbolic tangent

The mass transfer coefficients involved in each of these functional forms listed in the above chart were calculated and discussed.

I. INTRODUCCIÓN

El interés de la clorofila y sus propiedades en la "tecnología de alimentos" se ha discutido en la literatura,^{1,2,3} estableciendo las siguientes afirmaciones:

1. La clorofila es un constituyente esencial de los alimentos verdes como espinacas, lechugas, pepinos, etc.
2. La clorofila constituye una fuente secundaria de magnesio tanto para el organismo humano como para diversos organismos animales.

Lo anterior hace indispensable que el "técnico en alimentos", que procesa nutrientes verdes, conozca el comportamiento químico y fisicoquímico de la clorofila.

El presente estudio contribuye al mejor conocimiento de la extracción de clorofila mediante alcohol etílico de diversas graduaciones Gay Lussac.

II. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

En la literatura^{1,2,3,4} hay artículos que contienen extensos antecedentes bibliográficos sobre clorofila, por lo que aquí sólo señalaremos algunos aspectos de esta literatura. Se ha reportado¹ que la extracción de clorofila de hojas de clavo mediante alcohol etílico absoluto se rige por la forma funcional de las reacciones autocatalíticas en tiempo, es decir, se adapta satisfactoriamente a un modelo matemático de tangente hiperbólica.

Se encuentra también el dato² de que al extraer clorofila de hojas de hierbabuena mediante alcohol

etílico absoluto se obtiene una curva que se adapta al modelo matemático de las reacciones irreversibles de primer orden, o sea, dicha extracción se rige por un modelo matemático de hipérbola exponencial. Hay asimismo un artículo⁴ en el que se analiza mediante la ley de Gulberg y Waage⁵ la extracción de clorofila.

En otra referencia³ se concluye, mediante las ecuaciones de Levenspiel,⁶ que en la extracción de clorofila la película del líquido controla el fenómeno dinámico. Esta literatura concierne a la transferencia de masa de la clorofila contenida en hojas de diversos vegetales hacia alcohol etílico absoluto.

III. MATERIAL Y MÉTODO

En el mercado "Gabriel Hernández" de la colonia Atzacolco de la ciudad de México se adquirieron ramas de alfalfa provenientes de la región de Tlahuilpa del estado de Hidalgo, México. Por pregunta directa a los comerciantes se supo que la alfalfa tenía dos días de cortada; las ramas se obtuvieron en abril de 1978 y se tomó la precaución de seleccionar las más frescas. Inmediatamente después de adquiridas se pesó un gramo de hoja de alfalfa y se puso en contacto con un litro de alcohol de graduaciones Gay Lussac conocidas, 20° G.L., 40° G.L., 60° G.L. y 80° G.L. Al momento de poner las hojas en contacto con el alcohol se le llamó tiempo cero.

Las mezclas se colocaron en frascos ámbar y se guardaron en una gaveta al abrigo de la luz en donde la temperatura era de $25 \pm 2^\circ\text{C}$, según lo mostraron perfiles del potencial térmico determinados mediante

un termómetro estándar de laboratorio. Los frascos se agitaron para inmediatamente después tomar 10 ml de líquido y medir la absorbancia a 435 n.m. y 460 n.m. mediante un espectrofotómetro. Esta operación

se hizo a diversos tiempos para cada uno de los frascos con objeto de determinar las isotermas absorbancia contra tiempo que aparecen en forma numérica en el cuadro I y en forma gráfica en las figuras 1 y 2.

CUADRO I. Isotermas de absorbancia contra tiempo obtenidas a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, correspondientes a la transferencia de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de diversas graduaciones Gay Lussac ($^\circ\text{G.L.}$).

20° G.L.			40° G.L.			60° G.L.			80° G.L.		
<i>t</i>	<i>A</i>										
DIAS	435n.m.	460n.m.	DIAS	435n.m.	460n.m.	HRS.	435n.m.	460n.m.	HRS.	435n.m.	460n.m.
1	0.0124	0.0044	1	0.0070	0.0044	1	0.0022	0.0009	1	0.0096	0.0048
2	0.0133	0.0053	2	0.0260	0.0160	2	0.0053	0.0044	2	0.0096	0.0066
3	0.0142	0.0075	3	0.0380	0.0246	3	0.0088	0.0062	4	0.0142	0.0110
4	0.0178	0.0097	4	0.0540	0.0315	4	0.0137	0.0115	5	0.0173	0.0151
5	0.0200	0.0128	5	0.0661	0.0396	5	0.0169	0.0133	6	0.0268	0.0218
6	0.0214	0.0102	6	0.0770	0.0448	6	0.0223	0.0182	7	0.0366	0.0306
7	0.0264	0.0137	7	0.0890	0.0506	7	0.0255	0.0264	8	0.0491	0.0410
8	0.0297	0.0173	8	0.0969	0.0511	8	0.0358	0.0297	9	0.0629	0.0541
9	0.0348	0.0182	9	0.1063	0.0585	9	0.0396	0.0315	10	0.0666	0.0605
10	0.0367	0.0223	10	0.1136	0.0625	10	0.0453	0.0358	11	0.0996	0.0852
11	0.0396	0.0232	11	0.1192	0.0650	11	0.0463	0.0362	12	0.1243	0.1041
12	0.0405	0.0232	12	0.1204	0.0661	12	0.0506	0.0410	14	0.1688	0.1421
13	0.0434	0.0269	13	0.1250	0.0665	13	0.0511	0.0458	15	0.1845	0.1525
14	0.0429	0.0260	14	0.1314	0.0706	22	0.0847	0.0655	20	0.2262	0.1864
15	0.0443	0.0260	15	0.1367	0.0752	24	0.0900	0.0691	21	0.2299	0.1918
16	0.0453	0.0269	16	0.1397	0.0763	26	0.0969	0.0747	22	0.2292	0.1932
17	0.0453	0.0269	17	0.1470	0.0799	27	0.0975	0.0758	23	0.2434	0.2007
18	0.0443	0.0269	18	0.1482	0.0804	28	0.01024	0.0768	25	0.2480	0.2069
19	0.0453	0.0269	19	0.1482	0.0763	29	0.1052	0.0804	26	0.2526	0.2091
			20	0.1549	0.0810	30	0.1118	0.0806	27	0.2534	0.2147
			21	0.1643	0.0873	31	0.1164	0.0844	28	0.2573	0.2161
			22	0.1675	0.0905	32	0.1215	0.0921	29	0.2597	0.2190
			23	0.1707	0.0905	33	0.1249	0.0932	30	0.2636	0.2212
			24	0.1662	0.0905	34	0.1309	0.0980	31	0.2676	0.2226
			25	0.1720	0.0915	36	0.1308	0.0959	32	0.2741	0.2255
			26	0.1701	0.0942	37	0.1349	0.0970	33	0.2768	0.2298
			27	0.1675	0.0905	38	0.1373	0.1019	36	0.2758	0.2270
			28	0.1675	0.0915	47	0.1618	0.1198	37	0.2774	0.2299
			29	0.1720	0.0915	49	0.1688	0.1238	38	0.2807	0.2307
			30	0.1720	0.0942	50	0.1727	0.1238	44	0.2865	0.2381
			31	0.1720	0.0942	51	0.1772	0.1250	46	0.2857	0.2389

(Continúa)

CUADRO I. (Continuación.)

20° G.L.			40° G.L.			60° G.L.			80° G.L.		
<i>t</i>		<i>A</i>									
DIAS	435n.m.	460n.m.	DIAS	435n.m.	460n.m.	HRS.	435n.m.	460n.m.	HRS.	435n.m.	460n.m.
						52	0 1742	0 1250	48	0 2815	0 2359
						54	0 1864	0 1314	49	0 2840	0 2366
						55	0 1885	0 1314	50	0 2849	0 2381
						51	0 1980	0 1457	51	0 2849	0 2381
						59	0 2083	0 1500	52	0 2849	0 2390
						60	0 2147	0 1525	53	0 2849	0 2381
						69	0 2366	0 1688			
						70	02366	0 1682			

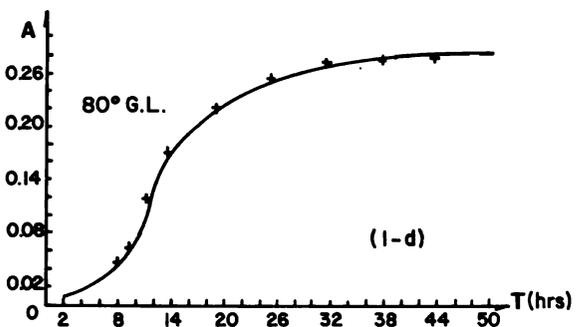
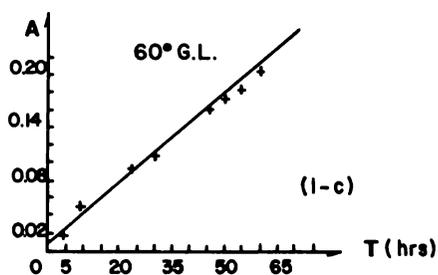
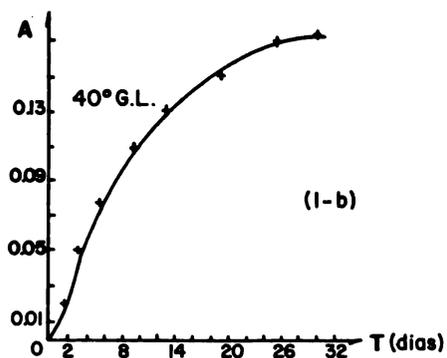
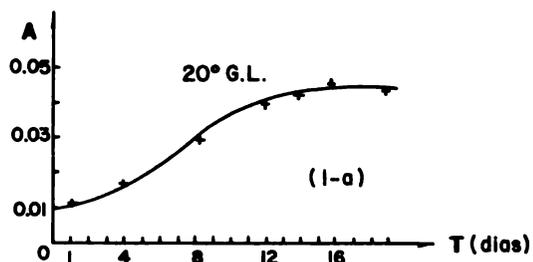


Fig. 1. Isotermas de absorbancia a 435 nonómetros contra tiempo, obtenidas a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, correspondientes a la transferencia de clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de diversas graduaciones Gay Lussac ($^\circ\text{G.L.}$) *T*-tiempo; *A*-absorbancia.

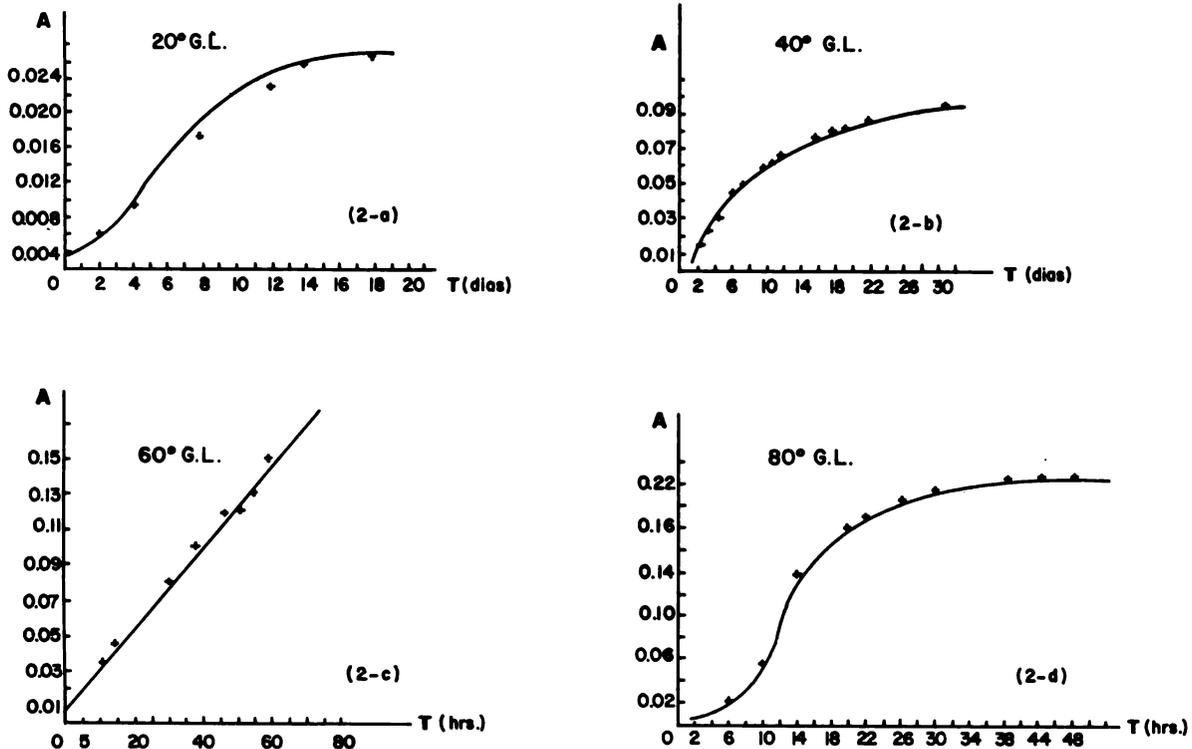


Fig. 2. Isoterma de absorbancia a 460 nonámetros contra tiempo, obtenidas a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, correspondiente a la transferencia de clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de diversas graduaciones Gay Lussac. ($^\circ\text{G.L.}$). T -tiempo; A -absorbancia.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La observación directa de las curvas de las figuras 1 y 2 permite inferir que la forma funcional que rige la transferencia de clorofila de hojas de alfalfa hacia alcohol etílico, tiene una naturaleza matemática que varía según la graduación Gay Lussac del alcohol etílico empleado. Por tal motivo, en este trabajo se hace un análisis matemático que agrupa a las isotermas obtenidas conforme a su graduación Gay Lussac.

a) Isotermas a 20 grados Gay Lussac

Las curvas de las figuras (1-a) y (2-a) son líneas francamente sigmoidales, semejantes a las que resultan en los estudios de reacciones autocatalíticas en tiempo,^{1,7,8} y por ello se decidió utilizar la forma funcional que rige a estas reacciones para describir la dinámica del fenómeno de transferencia de clorofila de un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 20 grados Gay Lussac a $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Dicha forma funcional es como sigue:

$$\ln \left(\frac{A_{\infty, 20}}{A} - 1 \right) = -k_{20} A_{\infty, 20} t + k_{20} A_{\infty, 20} t_{1/2, 20} \quad (1)$$

donde:

- A Absorbancia a un tiempo t .
- $A_{\infty, 20}$ Valor asintótico de la absorbancia, o sea, la absorbancia a un tiempo hipotéticamente infinito al usar alcohol de 20 grados Gay Lussac.
- k_{20} Constante de velocidad de transferencia de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 20 grados Gay Lussac a $25 \pm 2^\circ\text{C}$.
- $t_{1/2, 20}$ Tiempo necesario para que se transfiera la mitad de la clorofila total de la hoja de alfalfa hacia el alcohol etílico.

La forma funcional (1) indica que para calcular la constante de velocidad de transferencia, k_{20} , deberá graficarse $\ln \left(\frac{A_{\infty, 20}}{A} - 1 \right)$ contra el tiempo, lo cual conducirá a una recta de cuya pendiente emanará el valor del coeficiente k_{20} y de cuya intersección con el eje de las abscisas se podrá obtener el coeficiente

$t_{1/2, 20}$. Para ello se requiere conocer los valores numéricos del parámetro $A_{\infty, 20}$, lo cual se llevó a cabo por inspección geométrica de las curvas de las figuras (1-a) y (2-a). Estos valores se indican en el cuadro II.

Al construir los gráficos cartesianos indicados por la ecuación (1) se llegó a las rectas de las figuras 3 y 4; dichas rectas se fijaron mediante técnicas estadísticas clásicas⁹ con objeto de obtener los valores más probables de los parámetros k_{20} y $t_{1/2, 20}$ de la ecuación (1) y poder además calcular parámetros de validez estadística que proporcionen información sobre qué tan acertado es aplicar la forma funcional (1) a las curvas de las figuras (1-a) y (2-a).

De aquí se llegó a los valores numéricos dados en el cuadro II y cuya discusión es como sigue:

1. Los valores numéricos de los coeficientes de correlación y regresión, r , permiten aseverar que el modelo matemático de las reacciones autocatalíticas en

tiempo se adapta a la descripción del fenómeno de transferencia de clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 20 grados Gay Lussac, a temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$, con una confianza estadística de 97%.

2. Los valores numéricos del parámetro de Student, τ , en conjunción con gráficas adecuadas,⁹ señalan que la probabilidad de que el modelo matemático mencionado en el inciso anterior se adapte por casualidad al fenómeno descrito en dicho inciso es inferior al 0.1%.

3. Los valores numéricos del error típico medio $S_{y,x}$, señalan que al aplicar el modelo matemático al fenómeno en estudio los puntos experimentales se dispersan relativamente poco.

4. El parámetro $A_{\infty, 20}$ resulta una función franca de la longitud de onda, ya que como se ve en el cuadro II, a 435 n.m. el valor de dicho parámetro es casi el doble del que corresponde a 460 n.m.

CUADRO II. Valores numéricos de los parámetros de transferencia de masa de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 20 grados Gay Lussac.

λ (n.m.)	$A_{\infty, 20}$	k_{20} (días ⁻¹)	$t_{1/2, 20}$ (días)	r (%/100)	τ	c (%)	$S_{y,x}$
435	0.046	6.602	5.298	-0.970	18.68	>> 0.1	0.3691
460	0.028	10.81	6.317	-0.976	16.52	>> 0.1	0.4149

Los parámetros se obtuvieron al aplicar el modelo matemático de las reacciones autocatalíticas en tiempo al fenómeno físico en análisis. En el cuadro se presentan también los valores numéricos de los estadísticos de validez obtenidos al aplicar el modelo matemático al fenómeno en cuestión.

- λ Longitud de onda en nonómetros.
- $A_{\infty, 20}$ Valor asintótico de la absorbancia del alcohol de 20 grados Gay Lussac en contacto con un gramo de hoja de alfalfa, o sea, absorbancia que tendría el alcohol que hubiera permanecido un tiempo infinito en contacto con hoja de alfalfa.
- k_{20} Constante de velocidad de extracción para alcohol etílico de 20 grados Gay Lussac.
- $t_{1/2, 20}$ Tiempo necesario para extraer la mitad de la clorofila que puede extraerse.
- r Coeficiente de correlación y regresión.
- τ Parámetro de Student.
- c Casualidad.
- $S_{y,x}$ Error típico medio.

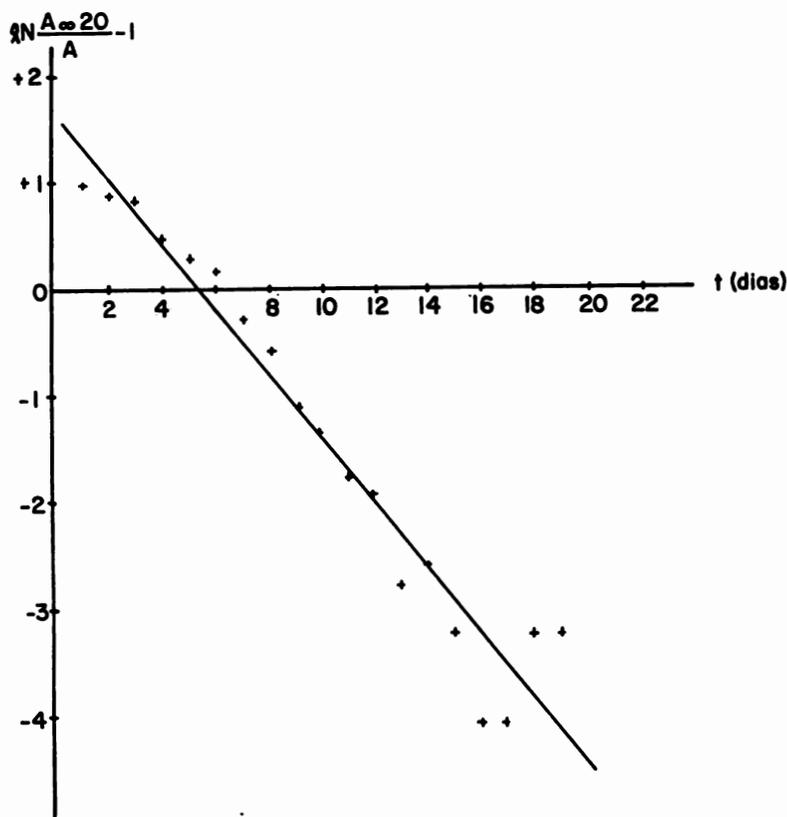


Fig. 3. Recta obtenida al aplicar el modelo matemático de las reacciones autocatalíticas en tiempo al fenómeno de extracción de clorofila de un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 20° G.L. a una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y midiendo en el fluido la absorbancia a 435 nonómetros. A -absorbancia a un tiempo t ; $A_{\infty, 20}$ -absorbancia a un tiempo hipotéticamente infinito, o sea, valor asintótico de la absorbancia.

5. El valor numérico del parámetro k_{20} muestra una franca dependencia de la longitud de onda, ya que la magnitud de k_{20} a 460 n.m. es casi el doble que a 435 n.m.

6. La magnitud del parámetro $t_{1/2, 20}$ da la impresión de no depender de la longitud de onda, o depender muy poco de ella, ya que los valores numéricos en el cuadro II son prácticamente iguales.

Los parámetros estadísticos discutidos en los puntos primero, segundo y tercero, justifican la aseveración de que el modelo matemático de las reacciones autocatalíticas en tiempo describe acertadamente el fenómeno de transferencia de masa de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 20 grados Gay Lussac. Por otra parte, los puntos cuatro, cinco y seis enfatizan la dependencia o independencia, con respecto a la longitud de onda, de los parámetros de transferencia de masa contenidos en el modelo matemático.

b) Isotermas a 40 grados Gay Lussac

Las curvas de las figuras (1-b) y (2-b) son hipérbolas exponenciales francas, semejantes a las que resultan en los estudios de reacciones irreversibles de primer orden,^{2,10,11} y por ello se decidió utilizar la forma funcional que rige a estas reacciones para describir la dinámica del fenómeno de transferencia de clorofila de hoja fresca de alfalfa hacia alcohol etílico de 40 grados Gay Lussac. Esta forma funcional es como sigue:

$$\ln(A_{\infty, 40} - A) = -k_{40} t + \ln A_{\infty, 40} \quad (2)$$

donde:

A Absorbancia a un tiempo t .

$A_{\infty, 40}$ Valor asintótico de la absorbancia, o sea, la absorbancia a un tiempo infinito.

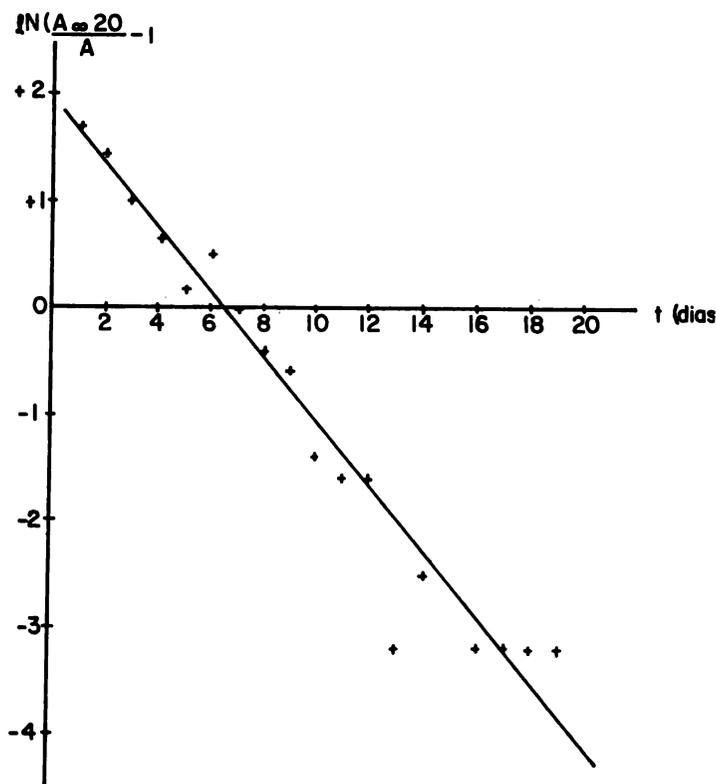


Fig. 4. Recta obtenida al aplicar el modelo matemático, de las reacciones autocatalíticas en tiempo al fenómeno de extracción de clorofila de un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 20° G.L. a una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y midiendo en el fluido la absorbancia a 460 nonómetros. A -absorbancia a un tiempo t , $A_{\infty,20}$ -absorbancia a un tiempo hipotéticamente infinito, o sea, valor asintótico de la absorbancia.

k_{40} Constante de velocidad de transferencia de la clorofila contenida en hoja fresca de alfalfa hacia alcohol etílico de 40 grados Gay Lussac.

La forma funcional (2) indica que para calcular la constante de velocidad de transferencia, k_{40} , deberá graficarse $\ln(A_{\infty,40} - A)$ contra el tiempo, lo cual conducirá a una recta de cuya pendiente emanará el valor del coeficiente k_{40} . Por tanto, es necesario conocer los valores numéricos del parámetro $A_{\infty,40}$, lo cual se llevó a cabo por inspección geométrica de las curvas de las figuras (1-b) y (2-b). Estos valores se dan en el cuadro III.

Al construir los gráficos cartesianos indicados por la ecuación (2), se llegó a las rectas de las figuras 5 y 6; dichas rectas se fijaron mediante técnicas estadísticas clásicas⁹ con objeto de obtener el valor más probable del parámetro k_{40} de la ecuación (2) y poder,

además, calcular parámetros de validez estadística que proporcionen información sobre qué tan acertado es aplicar la forma funcional (2) a las curvas de las figuras (1-b) y (2-b). De esta manera se llegó a los valores numéricos dados en el cuadro III y su discusión es la siguiente:

1. Los valores numéricos de los coeficientes de correlación y regresión, r , permiten aseverar que el modelo matemático de las reacciones irreversibles de primer orden se adapta a la descripción del fenómeno de transferencia de clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 40 grados Gay Lussac, a temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$, con una confianza estadística de 96.64%.

2. Los valores numéricos del parámetro de Student, τ , en conjunción con gráficas adecuadas,⁹ señalan que la probabilidad de que el modelo matemático se adapte por casualidad al fenómeno descrito es inferior al 0.1%.

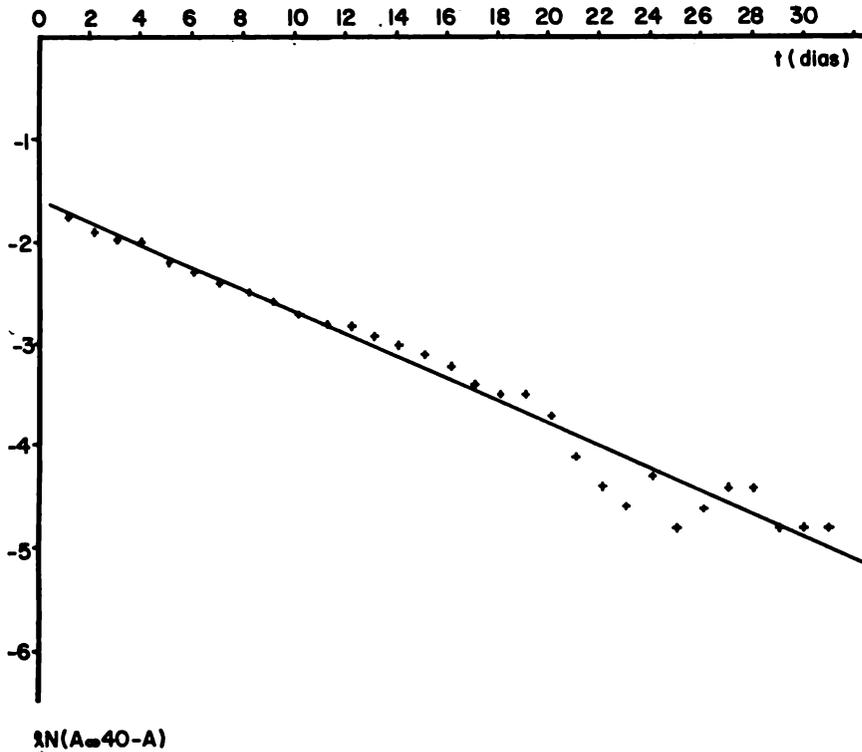


Fig. 5. Recta obtenida al aplicar el modelo matemático de las reacciones irreversibles de primer orden al fenómeno de extracción de clorofila de un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 40° G.L. a una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y midiendo en el fluido la absorbancia a 435 nonómetros. A -absorbancia a un tiempo t , $A_{\infty, 40}$ -absorbancia a un tiempo hipotéticamente infinito, o sea, valor asintótico de la absorbancia.

CUADRO III. Valores numéricos de los parámetros de transferencia de masa de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia alcohol etílico de 40 grados Gay Lussac.

λ (n.m.)	$A_{\infty, 40}$	k_{40} (días)	r (%/100)	τ	c (%)	S_{yx}
435	0.18	0.1105	-0.9826	28.49	>> 0.1	0.1868
460	0.095	0.1443	-0.9501	16.40	>> 0.1	0.4838

Los parámetros se obtuvieron al aplicar el modelo matemático de la evolución cinética, que rige las reacciones irreversibles de primer orden, al fenómeno fisicoquímico en análisis. El cuadro presenta también los valores numéricos de los estadísticos de validez obtenidos al aplicar el modelo matemático al fenómeno en cuestión.

Longitud de onda en nonómetros.

$A_{\infty, 40}$ Valor asintótico de la absorbancia del alcohol de 40 grados Gay Lussac en contacto con un gramo de hoja de alfalfa, o sea, absorbancia que tendría el alcohol que hubiera permanecido un tiempo infinito en contacto con hoja de alfalfa.

k_{40} Constante de velocidad de extracción para alcohol etílico de 40 grados Gay Lussac.

r Coeficiente de correlación y regresión.

τ Parámetro de Student.

c Casualidad.

$S_{y,x}$ Error típico medio.

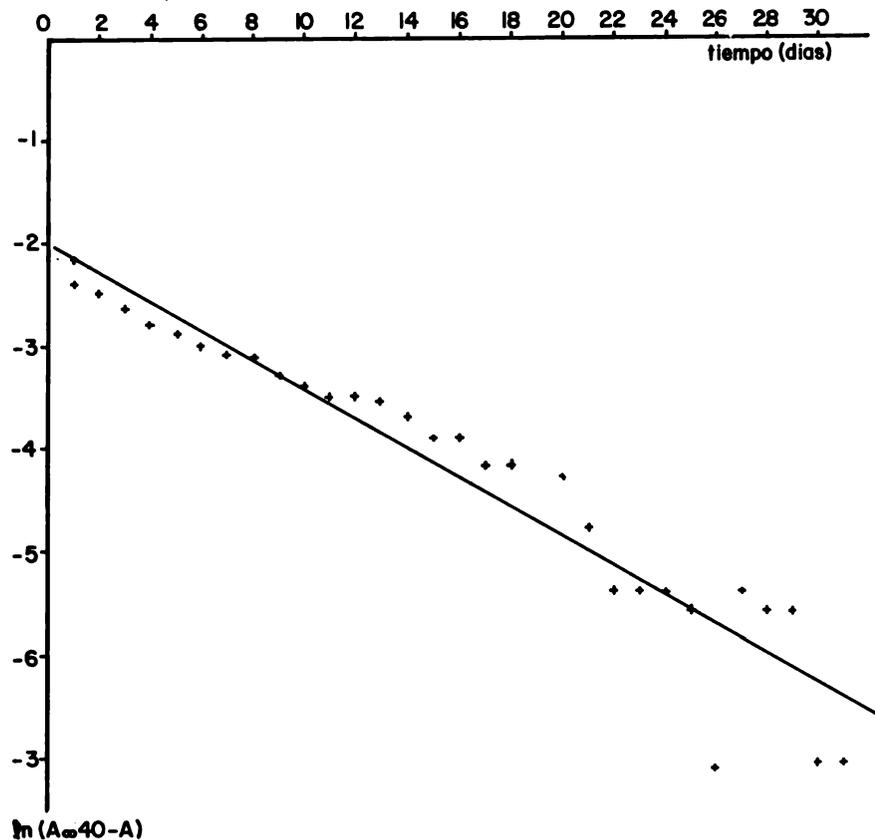


Fig. 6. Recta obtenida al aplicar el modelo matemático de las reacciones irreversibles de primer orden al fenómeno de extracción de clorofila de un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 40° G.L. a una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y midiendo en el fluido la absorbancia a 460 nonómetros. A -absorbancia a un tiempo t , $A_{\infty, 40}$ -absorbancia a un tiempo hipotéticamente infinito, o sea, valor asintótico de la absorbancia.

3. Los valores numéricos del error típico medio $S_{y,x}$ señalan que al aplicar el modelo matemático al fenómeno en estudio los puntos experimentales se dispersan relativamente poco.

4. El parámetro $A_{\infty, 40}$ resulta una función franca de la longitud de onda, ya que, como se ve en el cuadro III, a 435 n.m. el valor de dicho parámetro es casi el doble del que corresponde a 460 n.m.

5. El valor numérico del parámetro k_{40} muestra que casi no depende de la longitud de onda, ya que la magnitud de k_{40} a 460 n.m. excede en 23% a la magnitud obtenida a 435 n.m. Cabe aclarar que para efectos de parámetros de transferencia de masa, una diferencia de 23% no es lo suficientemente grande como para afirmar que las magnitudes numéricas de dichos parámetros son diferentes.

Los parámetros estadísticos discutidos en los puntos primeros, segundo y tercero, justifican la aseveración de que el modelo matemático de las reacciones irreversibles de primer orden describe acertadamente el fenómeno de transferencia de masa de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 40 grados Gay Lussac. Por otra parte, los puntos cuatro y cinco enfatizan la dependencia o independencia, con respecto a la longitud de onda, de los parámetros de transferencia de masa contenidos en el modelo matemático.

c) Isotermas a 60 grados Gay Lussac

Las curvas de las figuras (1-c) y (2-c) son líneas francamente rectas, semejantes a las que resultan en los estudios de reacciones de orden cero, y por ello se decidió utilizar la forma funcional que rige estas reacciones para describir la dinámica del fenómeno de transferencia de masa de clorofila de hoja fresca de alfalfa hacia alcohol etílico de 60 grados Gay Lussac. Dicha forma funcional es como sigue:

$$A = -k_{60} t + A_{0, 60}$$

donde:

A Absorbancia a un tiempo t :

$A_{0, 60}$ Absorbancia proporcional a la cantidad de clorofila que contuviera inicialmente la fase dispersante que extrae (prácticamente cero en este caso).

k_{60} Constante de velocidad de transferencia de la clorofila contenida en la hoja fresca de alfalfa

hacia alcohol etílico de 60 grados Gay Lussac.

La forma funcional (3) indica que para calcular la constante de velocidad de transferencia, k_{60} , deberá graficarse la absorbancia contra el tiempo, lo cual conducirá a una recta de cuya pendiente emanará el valor del coeficiente k_{60} y cuya intersección al origen será prácticamente nula debido a las condiciones experimentales de este trabajo. La construcción de estos gráficos cartesianos resulta innecesaria debido a que coinciden con los (1-c) y (2-c) de las figuras 1 y 2 del presente estudio. Las rectas (1-c) y (2-c) se fijaron mediante técnicas estadísticas clásicas⁹ con objeto de obtener los valores más probables de los parámetros k_{60} y $A_{0, 60}$ contenidos en la ecuación (3) y poder, además, calcular parámetros de validez estadística que proporcionen información sobre qué tan acertado es aplicar la forma funcional (3) a las curvas mencionadas al inicio de esta párrafo. Al hacer esto, se llegó a los valores numéricos del cuadro IV y cuya discusión es la siguiente:

1. Los valores numéricos de los coeficientes de correlación y regresión, r , permiten aseverar que el modelo matemático de las reacciones irreversibles de orden cero se adapta a la descripción del fenómeno de transferencia de clorofila en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 60 grados Gay Lussac, a temperatura de $29 \pm 2^\circ\text{C}$, con una confianza estadística de 99.61%.

2. Los valores numéricos del parámetro de Student, τ , en conjunción con gráficas adecuadas,⁹ señalan que la probabilidad de que el modelo matemático se adapte por casualidad al fenómeno descrito, es inferior al 0.1%.

3. Los valores numéricos del error típico medio $S_{y,x}$ señalan que al aplicar el modelo matemático al fenómeno en estudio los puntos experimentales se dispersan relativamente poco.

4. Los valores numéricos del parámetro $A_{0, 60}$ son prácticamente nulos, como era de esperarse, ya que en el presente estudio el gramo de hoja de alfalfa se puso en contacto con un litro de alcohol de 60 grados Gay Lussac a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y este solvente no contenía inicialmente nada de clorofila, por lo que los valores numéricos en discusión, además de ser pequeños, son justificablemente atribuibles a ruido experimental.

5. El valor numérico del parámetro k_{60} del cuadro IV, muestra que sí depende de la longitud de onda, ya

que la magnitud de k_{60} a 435 n.m. excede en 36% a la magnitud obtenida a 460 n.m. Cabe aclarar que para efectos de parámetros de transferencia de masa, una diferencia de 36% es lo suficientemente grande como para afirmar que las magnitudes numéricas de dichos parámetros son diferentes.

Los parámetros estadísticos discutidos en los puntos primero, segundo y tercero, justifican la aseveración de que el modelo matemático de las reacciones

de orden cero describe acertadamente el fenómeno de transferencia de masa de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 60 grados Gay Lussac. Por otra parte, los puntos cuatro y cinco enfatizan la dependencia o independencia, con respecto a la longitud de onda, de los parámetros de transferencia de masa contenidos en el modelo matemático.

CUADRO IV. Valores numéricos de los parámetros de transferencia de masa de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia alcohol etílico de 60 grados Gay Lussac.

λ (n.m.)	$A_{0,60}$	k_{60} (hrs)	r (%/100)	τ	c (%)	$S_{y,x}$
435	0.0059	0.00339	0.9978	91.05	>> 0.1	0.0046
460	0.0085	0.00237	0.9944	57.36	>> 0.1	0.00511

Los parámetros se obtuvieron al aplicar el modelo matemático de la evolución cinética, que rige las reacciones de orden cero, al fenómeno físico-químico en análisis. El cuadro presenta también los valores numéricos de los estadísticos de validez obtenidos al aplicar el modelo matemático al fenómeno en cuestión.

λ Longitud de onda en nanómetros.

$A_{0,60}$ Valor inicial de la absorbancia.

k_{60} Constante de velocidad de extracción para la clorofila contenida en la hoja fresca de alfalfa hacia alcohol etílico de 60 grados Gay Lussac.

r Coeficiente de correlación y regresión.

τ Parámetro de Student.

c Casualidad.

$S_{y,x}$ Error típico medio.

d) Isotermas a 80 grados Gay Lussac

Las curvas de las figuras (1-d) y (2-d) son líneas francamente sigmoidales, equivalentes en cuanto a forma funcional a las obtenidas para el caso del inciso a), o sea, para los experimentos realizados a 20 grados Gay Lussac.

En el presente trabajo la transferencia de clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 80 grados Gay Lussac, a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, se estudió mediante una forma funcional equivalente a la ecuación (1) en base a la consideración del párrafo anterior:

$$\ln\left(\frac{A_{\infty, 80}}{A} - 1\right) = -k_{80} A_{\infty, 80} t + k_{80} A_{\infty, 80} t_{1/2, 80} \quad (4)$$

$t_{1/2, 80}$ Tiempo necesario para que se transfiera la mitad de la clorofila total de la hoja de alfalfa hacia el alcohol etílico.

donde:

A Absorbancia a un tiempo t .

$A_{\infty, 80}$ Valor asintótico de la absorbancia, o sea, la absorbancia a un tiempo hipotéticamente infinito al usar alcohol etílico de 80 grados Gay Lussac.

k_{80} Constante de velocidad de transferencia de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia alcohol etílico de 80 grados Gay Lussac, a $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

La importancia de la determinación del parámetro $A_{\infty, 80}$ para determinar posteriormente los índices de transferencia de masa que contiene la forma funcional (4), está explicada y justificada en el inciso a) de esta parte IV, sólo que en dicho inciso se discute el parámetro $A_{\infty, 20}$ que es equivalente fisicoquímicamente el parámetro $A_{\infty, 80}$ ahora en discusión.

Al igual que para el caso del parámetro $A_{\infty, 20}$, el valor numérico de $A_{\infty, 80}$ se determina por inspección geométrica, llegándose a las magnitudes aritméticas que constan en el cuadro V. La inspección geométrica se llevó a efecto sobre las gráficas (1-d) y (2-d).

Para determinar los índices de transferencia de masa, k_{80} y $t_{1/2, 80}$, se siguió la misma técnica explicada en el inciso a) de esta parte IV, llegándose así a las fi-

CUADRO V. Valores numéricos de los parámetros de transferencia de masa de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 80 grados Gay Lussac.

λ (n.m.)	$A_{\infty, 80}$	k_{80} (hrs. ⁻¹)	$t_{1/2, 80}$ (hrs.)	r (%/100)	τ	c (%)	S_{yx}
435	0.29	0.4943	16.956	0.956	19.81	>> 0.1	0.7006
460	0.24	0.6629	16.4117	0.9645	21.62	>> 0.1	0.6891

Los parámetros se obtuvieron al aplicar el modelo matemático de las reacciones autocatalíticas en tiempo al fenómeno físico en análisis. El cuadro presenta además los valores numéricos de los estadísticos de validez obtenidos al aplicar el modelo matemático al fenómeno en cuestión.

λ Longitud de onda en nonámetros.

$A_{\infty, 80}$ Valor asintótico de la absorbancia del alcohol de 80 grados Gay Lussac en contacto con un gramo de hoja de alfalfa, o sea, absorbancia que tendría el alcohol que hubiera permanecido un tiempo infinito en contacto con hoja de alfalfa.

k_{80} Constante de velocidad de extracción para alcohol etílico de 80 grados Gay Lussac.

$t_{1/2, 80}$ Tiempo necesario para extraer la mitad de la clorofila que puede extraerse.

r Coeficiente de correlación y regresión.

τ Parámetro de Student.

c Casualidad.

S_{yx} Error típico medio.

guras 7 y 8, de donde se obtienen los valores numéricos presentados en el cuadro V; además, mediante técnicas estadísticas clásicas,⁹ se llegó a las magnitudes aritméticas de validez estadística que constan en el mismo cuadro.

La discusión de los valores numéricos del cuadro V se da a continuación:

1. Los valores numéricos del coeficiente de correlación y de regresión, r , permiten aseverar que el modelo matemático de las reacciones autocatalíticas en tiempo se adapta a la descripción del fenómeno de transferencia de clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 80 grados Gay Lussac, a temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$, con una confianza estadística de 96%.

2. Los valores numéricos del parámetro de Student, τ , en conjunción con gráficas adecuadas,⁹ señalan que la probabilidad de que el modelo matemático mencionado en el inciso anterior se adapte por casualidad al fenómeno descrito en dicho inciso es inferior al 0.1%.

3. Los valores numéricos del error típico medio, $S_{y,x}$, señalan que al aplicar el modelo matemático al fenómeno en estudio los puntos experimentales se dispersan considerablemente, aspecto que puede observarse en las figuras 7 y 8.

4. El parámetro $A_{\infty, 80}$ resulta una función franca de la longitud de onda, ya que, como se ve en el cuadro V, a 435 n.m. el valor de dicho parámetro es 20.83% superior al correspondiente a 460 n.m.

5. El valor numérico del parámetro k_{80} muestra una franca dependencia de la longitud de onda, ya que la magnitud de k_{80} a 460 n.m. es 34.11% superior a la magnitud del parámetro en discusión obtenido a 435 n.m.

6. La magnitud del parámetro $t_{1/2, 80}$ da la impresión de no depender de la longitud de onda, o depender muy poco de ella, ya que los valores numéricos en el cuadro V son prácticamente iguales.

Los parámetros estadísticos discutidos en los puntos primero, segundo y tercero, justifican la asevera-

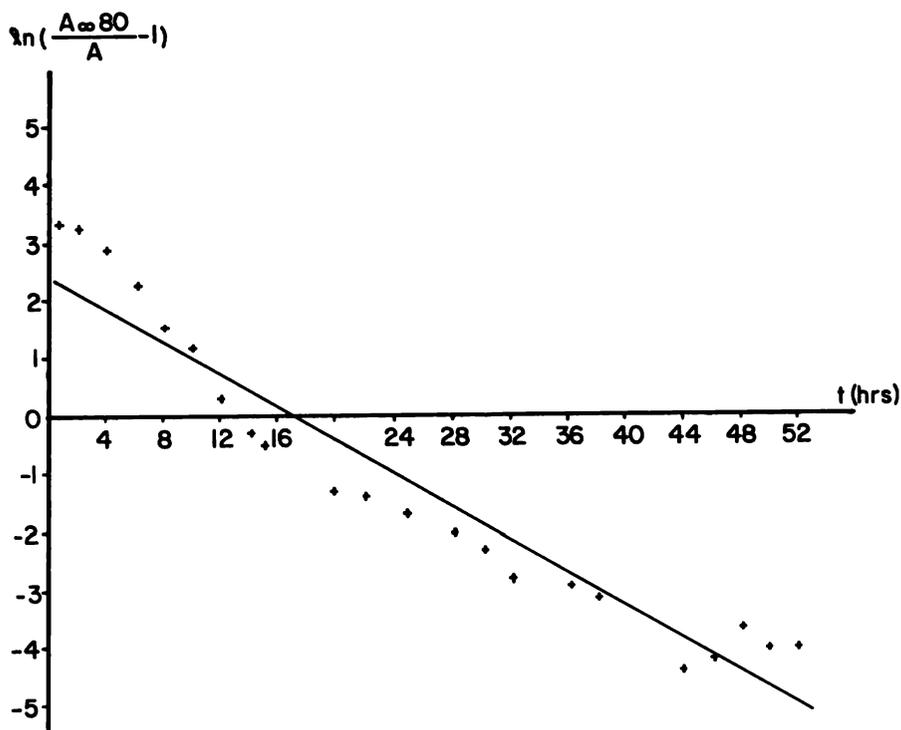


Fig. 7. Recta obtenida al aplicar el modelo matemático de las reacciones autocatalíticas en tiempo al fenómeno de extracción de clorofila de un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 80°G.L. a una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y midiendo en el fluido la absorbancia a 435 nonómetros. A -absorbancia a un tiempo t , $A_{\infty, 80}$ -absorbancia a un tiempo hipotéticamente infinito, o sea, valor asintótico de la absorbancia.

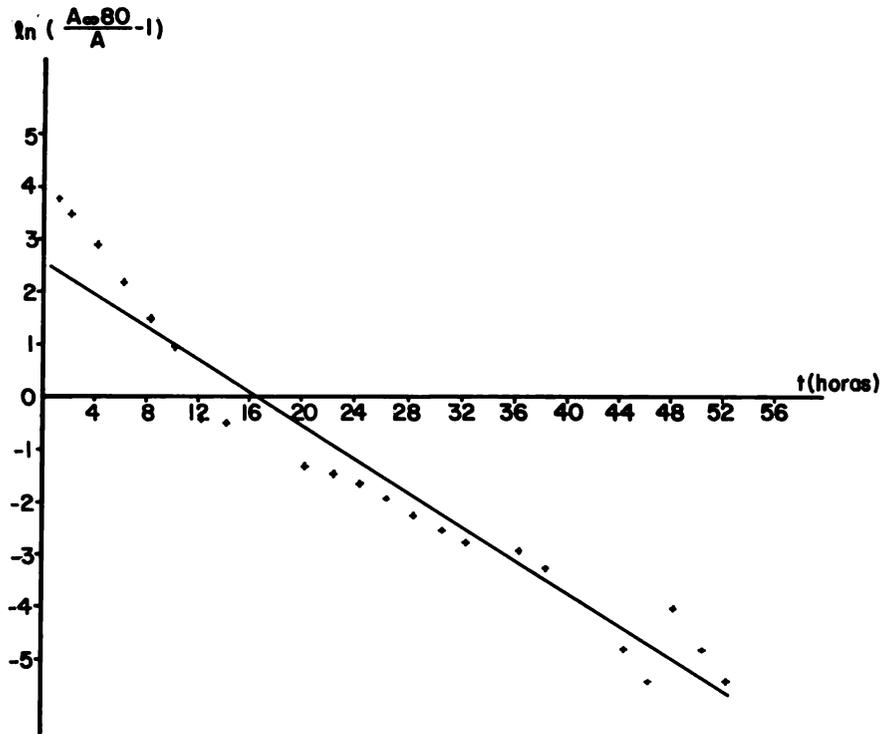


Fig. 8. Recta obtenida al aplicar el modelo matemático de las reacciones autocatalíticas en tiempo al fenómeno de extracción de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 80° G.L. a una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y midiendo en el fluido la absorbancia a 460 nonómetros. A -absorbancia a un tiempo t , $A_{\infty, 80}$ -absorbancia a un tiempo hipotéticamente infinito, o sea, valor asintótico de la absorbancia.

ción de que el modelo matemático de las reacciones autocatalíticas en tiempo describe acertadamente el fenómeno de transferencia de masa de la clorofila contenida en un gramo de hoja fresca de alfalfa hacia un litro de alcohol etílico de 80 grados Gay Lussac.

Por otra parte, los puntos cuatro, cinco y seis enriquecen la dependencia o independencia, con respecto a la longitud de onda, de los parámetros de transferencia de masa contenidos en el modelomatemático en cuestión.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ciurlizza G. A. y Campos C., J. M.: "Cinética de la extracción de clorofila a partir de hoja de clavo mediante alcohol etílico". *Rev. Tecnol. Alim.* (Méx.) (1976) (en prensa).
2. Ciurlizza G., A. y Franco A., F.: "Cinética de extracción de clorofila de la hierbabuena en etanol". *Rev. Tecnol. Alim.* (Méx.) (1976) (en prensa).
3. Ciurlizza G., A. y Martínez M., H.: "Análisis dinámico heterogéneo de la extracción de clorofila de hojas de alfalfa mediante alcohol etílico" *Rev. Tecnol. Alim.* (Méx.) (1976) (en prensa).
4. Ciurlizza G., A. y Martínez M., H.: "Cinética de extracción de clorofila a partir de alfalfa con alcohol etílico". *Rev. Mex. Ing.* (1976) (en prensa).
5. Laidler K., J.: *Chemical Kinetics*. Editorial McGraw Hill, pág. 4 (1965).
6. Levenspiel, O.: *Ingeniería de las reacciones químicas*. Editorial Reverté; pág. 393 (1974).
7. Ciurlizza G., A. y García D., M. L.: "Aplicación de un modelo cinético autocatalítico a la evolución de los azúcares solubles en el plátano". *Rev. Tecnol. Alim.* (Méx.) 11, 14, (1976).
8. Ciurlizza G., A. y Ríos M., J. J.: "Cinética de evolución del contenido de amoníaco en la presentación de suspensiones de ajo". *Rev. Tecnol. Alim.* (Méx.) 11, 54 (1976).

9. Laidler K., J.: *Cinética de las reacciones químicas*. Editorial Alhambra, pág. 210 (1971).
10. Ciurlizza G., A. y Ruiz, C., L.: "Cinética de evolución del color de alcohol etílico en presencia de vaina de vainillina". *Rev. Technol. Alim. (Méx.)* 12, 65, (1977).
11. Ciurlizza G., A. y Román J., D.: "Cinética de evolución de color de licores resultantes de la extracción acuosa de pulpa de aguacate". *Rev. Technol. Alim. (Méx.)* 9, 225, (1976).