

10
2 g.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“ NIXTAMALIZACION DE MAIZ (Zea mays L.) EN UN
SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO SOLIDO-LIQUIDO “**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN ALIMENTOS**

P R E S E N T A

GABRIEL REYES VAZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS M. C. GRACIELA RODRIGUEZ LUNA

MEXICO, D. F.

1989

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

OCT. 30 1989



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

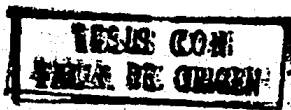
DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	pág.
Introducción	1
Objetivos	3
I. Generalidades	
1.1 Generalidades sobre la nixtamalización	4
1.2 Métodos alternativos de cocción	9
1.3 Generalidades sobre la fluidización	14
II. Antecedentes	
2.1 Antecedentes técnicos	23
2.2 Modelo de Centro y Coraza	25
III. Metodología Experimental	
3.1 Materia Prima	31
3.2 Equipo	31
3.3 Procedimiento Experimental	33
3.4 Determinaciones	35
IV. Resultados y Discusión	
4.1 Comportamiento Hidrodinámico	38
4.2 Reacción de Difusión de Agua y Reacción de Gelatinización	45
Conclusiones	65
Bibliografía	67
Apéndice I. Ejemplo de cálculo de la expansión del lecho	70
Apéndice II. Cálculo de los coeficientes de reacción química K_r , y transferencia de masa K_m	71
Apéndice III. Listado del programa Runge-Kutta	73
Apéndice IV. Listado del programa de regresión lineal múltiple	74



INTRODUCCION

Por siglos el maíz ha sido un alimento básico en México y las tortillas la principal forma de consumo. La masa con la cual se hacen las tortillas, se prepara usando un método tradicional de cocción llamado nixtamalización (derivado del náhuatl Nextli: cenizas de cal y tamalli: masa de maíz) (6).

En la actualidad, el proceso a nivel industrial ha modificado empíricamente el proceso tradicional, al reducir los periodos de cocción y reposo y aumentar las relaciones agua:grano y cal:grano, esto con el fin de minimizar costos. Es por esto que resulta de gran importancia los estudios que se han realizado tendientes a explicar los cambios que existen durante la nixtamalización, ya que al conocer estos cambios se pueden hacer modificaciones sobre una base científica para tratar de aumentar la productividad del proceso, mejorar los atributos de calidad del producto, minimizar y/o utilizar los subproductos.

Así este trabajo, intenta en su desarrollo plantear una alternativa tecnológica para la nixtamalización de maíz mediante el empleo de un sistema de lecho fluidizado sólido-líquido. Se espera que al favorecer los fenómenos de transferencia de masa y calor el tiempo de proceso se reduzca considerablemente. Para tal fin, se instaló una unidad experimental disponible, la cual fue operada de manera intermitente, isotéricamente y con una solución de hidróxido de calcio al 1%.

En primer término se hizo la caracterización hidrodinámica del grano de maíz en un sistema sólido-líquido. Posteriormente se

analizó el efecto que tienen las variables de operación, gasto volumétrico y temperatura, en las cinéticas de gelatinización del almidón y difusión de agua durante el proceso de nixtamalización.

El análisis de las cinéticas se realizó mediante el modelo de centro y coraza, con base en los resultados obtenidos, se establecen las conclusiones sobre las ventajas de emplear un sistema de lecho fluidizado.

OBJETIVO GENERAL.

Estudiar la cinética de nixtamalización del maíz en un sistema de lecho fluidizado sólido-líquido para plantear la posibilidad de utilizarlo como un método alternativo.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- i. Determinar el comportamiento hidrodinámico del grano de maíz en un sistema de lecho fluidizado sólido-líquido, para diferentes tipos de grano crudo, así como una porción de grano cocido.

- ii. Determinar la influencia de las variables de operación sobre la cinética de nixtamalización del grano de maíz.

I. GENERALIDADES

1.1 GENERALIDADES SOBRE LA NIXTAMALIZACION

Desde tiempos precolombinos, el desarrollo de México ha estado ligado con el cultivo y consumo del maíz, siendo éste cereal básico en la alimentación de los mexicanos.

El maíz, Fig. 1.1, es un cereal con un bajo contenido de proteínas y no tiene los aminoácidos esenciales para el consumo humano (29).

Específicamente, es deficiente en los aminoácidos lisina y triptofano, así como en niacina, que es la vitamina que previene la pelagra y se sintetiza a partir del triptofano (35).

El tratamiento térmico-alkalino del maíz conocido como nixtamalización, es una técnica prehispánica de lixiviación empleada para cocer el grano de maíz. El grano tratado y solidado se transforma en masa para ser consumido en diferentes alimentos tradicionales: tortillas, tamales, atoles, etc. Este tratamiento fue tan importante que se ha considerado ser el diferenciador de las sociedades indígenas, así como haber influido en su respectivo desarrollo (17).

El proceso de nixtamalización ofrece las siguientes ventajas :

1. Desnaturalización de las proteínas del maíz, particularmente de las glutelinas, lo que las hace más digeribles (25).
2. El tratamiento con cal acrecienta la disponibilidad biológica de la lisina y el triptofano; dado que la

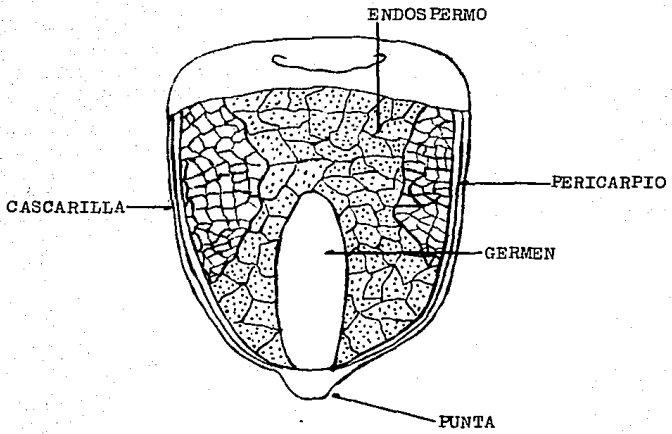


Fig. 1.1 Diagrama de un grano de maíz.(19)

- mayor parte de estos dos aminoácidos esenciales está contenida en la fracción de glutelinas (35).
3. La niacina, que se encuentra formando un compuesto polipeptídico (niacitina) en el maíz, compuesto que la hace biológicamente indisponible, se libera de dicho polipéptido por hidrólisis alcalina. Además se aumenta la disponibilidad del triptofano y consecuentemente, los consumidores de la tortilla tendrán un mayor aporte indirecto de esta vitamina (35).
 4. Se obtiene un alimento más digerible por la pérdida de fibra cruda ya que a pH alcalino (12.4) se hidrolizan las hemicelulosas del pericarpio (35).
 5. El contenido de calcio en el grano nixtamalizado aumenta aproximadamente 4.5 veces con respecto al grano no tratado (640 y 140 mg/Kg, respectivamente). Esto suple más del 50% de las necesidades nutricionales de calcio que van de 800-1200 mg/día dependiendo de la edad, sexo, peso y estatura del individuo (35).
 6. La presencia de algunas sales disminuyen la temperatura a la cual se inicia la gelatinización y la proporción en que se realiza la misma (28). El almidón de maíz se gelatiniza en presencia de iones calcio en medio alcalino a temperatura ambiente; estos cambios determinan las principales propiedades mecánicas de la masa del maíz nixtamalizado (35).
 7. Durante la cocción y el reposo del maíz tienen lugar

cambios físicos y químicos en el grano. Los cambios físicos facilitan la molienda ya que los granos suaves permiten que los molinos de atrición consuman menos energía. Los cambios químicos; tales como la gelatinización parcial de los almidones del endospermo y la desnaturalización de las proteínas del germen y del endospermo, resultan en una masa fácil de manejar (16).

En la figura 1.2 se muestra un diagrama esquemático del proceso tradicional de nixtamalización. Este proceso consiste en mezclar el maíz con agua en una relación de 3:1, se agrega cal para obtener una concentración que varía entre 1 y 2 % (19).

La mezcla se calienta hasta ebullición, esta etapa de cocimiento del grano se prolonga durante 20 a 45 minutos. Posteriormente, el grano se deja reposar, aproximadamente de 16 a 20 horas.

Al finalizar el reposo, el pericarpio se encuentra parcialmente hidrolizado y el endospermo está hinchado y suave.

Cuando el nixtamal o grano cocido presenta estas características, se puede separar del nexayote o aguas de cocción de la operación, mediante decantación y lavados. El nixcomil o maíz lavado se muele para transformarlo en masa.

El proceso de nixtamalización, tal como se lleva a cabo es altamente variable. Las variaciones son determinadas por factores geográficos y socioeconómicos, por ejemplo, el tipo de maíz, proporción agua:grano, concentración de cal, tiempo de cocción. A

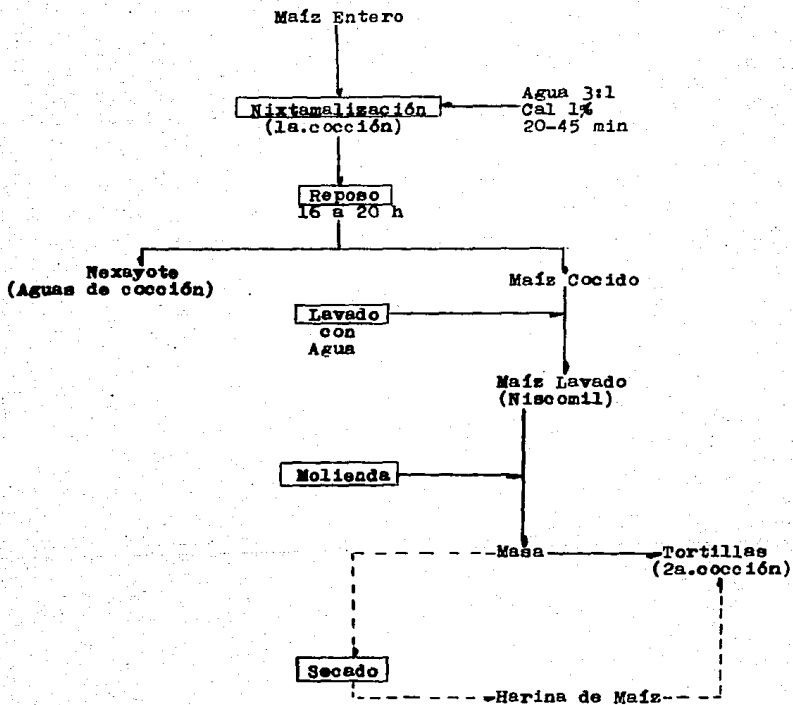


Figura 1.2 Diagrama esquemático del proceso tradicional de Nixtamalización (1a).

su vez la variedad de maíz usado esta en función de la localización geográfica, precio y disponibilidad del grano (22).

1.2. METODOS ALTERNATIVOS DE COCCION

1.2.1. Extrusión.

Como una alternativa al cocimiento tradicional del grano de maíz, se ha planteado el proceso de extrusión. La extrusión es una operación definida como el acto de texturizar o cocer un material al forzarlo a través de una boquilla o dado (4).

Actualmente la extrusión ha adquirido un puesto relevante entre las operaciones unitarias usadas en la industria de alimentos, aunque todavía encaminada, de manera sustancial, más hacia la texturización que hacia la cocción como tal (13).

En el caso del maíz, se ha pensado en esta operación como una alternativa al proceso de nixtamalización.

La figura 2.1 esquematiza el proceso de extrusión. Las ventajas que presenta este proceso sobre el método tradicional son:

1. Ahorros considerables, hasta de un 75%, en el consumo de agua (13).
2. Disminución del tiempo de proceso, aproximadamente a una quinta parte del tradicional (13).
3. Ausencia de agua de desecho.
4. Posible mejoramiento de la calidad nutritiva del producto ya que no hay pérdidas de nutrimentos solubles en el agua de desecho y se tiene un tiempo corto de

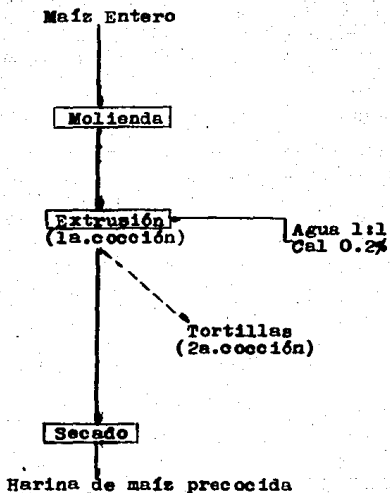


Figura 2.1 Diagrama esquemático del proceso de extrusión para el maíz (5).

residencia en el extrusor.

Dentro de las desventajas se encuentran:

1. Introducción de una nueva tecnología, lo cual no se logra fácilmente.
2. No se ha comprobado que haya ahorros sustanciales en los costos de energía.

Así pues, el objetivo de esta operación es el de cocer el maíz y producir una harina que tenga una vida de anaquel de seis meses a un año, comparada con la de la masa que es de unos cuantos días (4), y que presente las mismas propiedades al ser rehidratada, que la masa obtenida por el proceso tradicional de cocción alcalina.

De esta forma, en vez de almacenar grano crudo se almacenaría una harina precocida con un contenido de humedad no mayor de 5% que estaría lista para ser usada, evitando así las pérdidas que se producen durante el almacenamiento del maíz, debido al desarrollo de microorganismos y al ataque de insectos, roedores y aves.

Los extrusores, han tenido su principal aplicación en el campo de los productos alimenticios del tipo instantáneo que requieren condiciones de operación de alta temperatura y baja humedad.

Los experimentos realizados (13,14,31) ofrecen amplias perspectivas para la producción de harinas precocidas de cereales que puedan ser utilizadas en la elaboración de productos tradicionales.

1.2.2. Secado con tambores.

La nixtamalización a nivel industrial ha sido una adaptación del método tradicional casero. La tecnología actual involucra dos operaciones que requieren de un elevado consumo de energía, el cocimiento del maíz y la deshidratación de la masa de maíz cocido. Estas operaciones son responsables, en gran proporción, de los costos de procesamiento (12).

Molina et al. (24), realizaron estudios con el fin de determinar la factibilidad de preparar una harina instantánea adecuada para la elaboración de tortillas a través de la aplicación de una nueva tecnología que permitiera disminuir los costos de producción. El proceso propuesto como alternativa es mediante un secador de tambor.

Como resultado, trabajando a las condiciones descritas en el diagrama de la figura 2.2., se obtiene una harina instantánea para la elaboración de tortillas con características fisicoquímicas (viscosidad, absorción de agua) y organolépticas (sabor, olor, color) idénticas a aquellas muestras preparadas como referencia. En contraste, muestras comerciales de un producto similar resultan ser diferentes tanto fisicoquímica como organolépticamente del estándar y del producto obtenido con el secador de tambor.

Existe una diferencia en costos entre el nuevo proceso y el tradicional, la cual es atribuida a un ahorro de energía obtenido en el nuevo método. Económicamente, este nuevo proceso indica que puede ser factible.

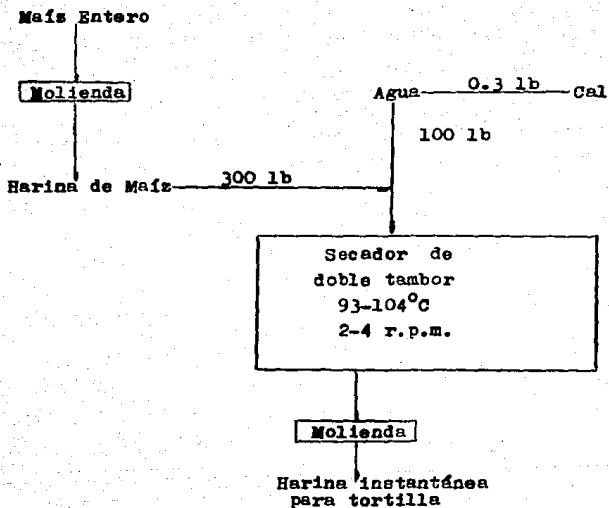


Figura 2.2 Diagrama esquemático del proceso para producción de harina instantánea para la elaboración de tortilla (24).

1.3. GENERALIDADES SOBRE LA FLUIDIZACION

La técnica de fluidización gas-sólido fué utilizada en forma industrial, inicialmente, en el proceso de Winkler para la gasificación del carbón a principios de los años treinta, pero por varias razones el proceso no tuvo amplia difusión, y no fué sino hasta el inicio de la II Guerra Mundial, cuando un grupo de compañías, el cual incluía a la "Standard Oil", "M.W.Kellog", "Shell" y "Universal Oil Products", las que en un esfuerzo destinado a explotar en forma primaria la manufactura de la gasolina por el método de Ruptura Catalítica, descubierto por el ingeniero francés Eugene Haudry, desarrollaron un proceso de fluidización de sólidos pero sin utilizar los reactores de Base Fija del diseño original (20). Este nuevo proceso ha servido de base para todas las investigaciones posteriores en este campo.

La Ruptura Catalítica Fluidizada, es un proceso que tuvo un éxito espectacular como innovación de ingeniería, inclusive hoy en día es una de las piedras angulares en la técnica de la refinación de petróleo.

Siguiendo tal ejemplo, se pusieron en operación comercial un gran número de procesos utilizando la fluidización de sólidos, tales como: La Producción de Ácido nicotínico, la Halogenación de hidrocarburos, la Producción de aminas aromáticas, el Secado de cereales y otros más (11). Y aunque algunos tuvieron éxito, otros no cumplieron totalmente los requisitos de su diseño; ello vino a aclarar que este es un

proceso que no puede ser aplicado indiscriminadamente con todos los materiales, ya que existen características que deben ser consideradas, tales como: la química de las reacciones, las propiedades de los sólidos o los patrones de comportamiento en el contacto fluido-sólido; y cuando no fueron consideradas, se provocaron fallas en algunas plantas y éste método adquirió fama de ser poco confiable. El lecho fluidizado es uno de los muchos métodos empleados en la industria para provocar reacciones.

En el proceso de fluidización cuando un fluido pasa a través de un lecho de partículas sólidas, es común encontrar situaciones generales de comportamiento de las partículas, dependiendo de condiciones como : la velocidad del fluido, la geometría del lecho y la geometría y características de las partículas sólidas (8,10,18,23). En la figura 3.1 se ilustran los estados hidrodinámicos de la fluidización. A bajas velocidades del fluido, el paso del mismo a través de los sólidos causa una caída de presión relativamente baja. Las partículas esencialmente permanecen sin ser perturbadas y el fluido pasa sólo a través de los espacios vacíos que dejan los sólidos en el lecho. Este comportamiento en los sólidos es conocido como lecho fijo.

Cuando las fuerzas de fricción entre las partículas y el fluido balancean el peso boyante de las mismas, éstas serán suspendidas en la corriente del fluido, sufriendo el lecho un ligero proceso expansión, se dice entonces que el sistema se encuentra en condiciones de mínima fluidización.

En estado de fluidización, se presentan dos tipos: la "particulada" y la "agregativa" (8,10,18,23). En el primer tipo,

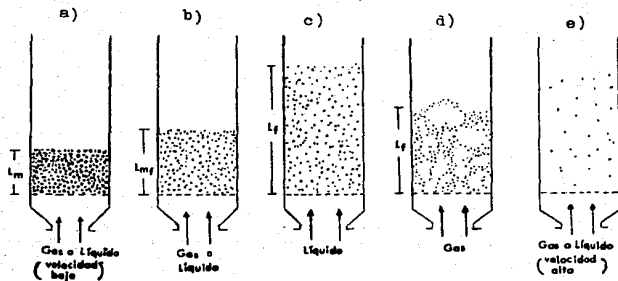


Fig.3.1. Estados hidrodinámicos de la fluidización (18).

- a) Lecho fijo; b) Fluidización incipiente o mínima; c) Fluidización particulada o uniforme; d) Fluidización colectiva o burbujeante; e) Fluidización con transporte neumático.

el lecho se expande de manera uniforme y generalmente se presenta en sistemas sólido-líquido. En el segundo tipo el exceso de fluido pasará a través del lecho en forma de burbujas originando un sistema de dos fases, éste se presenta la mayoría de las ocasiones en los sistemas gas-sólido. En ambos tipos de fluidización los componentes del lecho son libres para moverse en todas direcciones, en movimientos al azar.

Ambos sistemas se comportarán como un todo, esto significa que tomarán la forma de su contenedor y adquirirán la habilidad para fluir como si fueran un líquido (18).

A mayores velocidades del fluido, el lecho forma una fase diluida de sólidos suspendidos en el fluido, situación que es conocida como transporte neumático.

Las situaciones antes mencionadas permiten que existan condiciones que favorecen la velocidad de transferencia de masa entre los sólidos y el fluido (8,10,18,23), ya que la presencia de las partículas disminuye la sección transversal, incrementándose la velocidad intersticial del fluido. Así mismo los sólidos actuarán como promotores de la turbulencia y mantendrán libre su superficie para la reacción.

1.3.1. Efecto de la velocidad o del gasto volumétrico del fluido en el gradiente de presión.

Si se grafica el gradiente de presión (ΔP) contra la velocidad (U_0) o el gasto volumétrico (Q_0) usando coordenadas

logarítmicas como en la figura 3.2., en la que se representa un sistema ideal, se obtiene una relación lineal, en donde la expansión del lecho tiene lugar, pero conforme ocurre ésta, la pendiente de la curva va disminuyendo gradualmente.

Cuando se alcanza la velocidad de mínima fluidización (U_{mf}) o el gasto volumétrico de mínima fluidización (Q_{mf}), la caída de presión (ΔP) permanece constante, y la velocidad terminal, es aquella con la que se inicia el transporte neumático.

Cuando el flujo del fluido es reducido progresivamente, en el punto de incipiente fluidización la caída de presión permanece constante. La reducción del flujo es acompañado por una disminución progresiva en la caída de presión, y la curva P-flujo de fluido generalmente será más baja que la obtenida cuando el flujo era incrementado, esto es por que en ausencia de vibración, los espacios vacíos del lecho permanecen aproximadamente en el valor mf , que corresponde a la fracción de espacios vacíos en el punto de mínima fluidización.

Para propósitos prácticos, la velocidad o el gasto volumétrico de mínima fluidización, es definida como el punto de intersección de las líneas de caída de presión, de los regímenes fijo y fluidizado, determinado preferiblemente con el flujo disminuyendo (10), como se muestra en la figura 3.2.

La forma de estas curvas proporcionan una considerable información acerca de la estructura del lecho.

En muy pocas ocasiones se obtiene un comportamiento ideal del lecho y algunas de las desviaciones que pueden presentarse

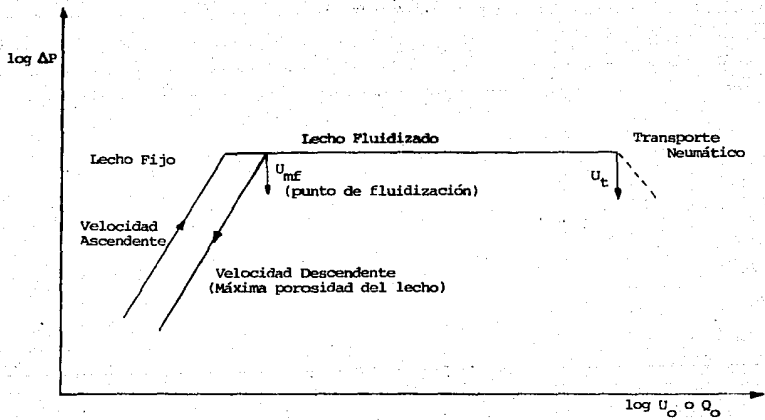


Fig.3.2. Caída de presión en sólidos fluidizados

son (10):

- a) Conforme el flujo del fluido se aproxima a las condiciones de mínima fluidización, parte del lecho puede sufrir una expansión, antes de que la caída de presión haya alcanzado el peso boyante por unidad de área del lecho. Este efecto será más marcado cuando el lecho está muy consolidado. En suma las variaciones locales en la permeabilidad de un lecho espacado tienden a causar una transición gradual, más que repentina, entre las dos secciones de la curva.
- b) Cuando las fuerzas friccionales son ejercidas por las paredes del recipiente del lecho, por la tendencia de las partículas a unirse una con otra, resultan caídas de presión que exceden el valor calculado y la curva pasará por un punto de máxima caída de presión exhibiendo una joroba característica.
- c) Puede haber una no uniformidad de la estructura del lecho, resultando un flujo preferencial en determinadas áreas originando que existan regiones de lecho fijo y lecho fluidizado. El lecho puede parecer bien fluidizado, pero parte de su peso puede ser soportado por el plato distribuidor, resultando con esto que la caída de presión sea menor al valor esperado.
- d) Si el distribuidor en la base del lecho no proporciona distribución uniforme del fluido, puede haber

formación de canales, con lo cual una alta proporción del fluido pasará a través de estos y el resto del lecho permanecerá sin fluidizar.

- e) Cuando el flujo del fluido es reducido en forma gradual, por debajo del de mínima fluidización, el lecho podría no permanecer en la fracción de espacios vacíos que corresponden en el punto de incipiente fluidización, debido a los efectos de vibración.

1.3.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL LECHO FLUIDIZADO.

La fluidización para operaciones industriales presenta las siguientes ventajas y desventajas (18):

Ventajas:

1. El flujo uniforme de las partículas permite controlar automáticamente las operaciones con facilidad de manejo.
2. El rápido mezclado de los sólidos lo lleva a condiciones casi isotérmicas a lo largo del equipo, de aquí que la operación pueda ser controlada con simpleza y seguridad.
3. La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible el transporte de vastas cantidades de calor producidos en grandes equipos.
4. Es adecuada para operaciones a gran escala.

5. Las velocidades de transferencia de calor y masa entre el fluido y las partículas son altas comparadas con otros métodos de contacto (8,10,23).
6. La velocidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inserto es alta, de aquí que los intercambiadores de calor dentro de lechos fluidizados requieren pequeñas superficies.

Desventajas:

1. El rápido mezclado de los sólidos en el lecho lleva a tiempos de residencia diferentes para los sólidos en reactor. Para tratamiento continuo de sólidos esto da un producto no uniforme y con bajas conversiones, especialmente en procesos donde es necesario niveles de alta conversión. De otra manera, para tratamientos de sólidos por etapas, este mezclado es muy útil ya que da un producto sólido uniforme.
2. La erosión de tuberías y tanques, debida a la abrasión, puede ser considerable.
3. Para operaciones no catalíticas de alta temperatura la aglomeración y la incrustación de partículas finas puede hacer necesario la disminución de la temperatura de operación, reduciéndose considerablemente la velocidad de reacción.

A pesar de sus desventajas, las ventajas generales de economía han sido responsables del éxito y uso del lecho fluidizado en operaciones industriales.

II. ANTECEDENTES

2.1. ANTECEDENTES TECNICOS

Con respecto al lecho fluidizado, sistemas sólido-líquido, cabe destacar que la mayoría de la información, así como las investigaciones en el terreno de la tecnología de alimentos, se ha hecho para sistemas gas-sólido (3,15,26,27,34).

En cuanto a la nixtamalización, con el fin de definir condiciones de procesamiento que condujeran a la optimización del proceso tradicional Cabrera et al (7), realizaron estudios sobre la cinética de difusión de agua y grado de gelatinización durante el cocimiento del maíz a diferentes temperaturas y diferentes proporciones agua:grano, basándose en un modelo matemático que permite simular ambos fenómenos en función de la historia térmica del grano de maíz en el proceso.

La cinética de difusión de agua y gelatinización fué determinada usando la solución de Danckwerts (9) que involucra ambos fenómenos; difusión acuosa y reacción química en una partícula de modelo esférico.

Los resultados obtenidos por Cabrera et al (7), muestran que: la difusividad de la masa y la constante de reacción son dependientes de la temperatura; la relación agua:grano no afecta el fenómeno de absorción de agua y el grado de gelatinización en el intervalo de temperaturas bajo estudio (70-90°C) por lo cual el cocimiento del maíz puede llevarse a cabo usando una relación 2:1 ahorrando así energía y agua en el proceso. Estos autores

concluyeron, con base al análisis cinético realizado, que la cocción de maíz en agua es un proceso controlado por la velocidad de la reacción de gelatinización.

Herrera et al (16), con el propósito de estudiar el efecto de la concentración de cal sobre la cinéticas de difusión de agua y gelatinización, por una parte, y sobre la cinética de difusión de calcio por la otra, realizaron un estudio basado en el modelo de centro y coraza (33) que explica los cambios geométricos del grano de maíz debidos a la difusión de agua y el grado de gelatinización durante el proceso de nixtamalización.

Los resultados obtenidos muestran la influencia de la temperatura y la concentración de hidróxido de calcio en la cinética del proceso y se concluye que la velocidad de nixtamalización es controlada por la reacción química.

Por otra parte la velocidad del transporte interno de calcio se incrementa con el aumento en la concentración de cal en las aguas de cocción.

López y Segura Jauregui (21) también utilizan el modelo de centro y coraza para estudiar el efecto de la variedad de maíz en la cinética de nixtamalización, para lo cual utilizan dos variedades de maíz, "Amarillo americano" y "Palomo".

En dicho trabajo se concluye que la velocidad de nixtamalización es controlada fundamentalmente por la reacción química en el intervalo de temperaturas bajo estudio 60-90 °C. Al hacer una comparación entre las dos variedades, se aprecia una menor resistencia a la difusión en el maíz "Palomo" cuyo tamaño de partícula es mayor. Esta diferencia se atribuye a que a un

mismo tiempo de cocción el espesor de la coraza gelatinizada será mayor para el caso de una partícula de menor diámetro.

2.2. MODELO de CENTRO y CORAZA.

El modelo de centro y coraza (33) se ha propuesto para analizar la cinética de absorción de agua y reacción de gelatinización en el grano.

El modelo se basa en las siguientes suposiciones:

- a) El grano de maíz presenta una geometría esférica y durante el proceso de cocción aumenta de tamaño debido a difusión interna de agua.
- b) La gelatinización del almidón es una reacción irreversible de primer orden (32).

La figura II.2.1. esquematiza el modelo propuesto.

En estos términos, a lo largo del proceso será posible identificar un centro no cocido de radio r_c , y una concentración de humedad C , igual a la concentración inicial de humedad en el grano C_0 , y una coraza gelatinizada con una concentración de humedad en el equilibrio C_e .

El proceso continuará hasta que todo el grano haya sido cocido; esto es, hasta que se alcance el equilibrio.

La velocidad a la que tiene lugar el proceso de nixtamalización esta dada por:

$$R = - 4\pi r_c^2 \left(\frac{dr}{dt} \right) \rho \quad (2.2.1.)$$

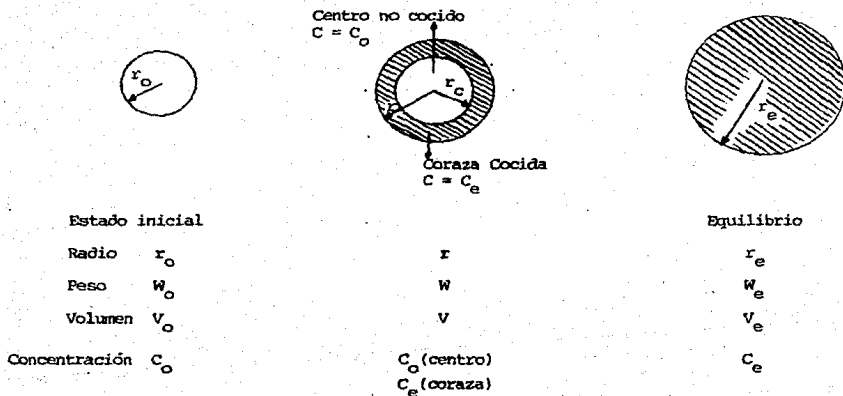


Fig.II.2.1. Esquema del Modelo de Centro y Coraza

donde:

$-\frac{dr_c}{dt}$ es la velocidad de disminución del centro no cocido

es la densidad del grano y está dada por
 $= (W_e - W_o) / V_o = \rho \text{ H}_2\text{O/cm}^3$
cant. de agua incorp. en el equilibrio
 $= \frac{\text{volumen inicial del grano}}$

R es la velocidad de absorción de agua
 $= \rho \text{ H}_2\text{O/min}$

Suposición: la concentración de agua en la capa cocida es C_o .

i) Control de la reacción de gelatinización.

Si la velocidad de cocimiento está limitada por la reacción de gelatinización del almidón del grano con el agua en la interfase, y el gradiente de la reacción es la diferencia de concentraciones a ambos lados de la interfase, R será:

Para una cinética de primer orden (33):

$$R = 4\pi r_c^2 K_r (C_e - C_o) = \frac{4\pi r_c^2 (C_e - C_o)}{1/K_r (r_c^2 / r^2)} \quad (2.2.2.)$$

De tal forma que:

$$-\frac{dr_c}{dt} = \frac{(r^2 / r_c^2) (C_e - C_o) \rho^{-1}}{1/K_r (r_c^2 / r^2)} \quad (2.2.3.)$$

donde K_r es la constante de reacción química = cm/min .

ii) Control de la difusión de agua.

Si la velocidad de cocimiento esta limitada por la velocidad de difusión de agua a través de la coraza gelatinizada y no tiene lugar la acumulación de agua en la capa gelatinizada, R tiene que ser formulada como una función de r_i y C :

$$R = 4\pi r_i^2 K_m \left(\frac{dC}{dr} \right) \quad (2.2.4.)$$

Donde:

r_i = la distancia de un punto arbitrario en la coraza al centro del grano.

C = la concentración de agua = g H₂O/cm.

K_m = el coeficiente de difusión de agua = cm²/min.

Integrando esta ecuación de r_c a r, y de C₀ a C, se tiene (33):

$$R = \frac{4\pi r(r-r_c)}{r-r_c} \cdot K_m (C_0 - C) = \frac{4\pi r^2 (C_0 - C_0)}{(r-r_c) / K_m (r_c / r)} \quad (2.2.5.)$$

Por tanto, de las ecuaciones (2.2.1.) y (2.2.5.)

$$- \frac{dr_c}{dt} = \frac{(r^2/r_c^2) (C_0 - C) \rho^{-1}}{(r-r_c) / K_m (r_c / r)} \quad (2.2.6.)$$

Si el centro no cocido no se hincha durante la cocción, r puede expresarse como:

$$r = \left[r_0^3 - \left\{ \left(\frac{r_0^3}{r_0^3} \right) - 1 \right\} r_c^3 \right]^{1/3} \quad (2.2.7.)$$

o bien en términos del radio del centro no cocido, r_c :

$$r_c = \left[\frac{\frac{r_0^3 - r^3}{r_0^3} - 1}{\frac{r_c^3}{r_0^3} - 1} \right]^{1/3} \quad (2.2.8.)$$

Así pues, K_r y K_m pueden despejarse de las ecuaciones (2.2.3.), (2.2.4.) y (2.2.7.):

$$K_r = \rho r_0 \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_0} \right) \right] / (C_0 - C_0) \theta \quad (2.2.9.)$$

$$K_m = \left[\frac{\left\{ r_0^2 r_0^3 - r_c^2 (r_0^3 - r_c^3) \right\} - r_0 \left\{ r_0^3 r_0^3 - r_c^3 (r_0^3 - r_c^3) \right\}}{2\theta (C_0 - C_0) (r_0^2 - r_c^2)} \right]^{2/3} \quad (2.2.10.)$$

iii) Control de la reacción de gelatinización y difusión de agua.

Como en el proceso de cocción, la reacción de gelatinización y la difusión de agua ocurren al mismo tiempo, la velocidad de cocimiento es función de ambos fenómenos. Por lo tanto, los coeficientes de transferencia de masa y reacción química deben ser calculados para determinar cual es el fenómeno que gobierna la velocidad del proceso. A partir de las ecuaciones

(2.2.3) y (2.2.6) tenemos que :

$$-\frac{dr_c}{dt} = \frac{(r^2 / r_c^2) (C_s - C_o) \rho^{-1}}{K_r (r_c^2 / r^2) + K_m (r_c / r)} \quad (2.2.11.)$$

Como lo señala esta ecuación, el cambio del radio esférico equivalente con el tiempo es directamente proporcional al gradiente de concentración en la interfase centro-coraza, e inversamente proporcional a la suma de resistencias a la reacción química de gelatinización y al transporte interno de agua.

III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Materia Prima

Para el presente trabajo se empleó una muestra suministrada por la CONASUPO, la cual consistió en una mezcla de maíces, blanco, amarillo y pinto (azul y rojo).

CONASUPO suministra a las tortilladoras tres diferentes tipos de mezcla (2), las cuales se identifican de la siguiente manera:

Mezcla 1 : El maíz amarillo no excede al 5% y el pinto al 2%.

Mezcla 2: El maíz amarillo excede al 5% y el pinto no excede al 2%.

Mezcla 3 : El maíz amarillo excede al 5% y el pinto excede al 2%.

La muestra con la cual se trabajó correspondía al tipo 2.

3.2 Equipo

Esta investigación se efectuó en el equipo experimental disponible que se esquematiza en la figura III.2.1. y a continuación se describe.

Consiste de una columna de acrílico transparente de 10 cm. de diámetro interno y una longitud de 87 cm. En su parte más baja cuenta con una sección, de vidrio, en forma de campana y en la parte superior un vertedero de acrílico. Para la etapa de nixtamalización, la columna se aisló con lana de vidrio para

1. Columna de Acrílico
2. Vertedero
3. Tanque encaquetado de acero inoxidable
4. Bomba centrífuga de acero inoxidable
5. Válvula de esfera
6. Válvula de diafragma
7. Rotámetro

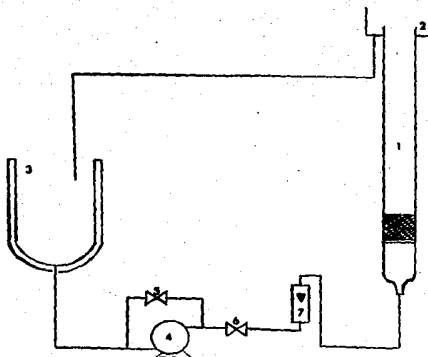


Fig. III.2.1. Esquema del equipo de lecho fluidizado para nixtamalizar maíz.

mantener condiciones isotérmicas de proceso.

En la base de la columna se tiene un plato distribuidor de malla de acero inoxidable que corresponde, en abertura, a la malla No. 10 de la serie de tamices Tyler.

Para calentar y almacenar la solución de hidróxido de calcio se utilizó un tanque enchaquetado de acero inoxidable con una capacidad de 80 litros.

La solución se hizo circular con ayuda de una bomba centrífuga de acero inoxidable de 3 H.P. . El gasto volumétrico se controló con un juego de valvulas, además de un rotámetro, el cual tenía una capacidad de 0-45 l/min, de la marca Fisher & Porter.

En la parte superior de la columna se colocó una malla de las mismas características del plato distribuidor, con el fin de atrapar los granos de maíz que pudieran ser arrastrados por el flujo, evitando así que pasaran al tanque, dañándose la bomba.

3.3 Procedimiento Experimental

3.3.1. Caracterización Hidrodinámica.

Durante esta etapa se hizo el estudio, en agua a temperatura ambiente, de la mezcla y de cada uno de sus componentes por separado, además de una muestra de maíz cocido, la cual fue cocida en ausencia de cal, dentro de una autoclave a una presión de 15 psig (1.057 Kg/cm²) durante 50 minutos.

Con objeto de medir la expansión del lecho, se acondicionó, a lo largo de la columna, una escala en centímetros. Para estas

determinaciones se varió el gasto volumétrico desde 2 l/min hasta 44 l/min, registrándose tanto la caída de presión ΔP en la columna, como la altura de expansión del lecho, para cada gasto de trabajo. Las corridas se hicieron en forma ascendente y descendente, manteniéndose constante la relación longitud del lecho de sólidos/diámetro de la columna (L/D) igual a uno.

3.3.2. Cinética de difusión de agua - Reacción de gelatinización durante la nixtamalización.

Durante esta etapa, en el sistema de lecho fluidizado se manejaron las variables de proceso, temperatura y gasto volumétrico. Se trabajó con tres temperaturas 70, 80 y 85 °C y tres gastos, el de mínima fluidización (20 l/min), uno que mantuviera el lecho fijo, estableciéndose arbitrariamente en 5 veces menor (4 l/min), el Qmf y otro en condiciones de franca fluidización, correspondiendo a 1.8 veces (36 l/min) el Qmf. Esto hace que se tenga un diseño experimental Factorial 3x3 de dos tratamientos a tres niveles, dando un total de 9 corridas por duplicado. En todas las corridas se trabajó únicamente con el maíz blanco y la concentración de hidróxido de calcio se mantuvo constante en 1%.

Para cada nivel de temperatura, se llevaron a cabo procesos control, es decir el sistema en reposo a temperatura constante. Para estos casos se prepararon doce muestras por corrida, en matraces Earlenmeyer de 250 ml. donde se colocaron 50 g. de maíz, 150 ml. de agua destilada (relación grano:agua 1:3) y

1.5 g. de hidróxido de calcio.

Los matraces tapados con algodón y papel aluminio, para evitar la evaporación excesiva del agua de cocción, fueron sumergidos en un baño de salmuera previamente calentado a la temperatura de trabajo.

El tiempo de proceso se tomó con base en los resultados reportados por Cabrera et al (7), donde se subraya la dependencia del grado de gelatinización con la temperatura. Para ambos casos el tiempo de proceso se fijó en 8 horas, muestreándose, las primeras cuatro horas cada 30 minutos y las subsecuentes, cada hora.

En todos los casos cuando los granos de maíz fueron retirados del sistema, se enfriaron y secaron ligeramente para remover el exceso de humedad presente en la superficie.

3.4. Determinaciones

3.4.1. Caída de Presión (ΔP)

La caída de presión a través de la columna se midió en un micromanómetro electrónico de carátula, marca Funes Control Limited, modelo MDC F C 001 con escala del 1% al 100% de 0 a 100 mm de H₂O.

La lectura de caída de presión real en la columna cargada fué corregida por la caída de presión de la columna vacía. La siguiente expresión nos permite conocer la caída real debida al lecho.

$$\Delta P_t = \Delta P_f + \Delta P_d = \text{mm H}_2\text{O}$$

donde:

ΔP_t = Caída de presión total

ΔP_f = Caída de presión real del lecho

ΔP_d = Caída de presión de la columna vacía

Se midió la ΔP_t y la ΔP_d y de esta manera se despejó la ΔP_f

3.4.2. Temperatura

La temperatura de la solución en la columna se midió con un termopar del tipo T (cobre-constantano) rígido, con una longitud de 1.25 m y 1/8 in de diámetro, con rango de -100 a 200 °C conectado a un indicador digital marca New Port.

3.4.3. Radio del grano de maíz.

El volumen aparente del grano se midió de la siguiente forma: En una probeta de 25 ml. se aforó con el maíz (empacando suavemente los granos) y con la ayuda de una bureta, se adicionó a la probeta un líquido de menor densidad que la semilla (petróleo) para llenar los espacios vacíos. El líquido se adicionó también hasta el aforo de la probeta y se tomó la lectura de la bureta. De tal manera que:

Volumen = aforo total de la probeta - aforo de la bureta

A partir de este valor se estimó el volumen ocupado por

cada grano de maíz. El radio equivalente fue calculado - suponiendo geometría esférica según el modelo de centro y coraza- en función de la expresión que evalúa el volumen de una esfera:

$$V = 4/3 \pi r^3$$

de donde:

$$r = \left(\frac{3}{4} \frac{V}{\pi} \right)^{1/3}$$

3.4.4. Contenido de Humedad

Para determinar el contenido de humedad de cada muestra se llevo a cabo la técnica 14.003 reportada en el AOAC (1).

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Comportamiento Hidrodinámico

Un criterio muy importante para saber de antemano si es posible mantener los granos antes y después del tratamiento térmico-alkalino en la región de lecho fluidizado, es el relacionado con las diferencias del gasto mínimo de fluidización de cada uno de los tipos de grano.

En las figuras de la 4.1.1. a la 4.1.5. se presentan los resultados experimentales de fluidización para Malz Blanco, Malz Amarillo, Malz Pinto, Mezcla de Malces y Malz Blanco Gelatinizado. La respuesta de la caída de presión ΔP , al flujo de líquido Q , permite definir las condiciones de operación a partir de las distintas zonas que se pueden tener en la fluidización: región de lecho fijo, punto de incipiente fluidización, región de fluidización y región de transporte neumático de sólidos. Un resumen de los datos experimentales es presentado en la tabla 4.1.1., donde se muestran los gastos mínimos de fluidización para los diferentes tipos de grano.

En las gráficas se puede apreciar que no tiene una marcada influencia el tipo de grano, en todos se presenta el mismo fenómeno; a gastos volumétricos menores a 20 l/min, ± 2 , se tiene una caída de presión baja, los sólidos no se mueven, esta correspondencia a la región de lecho fijo. Subsecuentes aumentos en el gasto volumétrico del fluido ocasionan que los sólidos se muevan hasta que se igualen la caída de presión con el peso por

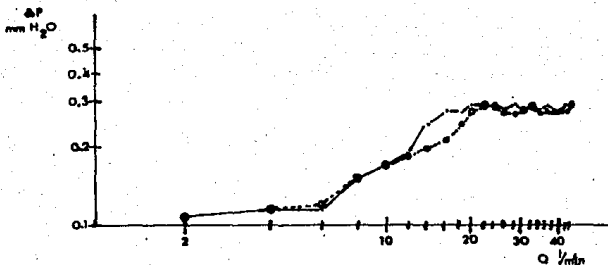


Fig. 4.1.1. Gráfica ΔP vs. Q para Maíz Blanco.

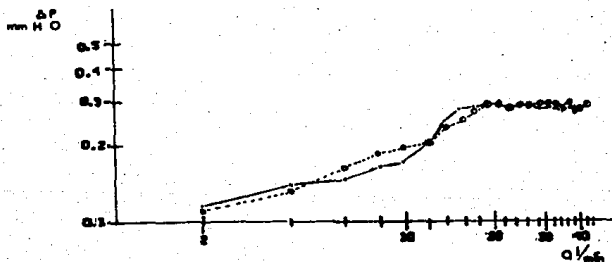


Fig. 4.1.2. Gráfica ΔP vs. Q para Maíz Amarillo.

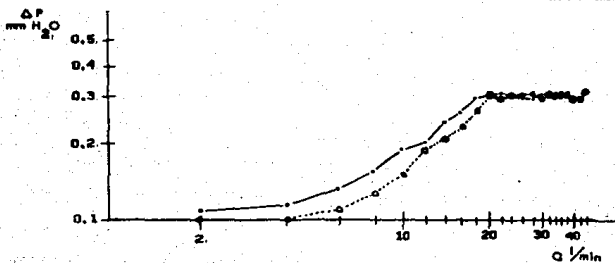


Fig. 4.1.3. Gráfica ΔP vs. Q para Maíz Pinto.

Ascendente . — ; Descendente o - - - -

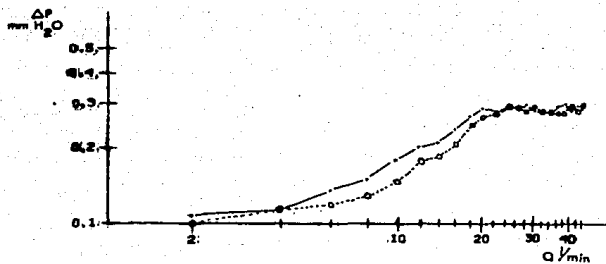


Fig. 4.1.4. Gráfica ΔP vs. Q para la Mezcla de Maíces.

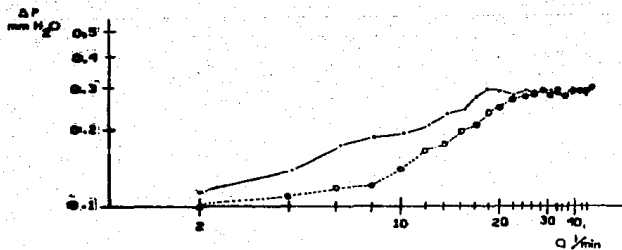


Fig. 4.1.5. Gráfica ΔP vs. Q para Maíz Blanco Gelatinizado.

Ascendente —●— ; Descendente ○- - -

unidad de área del lecho. Esta situación se presenta cuando $Q = 20$ l/min, ± 2 , y los sólidos se suspenden en el fluido encontrándose el Q_{mf} , gasto de mínima fluidización. A partir de este momento se continuó aumentando el gasto hasta 44 l/min y la ΔP se mantuvo constante, los sólidos se movían libremente manteniéndose suspendidos, encontrándose en la región de fluidización. Llega un momento en que conforme se aumenta el Q la P comenzará a disminuir, este será el valor correspondiente a la velocidad terminal, después de esto, los granos empezarán a ser transportados, encontrándose en la región de transporte neumático. Dicha situación no fué posible determinar ya que la capacidad del rotámetro era limitada (0-45 l/min).

Tipo de Maíz	Q_{mf} (l/min)
Bianco	20
Amarillo	18
Pinto	18
Mezcla de Maíces	22
Bianco Gelatinizado	26

Tabla 4.1.1. Gastos de mínima fluidización para los diferentes tipos de maíz.

En cuanto a la expansión del lecho, dentro del desarrollo del trabajo se observó que esta fué uniforme, sin que se tuvieran problemas de escalamientos, lo que facilitó la lectura de la altura alcanzada por el lecho en cada nivel de gasto volumétrico.

Davidson y Harrison (10) reportan que la manera más

conveniente de relacionar la variación del gasto volumétrico o velocidad de fluidización con la fracción de espacios vacíos (ϵ) es por medio de la siguiente expresión:

$$\epsilon / \epsilon_{mf} = (Q/Q_{mf})^n$$

donde:

- ϵ = fracción de espacios vacíos, en el apéndice I se indica el cálculo de .
- ϵ_{mf} = fracción de espacios vacíos en el punto de mínima fluidización
- Q = gasto volumétrico del fluido
- Q_{mf} = gasto volumétrico de mínima fluidización

donde al graficar ϵ / ϵ_{mf} contra Q/Q_{mf} la pendiente corresponde al valor de "n".

Las figuras de la 4.1.6. a la 4.1.10. corresponden a esta situación. Dichas gráficas nos permiten conocer la expansión en la zona de transición, entre lecho fijo y lecho fluidizado, es decir la altura que alcanzan las partículas fluidizadas y la fracción de espacios vacíos (ϵ) que se forman en el proceso de expansión. Para todos los casos se encontró un valor de "n" muy similar, aproximadamente de 0.30. Esta información es útil en el diseño de equipo, pues ayuda a determinar la altura de la columna (11). En la tabla 4.1.2. se presentan los resultados del análisis de regresión para obtener el valor de "n".

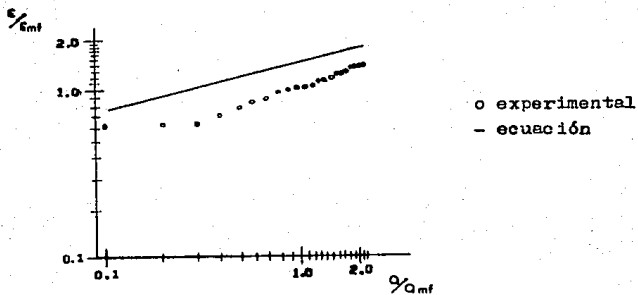


Fig. 4.1.6. Gráfica ϵ/ϵ_{mf} vs. Q/Q_{mf} para Maíz Blanco.

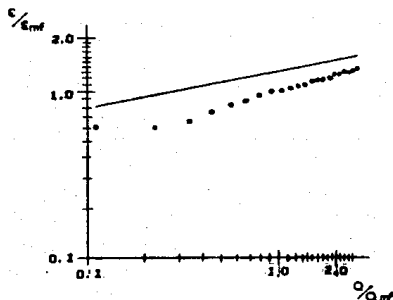


Fig. 4.1.7. Gráfica ϵ/ϵ_{mf} vs. Q/Q_{mf} para Maíz Amarillo.

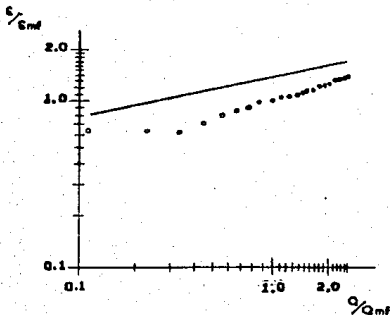


Fig. 4.1.8. Gráfica ϵ/ϵ_{mf} vs. Q/Q_{mf} para Maíz Pinto.

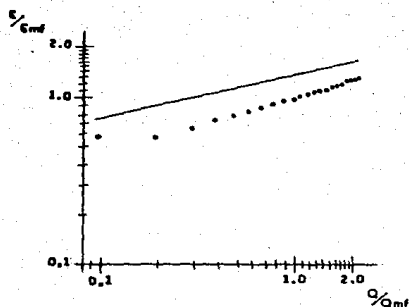


Fig. 4.1.9. Gráfica ϵ/ϵ_{mf} vs. Q/Q_{mf} para la Mezcla de Maíces.

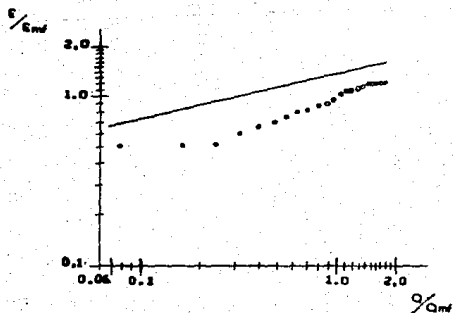


Fig. 4.1.10. Gráfica ϵ/ϵ_{mf} vs. Q/Q_{mf} para Maíz Blanco Gelatinizado.

Tipo de Maíz

	Blanco	Amarillo	Pinto	Mezcla de Malces	Blanco Gelatiniza.
n	0.296	0.313	0.297	0.292	0.33
b	1.0007	1.0214	1.011	1.018	0.9619
corr	0.98	0.96	0.97	0.98	0.96

b = ordenada al origen; corr = correlación del método de mínimos cuadrados

Tabla 4.1.2. Valores de "n" para los diferentes tipos de maíz.

4.2. Cinética de Difusión de Agua y Reacción de Gelatinización.

Previamente a la presentación de los resultados se hace mención de algunas observaciones hechas durante la experimentación de nixtamalización en la columna de lecho fluidizado:

- Transcurridos 50 minutos de proceso, los granos de maíz se encontraban totalmente descascarillados debido a la acción del paso del fluido y la atrición entre granos.
- A las temperaturas de 80 y 85 °C y gastos volumétricos de 20 y 36 l/min, aparte de descascarillarse, empezaban a sufrir daño en el pericarpio, esta situación fué notoria a los 60 o 70 minutos de haber iniciado el proceso. Esta anomalía fué en aumento hasta que se perdió el pericarpio quedando expuesto el endospermo. Hacia el final del proceso se había perdido parte del endospermo.

Esto condujo a que se disminuyera el tiempo de proceso.

El análisis de los fenómenos de absorción de agua y reacción de gelatinización con el tiempo, se realizó a partir del cambio del radio esférico equivalente del grano de maíz.

En las figuras 4.2.1. a la 4.2.3. se presentan las gráficas de los datos experimentales del radio esférico equivalente contra el contenido de humedad correspondientes a las diferentes condiciones de trabajo.

Mediante el análisis de regresión lineal, se encontró que la dependencia del radio esférico equivalente con respecto a la humedad es lineal. Un resumen de estos resultados se muestran en la tabla 4.2.1.

T=70°C	T=80°C	T=85°C
Q = 4 l/min r=0.3072+0.4088(%H) corr=0.92	Q = 4 l/min r=0.3517+0.3493(%H) corr=0.91	
Q = 20 l/min r=0.2175+0.6678(%H) corr=0.82	Q = 20 l/min r=0.2642+0.4902(%H) corr=0.95	Q = 20 l/min r=0.3424+0.2679(%H) corr=0.97
Q = 36 l/min r=0.1619+0.7583(%H) corr=0.90	Q = 36 l/min r=0.3667+0.1978(%H) corr=0.90	Q = 36 l/min r=0.3473+0.2479(%H) corr=0.97
Reposo r=0.3897+0.2209(%H) corr=0.93	Reposo r=0.3493+0.3231(%H) corr=0.93	Reposo r=0.3444+0.2866(%H) corr=0.98

En donde r es el radio esférico equivalente en cm y %H es el porcentaje de humedad del grano en base húmeda.

Tabla 4.2.1. Resultados del análisis de regresión lineal para la dependencia del radio esférico equivalente con respecto al contenido de humedad del grano a diferentes condiciones de proceso.

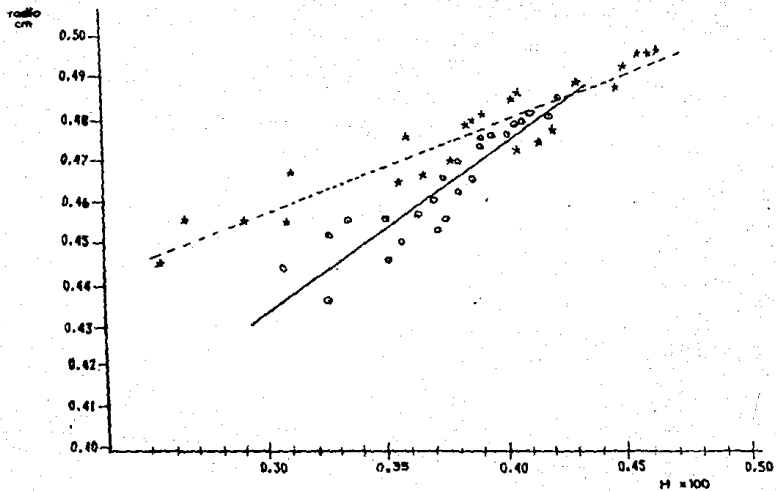


Fig. 4.2.1.a. Gráfica del radio esférico equivalente vs. el contenido de humedad, para maíz blanco, a la $T = 70^{\circ}\text{C}$, $Q = 4 \text{ l/min}$ o — ; Reposo * - - - -

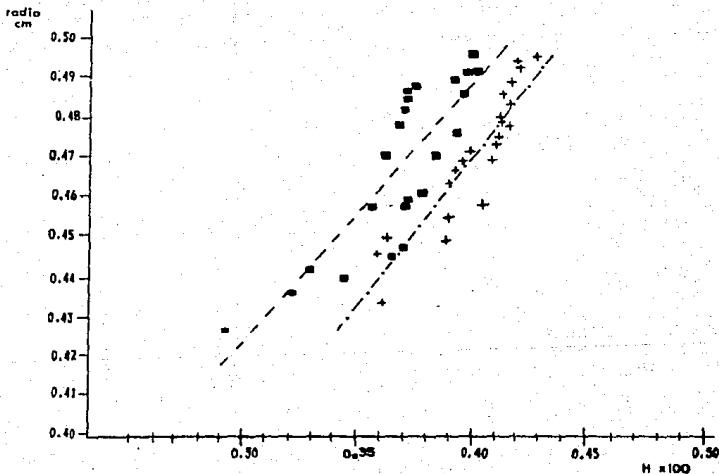


Fig. 4.2.1.b. Gráfica del radio esférico equivalente vs. el contenido de humedad, para maíz blanco, a la $T = 70^{\circ}\text{C}$, $Q = 20 \text{ l/min}$ — ; $Q = 36 \text{ l/min}$ + - - - -

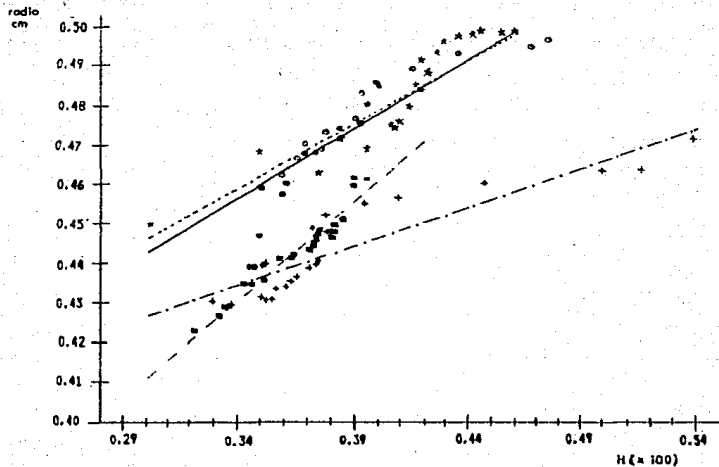


Fig. 4.2.2. Gráfica del radio esférico equivalente vs. el contenido de humedad, para maíz blanco, a la $T = 80^{\circ}\text{C}$, $Q = 4 \text{ l/min}$ o — ; $Q = 20 \text{ l/min}$ ■ --- ; $Q = 36 \text{ l/min}$ + -.-.- ; Reposo *

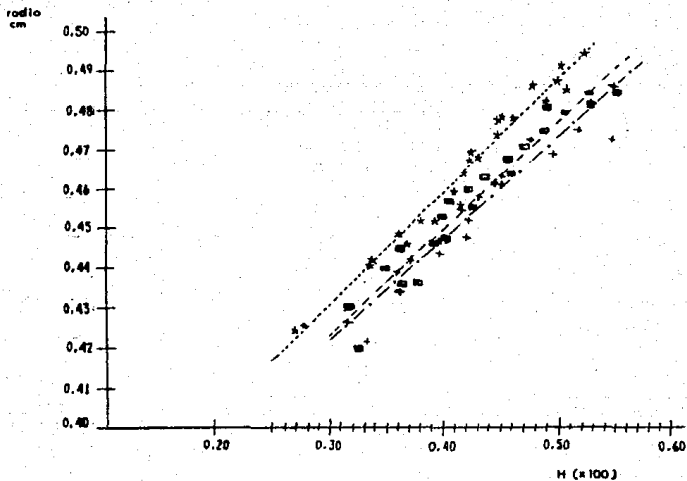


Fig. 4.2.3. Gráfica del radio esférico equivalente vs. el contenido de humedad, para maíz blanco, a la $T = 85^{\circ}\text{C}$, $Q = 20 \text{ l/min}$ ■ --- ; $Q = 36 \text{ l/min}$ + - - - : Reposo ★ - - - - .

Los resultados anteriores concuerdan con lo reportado por Herrera et al (16) y por López y Segurajauregui (21) ya que también encuentran que la dependencia del radio esférico equivalente con respecto a la humedad es lineal.

Como se aprecia en las gráficas, todas las curvas presentan un comportamiento similar, es decir, el radio esférico equivalente es directamente proporcional al contenido de humedad del grano.

Esto se atribuye a que conforme transcurre el tiempo de proceso, se dan las condiciones de humedad y temperatura propicias para que el almidón contenido en el maíz gelatinice, reteniendo agua y por lo tanto aumente su volumen.

Se puede observar que bajo la temperatura de proceso de 70 °C se presenta un aumento de humedad directamente proporcional al aumento del gasto volumétrico, tal situación se corrobora al comparar las pendientes de los modelos que predicen el cambio en el radio esférico equivalente con respecto a la humedad. (Tabla 4.2.1.)

En cuanto a las corridas efectuadas a 80°C se puede decir que para las condiciones de gasto volumétrico de 4,20 l/min y control o reposo, se tiene un comportamiento semejante al obtenido a 70°C. Para un gasto de 36 l/min se encontró que aún cuando se tuvo un aumento del contenido de humedad esperado, el radio no aumentó proporcionalmente, lo cual es atribuido a que bajo estas condiciones de proceso, el desgaste del grano fué muy severo, por lo que no se determinó el radio esférico equivalente real del grano.

Para los tratamientos a una temperatura de 85 C, no fué posible trabajar a un gasto volumétrico de 4 l/min, debido a que se presentaron problemas de cavitación en la bomba. Se encontró de manera general, que el desgaste sufrido por el grano a estas condiciones fué mucho más drástico que a las anteriores, por lo que se decidió disminuir el tiempo de proceso de 8 a 5 horas, aún con esta medida, continuo presentándose desgaste del grano a todos los gastos volumétricos, aunque menos severo que después de 8 horas de proceso. A esta temperatura de proceso no se encontró una marcada diferencia entre los diferentes gastos volumétricos, siendo la temperatura el parámetro determinante para la cinética de gelatinización y difusión.

Como apoyo a las afirmaciones anteriores, se efectuó un análisis de varianza, presentándose una diferencia altamente significativa en la humedad del grano con respecto a la temperatura de proceso. Para conocer el tipo de dependencia de la humedad con respecto a la temperatura se realizó la descomposición de la suma de cuadrados asociada a éste parámetro en su efecto lineal y cuadrático.

Por otro lado se encontró que no se tiene diferencia significativa con respecto al gasto, ni con la combinación de ambos. En cuanto al radio equivalente, los resultados arrojados muestran que ésta variable no es función de los parámetros temperatura y gasto volumétrico ni combinación de ambos.

Situación que reafirma las observaciones anteriores, en lo referente a que el radio equivalente esta siendo severamente afectado por un desgaste provocado por las condiciones de trabajo.

Para analizar la cinética de absorción de agua y reacción de gelatinización mediante el modelo de centro y coraza, fué necesario determinar la magnitud del radio esférico equivalente en equilibrio bajo las condiciones de temperatura y gasto volumétrico de estudio. Para ello se ajustó el modelo matemático de Langmuir (30) a los datos experimentales:

$$r = r_0 + \frac{At}{1 + \frac{A}{r_0 - r_0} t}$$

rearrreglando:

$$\frac{1}{r - r_0} = \frac{1}{r_0 - r_0} + \frac{1}{At}$$

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{b} + \frac{1}{mx}$$

donde:

r_0 = radio inicial

A = constante de la ecuación

r_0 = radio esférico equivalente en el equilibrio

t = tiempo

Las magnitudes del radio equivalente del grano de maíz en el equilibrio, así como el contenido de humedad correspondiente, al parecer no muestran una dependencia con respecto a la temperatura. Los valores de r_0 y %H_e estimados fueron la base para la evaluación de los parámetros del proceso así como para la simulación del mismo. Estos resultados se muestran en la tabla 4.2.2.

La magnitud de los coeficientes K_r y K_m fué estimada a

partir de las ecuaciones (2.2.9.) y (2.2.10.) que predicen el

Temperaturas °C			
g l/min	70	80	85
4	$r_e = 0.4866$	$r_e = 0.5011$	
	$\%H_e = 43.87$	$\%H_e = 46.56$	
20	$r_e = 0.4933$	$r_e = 0.4875$	$r_e = 0.5030$
	$\%H_e = 41.29$	$\%H_e = 45.54$	$\%H_e = 59.94$
36	$r_e = 0.5002$	$r_e = 0.4674$	$r_e = 0.4968$
	$\%H_e = 44.60$	$\%H_e = 50.89$	$\%H_e = 60.29$
Reposo	$r_e = 0.4967$	$r_e = 0.5072$	$r_e = 0.5054$
	$\%H_e = 48.43$	$\%H_e = 48.83$	$\%H_e = 56.17$

Tabla 4.2.2. Magnitudes del radio equivalente en equilibrio, en cm, y del contenido de humedad en equilibrio del grano de maíz a las diferentes condiciones de trabajo.

cambio del radio esférico equivalente con el tiempo cuando el proceso es controlado por la reacción química y la transferencia de masa, respectivamente. En el Apéndice II se indica el cálculo de estos coeficientes.

Una vez conocido el valor de estos coeficientes, la ecuación diferencial que contempla la presencia de ambos fenómenos (2.2.11.) fué resuelta mediante el método Runge-Kutta. Para éste propósito se desarrolló un programa de computación cuyo listado aparece en el Apéndice III.

En las figuras 4.2.4 a la 4.2.6 se grafican los radios experimentales promedio contra el tiempo de nixtamalización, a las distintas temperaturas y gastos volumétricos de trabajo. Las líneas continuas representan los radios teóricos obtenidos al resolver el modelo de centro y coraza propuesto.

Como se puede observar, dada la correlación entre el radio esférico equivalente con el contenido de humedad, se puede afirmar que el modelo propuesto predice satisfactoriamente los cambios físicos y químicos que tienen lugar durante el proceso de nixtamalización. (Tabla 4.2.1)

Los valores calculados para los coeficientes de transferencia de masa K_m y reacción química K_r se presentan en las tablas 4.2.3. y 4.2.4.

Q l/min	K_m (cm^2/min)		
	70 °C	80 °C	85 °C
4	3.204×10^{-4}	4.071×10^{-4}	
20	3.275×10^{-4}	4.304×10^{-4}	5.248×10^{-4}
36	3.123×10^{-4}	4.658×10^{-4}	6.540×10^{-4}
Reposo	3.389×10^{-4}	3.350×10^{-4}	4.103×10^{-4}

Tabla 4.2.3. Valores del coeficiente de transferencia de masa K_m , a diferentes condiciones de proceso.

Los resultados obtenidos subrayan la influencia que tiene tanto el gasto volumétrico como la temperatura. Apreciándose de manera un poco más clara en los valores de K_m , ya que al aumentar el gasto volumétrico y la temperatura los valores aumentan. Los

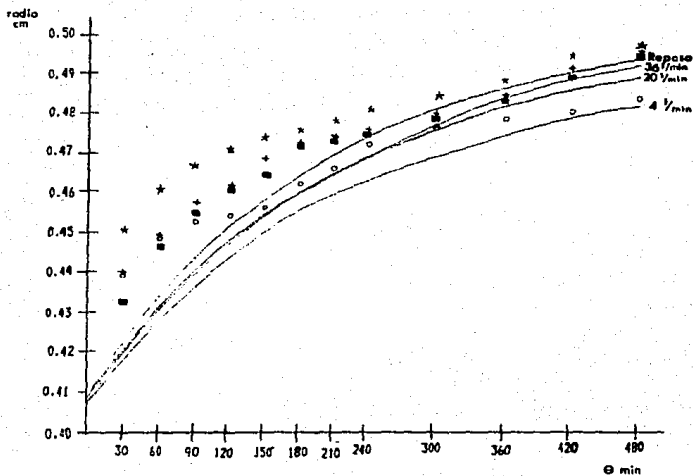


Fig. 4.2.4. Gráfica de los radios experimentales promedio vs. el tiempo de proceso, para maíz blanco, a la $T = 70^{\circ}\text{C}$ - $Q = 4 \text{ l/min}$ o ; $Q = 20 \text{ l/min}$; $Q = 36 \text{ l/min}$ + ; - Reposo *.

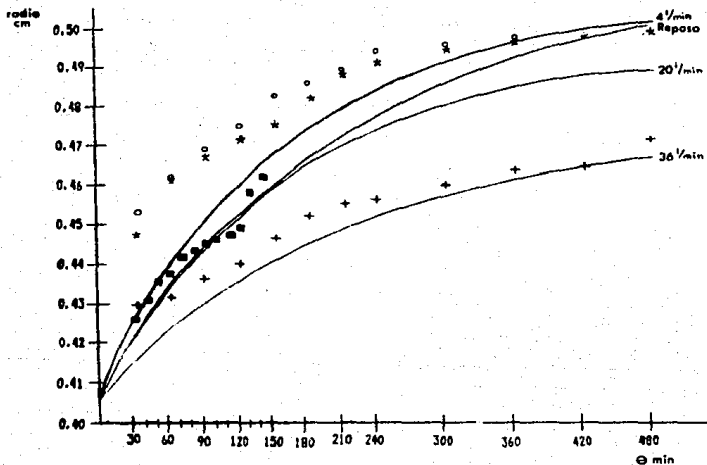


Fig. 4.2.5. Gráfica de los radios experimentales promedio vs. el tiempo de proceso, para maíz blanco, a la $T = 80^{\circ}\text{C}$ - $Q = 4 \text{ l/min}$ o ; $Q = 20 \text{ l/min}$; $Q = 36 \text{ l/min}$ + ; - Reposo * .

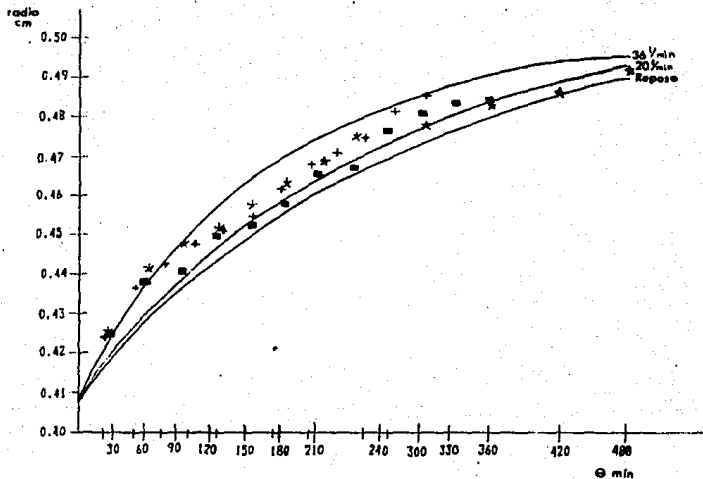


Fig. 4.2.6. Gráfica de los radios experimentales promedio vs. el tiempo de proceso, para maíz blanco, a la $T = 85^{\circ}\text{C}$ - $Q = 20$ l/min ; $Q = 36$ l/min + ; Reposo *.

valores de K_m y K_r en el sistema fluidizado son mayores que los del sistema en reposo, confirmando que el sistema de lecho fluidizado favorece la transferencia de masa y la reacción química (8,10,18,23).

G l/min	K _r (cm/min)		
	70 °C	80 °C	85 °C
4	1.252×10^{-3}	1.859×10^{-3}	
20	1.219×10^{-3}	1.569×10^{-3}	1.359×10^{-3}
36	1.142×10^{-3}	1.551×10^{-3}	1.737×10^{-3}
Reposo	1.616×10^{-3}	1.375×10^{-3}	1.156×10^{-3}

Tabla 4.2.4. Valores del coeficiente de reacción química K_r , a diferentes condiciones de proceso.

Esta evidencia experimental fue corroborada al ajustar la dependencia de los coeficientes de transferencia de masa y reacción química con la temperatura y el gasto volumétrico mediante la técnica de regresión lineal múltiple cuyo listado aparece en el Apéndice IV. Las ecuaciones resultantes fueron las siguientes:

$$K_r = -2.80 \times 10^{-2} - 2.389 \times 10^{-4} G + 1.442 \times 10^{-5} G^2 - 2.367 \times 10^{-7} G^3 + 7.602 \times 10^{-4} T - 4.76 \times 10^{-6} T^2 \quad (R = 0.95)$$

$$K_m = 8.05 \times 10^{-3} + 2.58 \times 10^{-4} G - 1.65 \times 10^{-5} G^2 + 2.76 \times 10^{-7} G^3 - 2.38 \times 10^{-4} T + 1.66 \times 10^{-6} T^2 \quad (R = 0.98)$$

La magnitud de las resistencias a los fenómenos que intervienen durante el proceso de nixtamalización, de la ecuación (2.2.11.) :

$$\text{reacción química : } R_1 = \frac{1}{(r_0^2 / r^2) K_r}$$

$$\text{transferencia de masa : } R_2 = \frac{r - r_c}{(r_c / r) K_m}$$

ilustrados en las figuras 4.2.7. a la 4.2.10.

Como se puede observar durante una parte del proceso predomina la resistencia a la transferencia de masa y posteriormente empieza a predominar la resistencia a la reacción de gelatinización, esto ocurre porque a medida que transcurre el tiempo se va formando una coraza gelatinizada que disminuye la facilidad de difusión de agua al interior del grano.

Por otra parte, en la mayoría de los casos, al aumentar la temperatura se observa un incremento en la resistencia de la reacción de gelatinización.

Estos resultados permiten concluir que al aumentar la temperatura, la velocidad de nixtamalización, será controlada por la reacción química.

Con respecto al gasto volumétrico no se aprecia una diferencia entre el de 20 y 36 l/min, no así con el de 4 l/min, en el que existe una marcada discrepancia, en cuanto a que pesar de haber aumentado la temperatura, no se presentó un aumento en la resistencia de la reacción de gelatinización lo cual es atribuido a que el sistema se encontraba en lecho fijo.

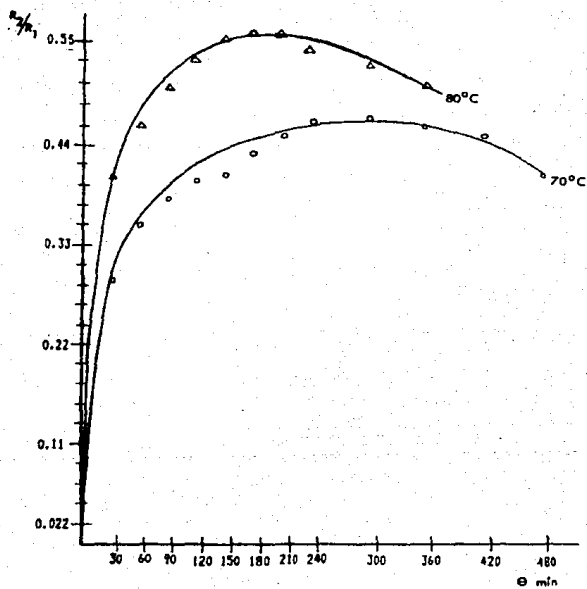


Fig. 4.2.7. Gráfica R_2/R_1 vs. tiempo de proceso. para maíz blanco, al $Q = 4$ l/min.

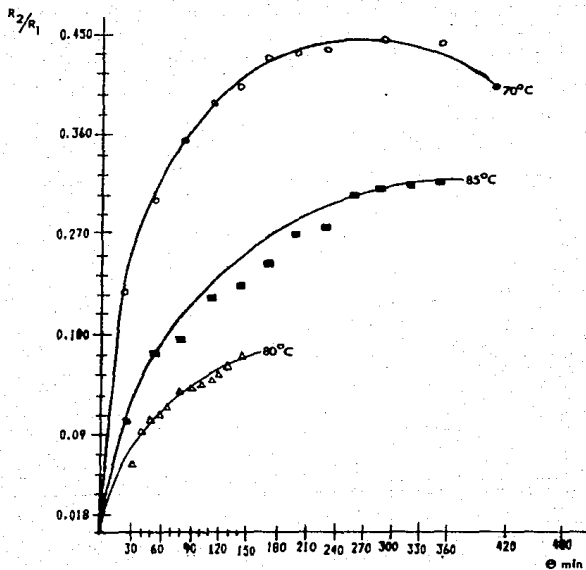


Fig. 4.2.8. Gráfica R_2/R_1 vs. tiempo de proceso, para maiz blanco, al $Q = 20$ l/min.

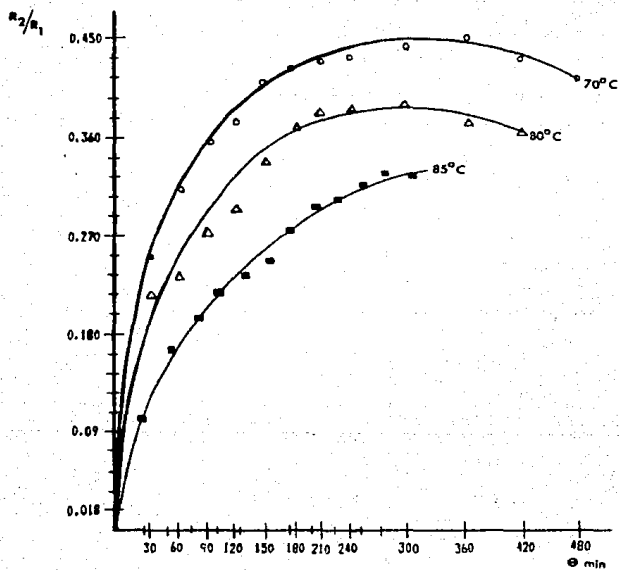


Fig. 4.2.9. Gráfica R_2/R_1 vs. tiempo de proceso. para maíz blanco, a $Q = 36$ l/min.

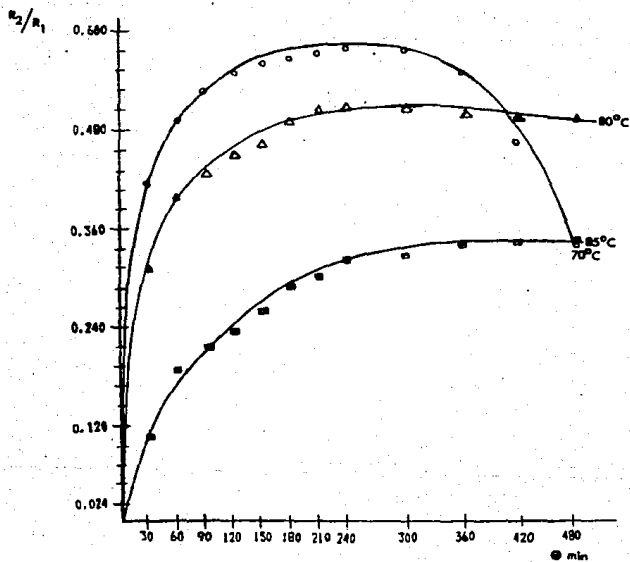


Fig. 4.2.10. Gráfica R_2/R_1 vs. tiempo de proceso, para maíz blanco, en condiciones de Reposo.

CONCLUSIONES

En base a que en el presente trabajo se plantea como alternativa para la nixtamalización de maíz, el empleo de un sistema de lecho fluidizado sólido-líquido se puede concluir que:

- El modelo de centro y coraza, propuesto, predice de manera satisfactoria los cambios que suceden durante la nixtamalización.
- Mediante la medición del radio esférico equivalente del grano de maíz a lo largo del proceso, es posible llevar a cabo el análisis de las cinéticas de transferencia de masa y reacción de gelatinización satisfactoriamente.
- En la nixtamalización, la reacción de gelatinización es directamente proporcional a la temperatura.
- El proceso de nixtamalización, para las condiciones de proceso, del presente trabajo, presentó dos etapas, la primera controlada por la resistencia a la transferencia masa y la segunda por la resistencia a la reacción de gelatinización.
- El empleo del lecho fluidizado en la nixtamalización, es alentador en cuanto a incrementar la productividad del proceso. Es posible eliminar del proceso tradicional la etapa de reposo, reduciendo el tiempo de proceso hasta una tercera parte del tradicional. También por el hecho de que los granos se descascarillen, ya que con esto, los molinos, para obtención de la masa, podrían tener un ahorro de energía.

Teniendo en cuenta que esta investigación puede y debe ser mejorada en diferentes aspectos y dada la experiencia vivida, se señalan a continuación algunos puntos que deben tomarse en cuenta para lograr resultados aún más satisfactorios.

- Trabajar a diferentes concentraciones de hidróxido de calcio y variar la L/D.
- Modificar el diseño del equipo, para hacerlo más funcional. Principalmente en la parte del rebosadero que es donde se presentaron más problemas. También diseñar un sistema para poder sacar el producto de la columna.
- Hacer el análisis fisicoquímico (viscosidad) del producto terminado para determinar de manera más precisa el tiempo de proceso.

B I B L I O G R A F I A

- 1) A.O.A.C. 1980. Official and Tentative Methods of Analytical Chemists. - Washington, D.C.
- 2) Arias, I. 1986. Laboratorios de Control de Calidad CONASUPO. México, D.F. Comunicación Personal.
- 3) Baxerres, J.L., Yow, Y.S. et Gilbert, H. 1982. Séchage de produits alimentaires en couche fluidisée. Informations Chimie No.228-229. Aout-Septembre, Toulouse.
- 4) Bazúa, C.D., Guerra, R., and Sterner, H. 1979. Extruded corn flour as an alternative to lime-heated corn flour for tortilla preparation. J. Food Sci. 44:940.
- 5) Bazúa, C.D. de y Guerra, R. 1980. Los Centros de Investigación y Educación Superior y el Desarrollo de Agroindustrias. Parte II. Nuevos productos agrícolas procesados. Tecnol. Alim. (Méx) 15(6):4.
- 6) Cabrera, L. Diccionario de Aztequismos. Ed. Oasis S.A. México, 1974.
- 7) Cabrera, E., Pineda, J.C., Durán de Bazúa, C., Segurajauregui, J.S. y Vernon, E.J. 1984. Kinetics of water diffusion and starch gelatinization during corn nixtamalization. En "Engineering and Food". Vol. I. Engineering Sciences in the Food Industry. Brian M. McKenna, Ed.
- 8) Coulson, J.M. y Richardson, J.F. Chemical Engineering Vol. II, 3a. Ed. - New York. Pergamon Press Inc. 1974.
- 9) Danckwerts, P.V. 1951. Absorption by simultaneous diffusion and chemical reaction into particles of various shapes and into falling drops. Trans. Faraday Soc. 47:1016.
- 10) Davidson & Harrison. Fluidization. Academic Press. London and New York, 1971.
- 11) Frantz, J.F. 1962. Design for fluidization. Chemical Engineering. 17: - 161-178.
- 12) Gámez Duch, F. 1972. Industrial production, marketing and distribution of tortilla flour in Central America. In "Nutritional Improvement of Maize", Ed. Bressani, R., Braham, J.F. y Béhar, M. -- (INCAP) Guatemala, Guatemala, C.A.
- 13) Guerra, R. 1978. Extrusión, una nueva tecnología aplicada al procesamiento del maíz normal y opaco-2. Tesis. UNAM. Fac. de Química, México, D.F.
- 14) Guerra, R., Rodríguez, A., Durán de Bazúa, C. 1983. High lysine corn -- traditional Mexican products from extruded corn meal. Trans. --

- 15) Hernández, C.G., Vizcarra, M.M., Vernon, C.E.J. y Ruiz, T.A.F. 1985. - Estudio de la separación de la cascarrilla de la semilla de achiotte en un sistema de lecho fluidizado. Cuadernos de Investigación UIA. 1:2-19.
- 16) Herrera, M., Zyman, J., García Peña, J., Segurajauregui, J.S. y Vernon, E.J. 1985. Kinetics studies on the alkaline treatment of corn-- for tortilla preparation. J. Food Sci. Enviado a publicación.
- 17) Katz, S.H., Hediger, M.L. y Valleroy, L.A. 1974. Traditional maize processing techniques in the New World. Science 184:765.
- 18) Kunii & Levenspiel. Fluidization Engineering. Krieger Publishing Co. Huntington, New York. 1977.
- 19) Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial. 1984. Departamento de Información, Documentación y Estudios. Investigación de Información sobre aspectos varios de la Industrialización del Maíz.
- 20) Leva, M. Fluidization. McGraw Hill Book Co. New York, 1959.
- 21) López, M. y Segurajauregui, J.S. 1986. Efecto de la variedad del maíz -- en la cinética de nixtamalización. Tecnol. Alimentos (Méx) 21 - (5):13-19.
- 22) Martínez Herrera, M.L. y Lachace, P.A. 1979. Corn kernel hardness as an index of the alkaline cooking time for tortilla preparation. J. Food Sci. 44:377-380.
- 23) McCabe, W.L. y Smith, J.C. Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Ed. Reverté, S.A. España 1981.
- 24) Molina, M.R., Letona, M. and Bressani, R. 1977. Drum drying for the improved production of instant tortilla flour. J. Food Sci. 42(6): 1432-1434.
- 25) Paulis, J.W., James, C., Wall, J.S. 1969. Comparison of gluten proteins in normal and high-lysine corn endosperms. J. Agric. Food Chem. 17:1301.
- 26) Peraza Campos A.L. 1983. Separación de orujo de uva y deshidratación de la semilla en un secador de lecho fluidizado. Tesis. Facultad de Química, UNAM. México, D.F.
- 27) Reid, W.S. 1974. Design and development of batch fluidized bed freezer- and fluidized bed dryer for dried food products. Can. Inst. -- Food Sci. Technol. J. 7(4):236.
- 28) Robles, R.R., Murray, E.D. y Paredes López, O. 1987. Physicochemical chan-

ges of maize starch during the lime-heat treatment for tortilla making. Enviado a publicación.

- 29) Saldaña, G. and Brown, H.E. 1984. Nutritional composition of corn and flour tortillas. *J. Food Sci.* 49:1202.
- 30) Smith, J.M. 1970. *Chemical Engineering Kinetics*. 2nd Ed. McGraw Hill, - Kogakusha, Tokio, Japan.
- 31) Smith, O., Buckle, T.S. de, Sandoval, A.M. de, González, G.E. 1979. Production of pre-cooked corn flours for arepa making using an extrusion cooker. *J. Food Sci.* 44:816-819.
- 32) Suzuki, K., Kubota, M., Omichi, M. and Hosaka, H. 1976. Kinetics studies on cooking of rice. *J. Food Sci.* 41:1180-1183.
- 33) Suzuki, K., Aki, M., Kubota, K. and Hosaka, H. 1977. Studies on the cooking rate equations of rice. *J. Food Sci.* 42:1545-1548.
- 34) Tosi, E., Tapiz, L. y Masciarelli, R. 1984. Secado de trigo en lecho fluidizado. Estudio de la fluidodinámica. *Alimentaria, Mayo*(152).
- 35) Trejo González, A., Feria Morales y Wild Altamirano C. 1982. The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. *Ad. Chem. Ser. No. 198.*, R.E. Feeney y J.R. Whitaker Ed. American Chemical Society, Washington, D.C.

APENDICE I

Ejemplo de cálculo de la expansión del lecho.

Para:

$$D_{\text{columna}} = 10 \text{ cm.}$$

$$L/D = 1$$

Se tiene la relación:

$$(1 - \epsilon)H_a = (1 - \epsilon_{mf})H_{mf}$$

donde:

ϵ = fracción de espacios vacíos.

ϵ_{mf} = fracción de espacios vacíos correspondiente al flujo de mínima fluidización.

H_a = altura del lecho a diferentes flujos del fluido.

H_{mf} = altura que alcanza el lecho al expandir al flujo de mínima fluidización.

Para calcular la fracción de espacios vacíos a las condiciones de mínima fluidización:

$$\begin{aligned} V_t &= \text{volumen total} = \pi r^2 h \\ &= \pi (0.05)^2 (0.19) \\ &= 1.492 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Ya que 10 cm de altura del lecho desplazan 6 cm.

$$\begin{aligned} V_g &= \text{volumen del grano} = \pi r^2 h \\ &= \pi (0.05)^2 (0.06) \\ &= 4.712 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_v &= \text{volumen vacío} = V_t - V_g \\ &= 1.492 \times 10^{-3} - 4.712 \times 10^{-4} \\ &= 1.02 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\epsilon_{mf} = \frac{V_v}{V_t}$$

APENDICE II

Cálculo de los coeficientes de reacción química, K_r y transferencia de masa K_m .

1) Obtención de K_r (reacción química).

A partir de la ecuación (2.2.9)

$$K_r = \rho r_o \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_o} \right) \right] / (C_e - C_o) \theta$$

Se tiene:

$$(r_c - r_o) = \frac{K_r (C_e - C_o) \theta}{\rho} \quad (1)$$

de tal forma que:

$$Y = m\theta \quad (\theta = \text{tiempo})$$

donde:

$$m = \frac{\sum (r_c - r_o)}{\sum \theta} \quad (2)$$

sustituyendo (2) en (1) se tiene que:

$$m = - \frac{K_r (C_e - C_o)}{\rho} \quad (3)$$

Por lo tanto:

$$K_r = - \frac{m \rho}{(C_e - C_o)} \quad (4)$$

2) Obtención de K_m (transferencia de masa)

A partir de la ecuación (2.2.10.)

$$K_m = \rho \left[\frac{\left\{ r_o^2 r_e^3 - r_c^2 (r_e^3 - r_o^3) \right\} - r_o \left\{ r_o^3 r_e^3 - r_c^3 (r_e^3 - r_o^3) \right\}^{2/3}}{2\theta (C_e - C_o) (r_e^3 - r_o^3)} \right]$$

Se define:

$$A = \frac{2 (C_e - C_o) (r_e^3 - r_o^3)}{\rho}$$

$$B = r_e^3 - r_o^3$$

$$C = r_o^3 - r_e^3$$

Si A, B, C = constantes, entonces:

$$K_m = \frac{\left\{ \frac{C}{r_o} - r_c^2 B \right\} - r_o \left\{ C - r_c^3 B \right\}^{2/3}}{A\theta} \quad (5)$$

rearrreglando:

$$\left\{ \frac{C}{r_o} - r_c^2 B \right\} - r_o \left\{ C - r_c^3 B \right\}^{2/3} = K_m A \theta \quad (6)$$

$$r_o r_c^2 B^{2/3} - r_c^2 B = K_m A \theta + r_o C^{2/3} - C/r_o \quad (7)$$

$$r_c^2 (r_o B^{2/3} - B) - r_o C^{2/3} + C/r_o = K_m A \theta \quad (8)$$

de manera que:

$$Y = r_c^2 (r_o B^{2/3} - B) - r_o C^{2/3} + C/r_o$$

$$X = \theta$$

pendiente:

$$m = \frac{\sum Y}{\sum X} = K_m A$$

Por lo tanto:

$$K_m = \frac{m}{A} \quad (9)$$

APENDICE III

Listado del programa Runge-Kutta.

```

10 INPUT "RADIO EN EL EQUILIBRIO = ";RE
15 INPUT "RADIO INICIAL = ";RO
20 INPUT "CONSTANTE DE DIFUSION = ";KM
25 INPUT "CONSTANTE DE REACCION = ";KR
26 INPUT "CONCENTRACION EN EL EQUILIBRIO = ";CE
30 INPUT "CONCENTRACION INICIAL = ";CO
35 INPUT "DENSIDAD = ";DE
40 INPUT "TIEMPO DE IMPRESION = ";TP
45 INPUT "INCREMENTO DE TIEMPO = ";DT
50 INPUT "INCREMENTO DE TIEMPO DE IMPRESION = ";DP
55 INPUT "TIEMPO MAXIMO = ";TM
100 RC = RO
105 A = KM * KR * (CE - CO) / DE
110 R = (RE ^ 3. - ((RE ^ 3. / RO ^ 3.) - 1) * RC ^ 3.) ^ (1 / 3)
115 K1 = DT * (- A / (KM + (RC - RC ^ 2. / R) * KR))
120 R1 = RC + K1 / 2.
125 R = (RE ^ 3. - ((RE ^ 3. / RO ^ 3.) - 1) * R1 ^ 3.) ^ (1 / 3)
130 K2 = DT * (- A / (KM + (R1 - R1 ^ 2. / R) * KR))
135 R1 = RC - K1 + 2. * K2
140 R = (RE ^ 3. - ((RE ^ 3. / RO ^ 3.) - 1) * R1 ^ 3.) ^ (1 / 3)
145 K3 = DT * (- A / (KM + (R1 - R1 ^ 2. / R) * KR))
150 RC = RC + (K1 + 4 * K2 + K3) / 6
155 R = (RE ^ 3. - ((RE ^ 3. / RO ^ 3.) - 1) * RC ^ 3.) ^ (1 / 3)
160 T = T + DT
165 IF (T - TP) < 0 THEN GOTO 115
170 PRINT "TIEMPO = ";T
175 PRINT "RADIO = ";R
180 TP = TP + DP
185 IF (T - TM) < 0 THEN GOTO 115
190 INPUT "DESEA HACER OTRA ESTIMACION?"IG$
200 IF G$ = "SI" THEN GOTO 10
210 END

```

APENDICE IV

Listado del programa de regresión lineal múltiple.

LIST

```

0 LIST 35
5 HOME
10 PRINT "MULTIPLE LINEAR REGRESSION;"
20 PRINT
30 DIM X(9),S(9),T(9),A(9,10)
40 PRINT "NUMBER OF KNOWN POINTS";
50 INPUT N
40 PRINT "NUMBER OF INDEPENDENT VARIABLES";
70 INPUT V
80 X(1) = 1
90 FOR I = 1 TO N
100 PRINT "POINT";I
110 FOR J = 1 TO V
120 PRINT "VARIABLE";J;
130 INPUT X(J + 1)
131 M = INT (T)
140 NEXT J
150 PRINT "DEPENDENT VARIABLE";
160 INPUT X(V + 2)
170 FOR K = 1 TO V + 1
180 FOR L = 1 TO V + 2
190 A(K,L) = A(K,L) + X(K) * X(L)
200 S(K) = A(K,V + 2)
210 NEXT L
220 NEXT K
230 S(V + 2) = S(V + 2) + X(V + 2) ^ 2
240 NEXT I
250 FOR I = 2 TO V + 1
260 T(I) = A(1, I)
270 NEXT I
280 FOR I = 1 TO V + 1
290 J = I
300 IF A(J, I) < > 0 THEN 340
305 J = J + 1
310 IF J < = V + 1 THEN 300
320 PRINT "NO UNIQUE SOLUTION"
330 GOTO 810
340 FOR K = 1 TO V + 2
350 B = A(I, K)
360 A(I, K) = A(J, K)
370 A(J, K) = B
380 NEXT K
390 Z = 1 / A(I, I)
400 FOR K = 1 TO V + 2
410 A(I, K) = Z * A(I, K)

```

```

420 NEXT K
430 FOR J = 1 TO V + 1
440 IF J = I THEN 490
450 Z = - A(J,I)
460 FOR K = 1 TO V + 2
470 A(J,K) = A(J,K) + Z * A(I,K)
480 NEXT K
490 NEXT J
500 NEXT I
510 PRINT
520 PRINT "EQUATION COEFFICIENTS:"
525 PRINT "      CONSTANT:"A(I,V + 2)
530 FOR I = 2 TO V + 1
540 PRINT "VARIABLE(";I - 1;"):";A(I,V + 2)
550 NEXT I
560 P = 0
570 FOR I = 2 TO V + 1
580 P = P + A(I,V + 2) * (S(I) - T(I) * S(1) / N)
590 NEXT I
600 R = S(V + 2) - S(1) ^ 2 / N
610 Z = R - P
620 L = N - V - 1
630 I = P / V
640 PRINT
650 I = P / R
660 PRINT "COEFFICIENT OF ";
661 PRINT "DETERMINATION"
665 PRINT "      (R^2)=";I
670 PRINT "COEFFICIENT OF MULTIPLE"
675 PRINT "CORRELATION =" ; SQR (I)
680 PRINT "STANDARD ERROR OF ESTIMATE =" ;
681 PRINT SQR ( ABS ( Z / L ) )
690 PRINT
700 PRINT "INTERPOLATION : ";
701 PRINT "(ENTER 0 TO END PROGRAM)"
710 P = A(1,V + 2)
720 FOR J = 1 TO V
730 PRINT "VARIABLE";J;
740 INPUT X
750 IF X = 0 THEN 810
760 P = P + A(J + 1,V + 2) * X
770 NEXT J
780 PRINT "DEPENDENT VARIABLE =" ;P
790 PRINT
800 GOTO 710
810 PRINT : PRINT "END OF PROGRAM"
820 END

```