

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

18

EXTRUSION, UNA NUEVA TECNOLOGIA APLICADA AL PROCESAMIENTO
DE MAIZ NORMAL Y OPACO - 2

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO

PRESENTA:

ROSAURA GUERRA VARGAS

MEXICO

1978



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

CLAS TESIS 1978
ABR ME. 215
FECHA J
PROC 207
• _____

FE DE ERRATAS:

EXTRUSION
EXTRUDIR
EXTRUDIDO

Del latín "extrudere",

expeler una substancia
hacia afuera a través de
una matriz.

Extrudido (no extruido)
Extrudir (no extruir)



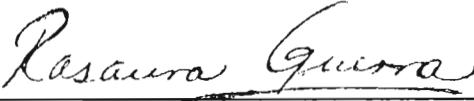
JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE

PRESIDENTE	Profa. Ninfa Guerrero de Callejas
VOCAL	Profa. Carmen Durán de Bazúa
SECRETARIO	Prof. Eduardo Bárzana García
1er. SUPLENTE	Prof. Salvador Baduñ Dergal
2o. SUPLENTE	Profa. Zoila Nieto Villalobos

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Alimentos de la División de Estudios Superiores
de la Facultad de Química, UNAM.

Nombre completo y firma del sustentante:

Rosaura Guerra Vargas 

Nombre completo y firma del asesor del tema:

Profa. Carmen Durán de Bazúa 

RECONOCIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas por las facilidades otorgadas para la elaboración del presente trabajo, especialmente al Personal de los Laboratorios de Análisis Químicos de Maíz de Alta Calidad y de Tecnología de Alimentos. A los Dres. Andrés Iruegas y Esteban Betanzos por su valiosa colaboración.

A la compañía Especialidades Industriales y Química S. A. por el préstamo -- del extrusor Brabender donde se corrieron los experimentos de la primera Fase. A Isaac González por su valiosa colaboración.

Al International Institute of Protein Food Technology, una División de Meals for Millions Foundation por permitir que las pruebas de la segunda Fase se llevaran a cabo en un extrusor Wenger de su propiedad. A Hank Sterner por su valiosa colaboración.

A la maestra Carmen Durán de Bazúa por la dirección y su valiosa colaboración en la ejecución de este trabajo.

Al Departamento de Alimentos de la División de Estudios Superiores de la Facultad de Química de la UNAM por las facilidades otorgadas para la elaboración del presente trabajo. A Eduardo Bárzana y Salvador Baduñ por su valiosa colaboración.

A Didacta, A. C. por la impresión de este trabajo.

DEDICATORIA

A la maestra Carmen Durán de Bazúa, por su valiosa ayuda y la confianza que me ha demostrado.

A mis amigos Antonio Rodríguez y Enrique Muro por su apreciable colaboración.

A mi hermano Fausto.

INDICE

	Pág.
Resumen	vii
CAPITULO 1. Introducción	1
1.1 Composición del grano de maíz	2
1.2 Maíz de alta calidad proteica	7
1.3 Naturaleza física y química del maíz normal y - opaco	19
1.4 Importancia nutricional del maíz opaco	46
1.5 Metodologías tradicionales de procesamiento de maíz	55
Proceso tradicional	57
Proceso mecanizado	58
Proceso de fabricación de harina de maíz nixta- malizado	59
Proceso alternativo	63
CAPITULO 2. Desarrollo de la tecnología	68
2.1 Metodología del proceso de extrusión	68
2.2 Equipo ideal	71
2.3 Clasificación del equipo de extrusión	71
2.4 Diseño idealizado de los extrusores	72
2.5 Características de operación	80
2.6 Ventajas de la cocción por extrusión	84
2.7 Desventajas de la cocción por extrusión	88

	Pág.
2.8 Efectos de los cereales sobre la textura	89
2.9 Evaluación de productos extruídos	90
CAPITULO 3. Optimización de la producción	101
3.1 Antecedentes	101
3.2 Material, equipo y métodos	102
3.3 Experimentos	111
Primera fase	111
Segunda fase	112
CAPITULO 4. Resultados y conclusiones	116
4.1 Primera fase	116
4.2 Segunda fase	121
Conclusiones	124
CAPITULO 5. Breve análisis económico	128
5.1 Evaluación económica a nivel urbano ó semiindus trial	128
Sistema de producción de harina precocida	103
Sistema de fabricación de harina de soya entera .	108
Sistema de producción de harina de maíz precoci da por extrusión, bajo condiciones alcalinas	114
5.2 Evaluación económica a nivel rural	145
Viabilidad del proceso	147

	Pağ.
NOMENCLATURA	151
APENDICE. Métodos de análisis	153
<hr/>	
Proteína total	153
Lisina	155
Tryptofano	158
BIBLIOGRAFIA	161
INDICE DE TABLAS	174
INDICE DE FIGURAS	177

RESUMEN

Se comparan las características físicas y nutricionales del maíz en su variedades normal y opaco - 2 y se propone el proceso de extrusión como posible alternativa al método tradicional de nixtamalización*. Por último, se evalúa la calidad nutricional de harinas precocidas por el método propuesto, a través de determinación de proteína, lisina y triptofano, y su uso potencial para elaboración de alimentos tradicionales a base de maíz.

Se hace también un análisis económico comparativo del proceso: a nivel rural y urbano, y se compara el precio del producto elaborado por extrusión con el precio de harina de maíz nixtamalizado.

* Patente en trámite

1. INTRODUCCION

El lujo de considerar una alimentación balanceada resulta una ironía en una sociedad donde existen niveles de subsistencia. Tal es el caso de las vastas poblaciones de los países en desarrollo, casi dos terceras partes del mundo, incapaces de consumir proteínas animales a causa de su alto precio y donde los cereales constituyen las fuentes primarias de proteínas y carbohidratos en su dieta diaria, siendo los primeros los compuestos más importantes en la alimentación.

Los cereales son una fuente pobre de proteína ya que no contienen todos los aminoácidos esenciales para el metabolismo humano. El maíz, alimento básico en México y demás países latinoamericanos desde tiempos remotos (Mangelsdorf et al. 1964), es deficiente en estos aminoácidos.

El maíz es escaso en proteína y ésta no solo es baja en cantidad, alrededor de 10%, sino también en calidad como alimento. El mayor problema con la calidad proteica del maíz es la baja concentración de lisina y triptofano en la proteína del endospermo. Casi el 50% de la proteína del maíz es zeína de pobre digestibilidad para el hombre y animales no rumiantes.

A nivel humano la deficiencia del maíz como fuente de proteína es mostrada de manera sorprendente por los niños de países donde el maíz es el principal alimento, entre estos niños existe una alta frecuencia del síndrome de deficiencia proteica llamado kwashiorkor. Los signos típicos de este padecimiento son: apatía, pérdida del apetito, edema y alteracio-

nes en la piel y el cabello; un examen de sangre y otros tejidos revela una marcada disminución en la concentración y actividad de las enzimas claves (Young y Scrimshaw, 1971).

Una dieta que contiene maíz como única fuente de proteína produce signos evidentes de desnutrición. Particularmente crítico es el primer año de vida, el período anterior al destete, porque el cerebro está creciendo y desarrollándose durante ese tiempo, la desnutrición impide permanentemente el desarrollo del sistema nervioso central. Un niño que ha sufrido desnutrición a muy temprana edad y por un período apreciable nunca alcanzará el desarrollo normal para su edad, aunque después se alimente lo suficiente para restaurar la velocidad normal de crecimiento. Esta podría ser una de las causas de la pequeña talla de mucha gente en los países subdesarrollados.

1.1. COMPOSICIÓN DEL GRANO DE MAÍZ

El grano de maíz posee varias partes anatómicas. Estas incluyen la capa externa, constituida por pericarpio y aleurona; el endospermo que comprende la mayor parte del grano, y el germen formado por embrión y cotiledón.

Los componentes principales del grano entero son: almidón, proteínas y lípidos. En menores cantidades se encuentran vitaminas, azúcares, minerales y fibra cruda.

El contenido de almidón en el grano es de 66 a 74.5% en peso seco. El almidón está formado por moléculas de amilosa y amilopectina en una proporción de 22 a 32% de amilosa y el resto de amilopectina, depen-

diendo de la variedad de que se trate. Para una misma variedad pueden obtenerse resultados ligeramente diferentes en función del procedimiento de análisis que se siga.

Es posible encontrar variedades como el maíz ceroso con cero contenido de amilosa (French, 1950).

Tanto las moléculas de amilosa como las de amilopectina son polímeros de alto peso molecular constituidas de unidades de D-glucosa.

Del porcentaje de lípidos en el maíz, aproximadamente 3.4, la mayoría se encuentran presentes en el germen. Los principales ácidos grasos presentes son: linoleico, oleico, palmítico y esteárico.

La concentración de azúcares en el grano de maíz varía de 1 a 3%. La mayor parte es sacarosa, en menores proporciones se encuentran: glucosa, fructuosa y rafinosa. Del 2.1 a 2.3% en peso del grano es fibra cruda.

Las proteínas se separan por el procedimiento clásico desarrollado por Osborne y Mendel (1914). Este método consiste en extracciones sucesivas con agua, soluciones salinas y de etanol para remover albúminas, globulinas y zeínas, finalmente se separan las glutelinas con soluciones alcalinas diluidas.

Las proteínas constituyen casi el 10% de los granos enteros y se clasifican de acuerdo a su solubilidad en:

Albúminas.- solubles en agua.

Globulinas.- solubles en soluciones salinas.

Prolaminas.- solubles en el etanol al 70 - 80%. La principal de ellas es la zeína, una proteína heterogénea con un peso molecular

de 20,000 a 50,000.

Glutelinas.- solubles en soluciones de hidróxido de sodio.

Son proteínas cuyo peso molecular varía de 20,000 a 50,000 (Katz et al. 1974).

El amplio rango de pesos moleculares de las glutelinas se debe a los enlaces disulfuro entre los residuos de cistina que le imparten una estructura tridimensional y su sensibilidad a la desnaturalización en soluciones alcalinas diluidas. Como las soluciones de hidróxido de sodio no son el solvente ideal para las glutelinas, Mertz et al. (1958), trataron los enlaces disulfuro de la proteína del endospermo con una solución de sulfuro y sulfato de cobre en medio alcalino.

Escleroproteínas .- insolubles en solventes acuosos.

De las fracciones de proteína, las dominantes en el maíz normal son la prolamina que incluye a la zeína y constituye un 40 - 50% de la proteína total.

Bressani y Mertz en 1958 encontraron la siguiente distribución de proteína en el germen y endospermo del maíz normal. La Tabla 1.1.1 ilustra esta distribución de proteína en porcentaje de cada fracción con respecto al contenido de proteína presente tanto en el germen como en el endospermo.

Las fracciones proteicas determinan las diferencias en la composición de aminoácidos de la proteína del germen y el endospermo. Esto se presente a continuación (Tabla 1.1.2).

TABLA 1.1.1 DISTRIBUCION DE PROTEINA EN EL GERMEN Y ENDOSPERMO DEL MAIZ NORMAL

Fracción de proteína	Germen %	Endospermo %
Insoluble	0.9	1.9
Soluble en ácido	39.4	26.3
Soluble en álcali <i>Glutelinas</i>	54.0	28.0
Soluble en alcohol <i>Zeina</i>	5.7	43.8
	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>

Proteína en el grano entero 8.2%, proteína en el germen 16.1%, proteína en el endospermo 7.2% en peso. (Bressani y Mertz, 1958)

TABLA 1.1.2 AMINOACIDOS DEL GERMEN Y ENDOSPERMO DE MAIZ NORMAL

Aminoácido	Germen	Endospermo
Lisina	6.1	2.0
Histidina	2.9	2.8
Arginina	9.1	3.8
Acido Apártico	8.2	6.2
Acido Glumático	13.1	21.3
Treonina	3.9	3.5
Serina	5.5	5.2
Prolina	4.8	9.2
Glicina	5.4	3.2
Alanina	6.0	8.1
Valina	5.3	4.7
Cistina	1.0	1.8
Metionina	1.7	2.8
Isoleucina	3.1	3.8
Leucina	6.5	14.3
Tirosina	2.9	5.3
Fenilalanina	4.1	5.3
Triptofano	1.3	0.5

Los resultados de la tabla están expresados como gramos por 100 gramos de proteína (Mertz, 1966)

1.2 MAIZ DE ALTA CALIDAD PROTEICA

Con el propósito de compensar la deficiencia de proteína del maíz, Mertz y Bressani de la Universidad de Purdue, en la década de los cincuentas, empezaron a buscar variantes para maíz que pudieran ser excepcionalmente ricas en proteína. Trabajando con variedades de maíz de América Central no encontraron resultados significativos.

Oliver Nelson, quien había estado estudiando mutantes feculentos de maíz, reunió al equipo como un segundo intento para lograr la modificación que había sido planeada, el grupo estudió entonces ciertos mutantes de grano blando conocidos como "opaco" y "harinoso".

Los mutantes "opaco" fueron llamados así porque, en contraste a lo translúcido de los granos de maíz normal, el endospermo de estos mutantes no transmitía la luz. Los mutantes "harinoso" fueron llamados así por su blandura y fina textura, propiedad presente también en el maíz opaco.

Las propiedades están gobernadas por la presencia de uno ó varios genes recesivos. En ambos grupos de mutantes, cuando prevalece la situación de homocigoto recesivo, aparecen propiedades distintivas: ausencia de dureza y brillo en el endospermo y granos pálidos y deslustados, que son altamente convenientes como marcadores para distinguir al gene en los experimentos de cría.

Los investigadores de Purdue pronto encontraron un gene llamado "opaco - 2", al que denominaron de este modo por haber sido el segundo mutante descubierto en el grupo opaco.

El maíz tiene muchas variedades, cada una adaptada genéticamente a su propia localidad y al uso para el que ha sido creada, de aquí que en cada caso el gene "opaco" tendrá que ser introducido en una cepa conveniente a la localidad y al uso deseado. Para maíz híbrido es necesario insertar el gene opaco en cada una de las líneas innatas para hacer la cepa madre mediante la técnica estándar de retrocruza.

La selección de plantas hijas se lleva a cabo encontrando el gene deseado y repitiendo la crusa hasta que se obtiene finalmente la cepa original, generalmente después de 4 ó 5 generaciones. La primera y segunda generaciones se consiguen por polinización cruzada y la tercera y las últimas involucran polinización cruzada y autopolinización. Una técnica que emplee polinización cruzada y autopolinización facilita la identificación de las plantas que transmitirán el gene recesivo (Harpstead, 1971).

Las mazorcas indican si el maíz es homocigoto ó heterocigoto. Los granos de las mazorcas del homocigoto se ven todos iguales, y en este caso son descartadas; además cuando se sabe que la planta es homocigoto, las mazorcas de retrocruza de la misma planta y los homocigotos adaptados a la localidad pueden también descartarse. Los granos de la mazorca de la planta heterocigoto autopolinizada están divididos en granos normales y granos opacos, en una relación de tres granos normales por cada grano opaco.

En 1964 el equipo de Wertz determinó el contenido de lisina de los endospermos de dos cruzas que contenían el gene opaco - 2 de diferente

tes generaciones y de la especie opaco 2 probada primero. En ambas cruzas el contenido de lisina (3.3 a 4.0%) fue más del doble del contenido encontrado en las especies normales usadas como control (1.3% de lisina).

Para hacer una prueba crítica de la hipótesis que afirma que el mutante opaco - 2 es el responsable del aumento de lisina, se separaron los endospermos de granos de maíz normal y opaco - 2 de una cruza simple. Los endospermos fueron desgrasados y muestras de 5 mg. de la proteína extraída se hidrolizaron durante 24 horas a 110° C. a reflujo con 20 ml. de HC16N.

La Tabla 1.2.1 presenta la composición de aminoácidos de los endospermos de maíz opaco - 2 y maíz normal, expresada como gramos de cada aminoácido por 100 gramos de proteína. El triptofano no fue determinado porque el enlace paptídico presenta un problema especial a causa de que es destruido por los agentes hidrolizantes en medio ácido.

El endospermo del opaco - 2 contiene 69% más de lisina que el de maíz normal. El primero contiene menos ácido glutámico, alanina, meutionina, leucina y tirosina y más lisina, histidina, arginina, ácido aspartico, glicina y cistina que el último.

Calculando la relación de los tres aminoácidos básicos y el amoniaco amido con los valores del opaco - 2 como numerador y los del maíz normal como denominador, las relaciones son las siguientes:

	LISINA	HISTIDINA	ARGININA	AMONIACO AMIDO
Soluble en ácido	3.2	3.4	2.3	0.6
Zeína	3.0	1.2	1.2	1.8
Glutelina	1.0	0.9	1.8	0.9

TABLA 1.2.1 AMINOACIDOS EN LOS ENDOSPERMOS DE MAIZ
OPACO 2 Y NORMAL.

Aminoácido	Opaco - 2	Normal
Lisina	3.39	2.00
Triptofano		
Histidina	3.35	2.82
Arginina	5.10	3.76
Acido Apártico	8.45	6.17
Acido Glutámico	19.13	21.30
Treonina	3.91	3.48
Serina	4.99	5.17
Prolina	9.36	9.67
Glicina	4.02	3.24
Alanina	6.99	8.13
Valina	4.98	4.68
Cistina	2.35	1.79
Metionina	2.00	2.83
Isoleucina	3.91	3.82
Leucina	11.63	14.29
Tirosina	4.71	5.26
Fenilalanina	4.96	5.29
Amoniaco Amido	3.41	3.28

(Mertz y Bates, 1964)

Estos datos sugirieron que las fracciones soluble en ácido y zeína eran algo diferentes de aquellas de los endospermos de maíz normal.

En base a los descubrimientos realizados, el incremento del contenido de lisina se atribuyó a tres posibles factores:

- I. Incremento de lisina en la fracción soluble en ácido.
- II. Incremento de lisina en la fracción zeína.
- III. Disminución de la relación zeína a glutelina.

La fracción zeína del endospermo del opaco - 2 contenía 0.9 g. de lisina por 100 gramos de proteína (N x 6.25) que es más de 10 veces la cantidad (0.08 g.) encontrada en las fracciones de zeína de los endospermos de maíces de Estados Unidos y Guatemala, y tres veces la cantidad encontrada en los endospermos normales de la misma mazorca. Este descubrimiento, junto con el aumento de 1.8 veces del amoníaco amido (probablemente de glutamina), sustentaron la conclusión de que el opaco - 2 contenía un tipo de zeína que era químicamente y tal vez físicamente diferente a las descritas hasta esas fechas (Mertz y Bates, 1964).

Estudios posteriores han demostrado que, de las hipótesis planteadas por Mertz, la más acertada es la que atribuye el aumento de lisina a la disminución de la relación zeína a glutelina. El aumento aparente de lisina en la fracción zeína puede ser provocado por el efecto degradante que ejercen algunos de los solventes sobre la proteína, causando contaminación de unas fracciones con otras.

Los endospermos desgrasados de opaco - 2 y de maíz normal es-

tudiados por Mertz dieron la siguiente distribución de proteína basada en la solubilidad de las fracciones.

OPACO 2	NORMAL
35% Soluble en ácido	34% Soluble en ácido
26% Soluble en alcohol (zeína)	37% Soluble en alcohol
39% Soluble en álcali (glutelina)	29% Soluble en álcali

Esto confirma la reducción observada en la relación zeína a glutelina.

Una característica significativa de los granos de opaco 2 es la gran cantidad de material soluble en agua, las sustancias nitrogenadas solubles en agua incluyen probablemente: péptidos, aminoácidos y otros compuestos nitrogenados simples. El híbrido opaco - 2 rinde más del triple de proteína soluble en agua que los híbridos normales. El contenido de polisacáridos solubles no es afectado por el gene opaco - 2. La proporción de sacarosa y azúcares reductores del maíz opaco - 2 es mayor que en el normal, pero esta diferencia podría deberse solamente a la mayor proporción del germen en los granos de opaco - 2. Las propiedades del almidón de opaco - 2 y maíz normal no presentan diferencias significativas, el contenido de amilosa fue esencialmente el mismo y la temperatura de gelatinización superior a la normal (Watson y Yahl, 1967).

Los resultados presentados en la Tabla 1.2.2 indican diferencias significativas en la proporción germen a endospermo y en la distribución de proteína, la calidad superior de ésta se comprueba a través de la determinación directa de triptofano (1.3 a 1.5 g. por 100 gramos de proteína con-

TABLA 1.2.2. COMPOSICION DEL MAIZ OPACO Y DE SUS HIBRIDOS PADRES

	MAIZ OPACO			HIBRIDO PADRE		
	Grano entero	Endospermo	Germen	Grano entero	Endospermo	Germen
Distribución de fracciones %	100	76-78	14-15	100	84-85	9
Proteína % (N x 6.25)	11	9	26	12-14	10-11	16-21
Grasa %	5 - 6	0.5	30-37	4	.4-.8	32-37
Almidón %	68-69	84		74	82-84	
Azúcares %	3	1	12	2 - 4	.5-.7	13
Triptofano (g/16 gN)	1.3-1.5	1.2	1.7	0.8	0.6	1.6-2
Lisina (g/16 g N)	4.2			2.9		

(Buckle, 1972)

tra niveles inferiores a 1.0 en los maíces normales) y la diferencia de concentración de lisina (de 4.2 a 2.9 g. por 100 gramos de proteína).

Aunque Mertz indicó que el gene opaco - 2 no afectaba el contenido total de proteína del grano, las diferencias de composición observadas después: 13.6 y 10.4% de proteína, 64.4 y 71.4% de almidón para maíces opaco - 2 y normal respectivamente, dificultan la comparación precisa de las propiedades físicas y de molienda de ambos maíces, cuando éstos son remojados en soluciones al 0.05% de SO_2 (como metabisulfito de potasio) y posteriormente molidos.

El mayor rendimiento de solubles en el agua de remojo, y en la masa del opaco - 2, y el alto contenido de proteína de las fracciones solubles son las características sobresalientes del comportamiento a la molienda húmeda del opaco - 2.

La proporción de lisina de las fracciones solubles es muy similar para los dos tipos de maíz (Tabla 1.2.3), a pesar de que casi la mitad de la proteína soluble proviene del endospermo a causa de la acción solubilizante del SO_2 .

Las diferencias esperadas en el contenido de zeína del gluten, comprobadas por extracción con soluciones salinas, de etanol al 70% y álcali, revelaron que el gluten del opaco - 2 tiene menos zeína y mayores contenidos de glutelina y proteína insoluble. La Tabla 1.2.4 ilustra estos resultados, expresados como gramos de proteína en cada fracción entre gramos de proteína total del grano por 100.

Lambert et al., en 1969, reportaron que de 17 híbridos de opaco -

TABLA 1.2.3 AMINOACIDOS ESENCIALES EN EL GRANO DE MAIZ

	HIBRIDO OPACO 2		HIBRIDO NORMAL	
	En fracción	En proteína	En fracción	En proteína
Grano entero	%	%	%	%
Lisina	0.49	3.6	0.25	2.4
Metionina	0.26	1.9	0.20	1.9
Triptofano	0.10	0.74	0.12	0.6
Germen				
Lisina	0.68	4.7	0.43	3.8
Metionina	0.24	1.7	0.17	1.4
Fibra				
Lisina	0.29	3.5	0.24	2.0
Gluten				
Lisina	1.27	3.5	0.60	1.3
Metionina	0.81	2.2	1.15	2.5
Triptofano	0.36	1.0	0.12	0.3
Solubles (+)				
Lisina	2.5	3.9	2.2	4.1
Metionina	1.1	1.7	1.2	2.2

(+) Solubles del agua de remojo y de la masa. (Watson y Yahl, 1967)

TABLA 1. 2. 4 FRACCIONES DE PROTEINA EN EL GLUTEN DE MAIZ OPACO Y NORMAL

Fracción de proteína	OPACO 2 %	NORMAL %
Soluble en soluciones salinas (globulinas)	2.8	1.5
Soluble en alcohol (zeína)	32.8	65.0
Soluble de álcali (glutelinas)	51.0	30.4
Insoluble	12.0	2.8

(Watson y Yahl, 1967)

2 de Illinois, éstos fueron en promedio 8% menores en rendimiento, 5% menores en peso por ciento de mazorcas, 20% mayores en humedad de grano, 1.3% mayores en contenido de aceite y 89% mayores en porcentaje de granos quebrados en comparación con los híbridos normales. El ligero aumento en el contenido de aceite puede ser resultado del cambio en la relación germen a endospermo.

El maíz opaco - 2 alta lisina rinde también mayores cantidades de almidón y mucho menos pericarpio que el maíz normal (Wu y Sexson, 1976).

A causa de la naturaleza harinosa del opaco - 2, ni la molienda húmeda ni en seco han sido bien escogidas por los agricultores. Las operaciones de los molineros requieren un grano de endospermo vidrioso, el opaco presenta problemas a la molienda en seco ya que sus rendimientos son reducidos.

La harina del opaco - 2 obtenida por molienda en seco es fina, forma una pasta que requiere nuevos métodos de preparación para llegar a los productos horneados comunes del maíz. En contraste con la harina del maíz normal, la de opaco - 2 no puede producir hojuelas (Brekke et al. 1971).

Un aspecto de interés para la producción de harinas precocidas de opaco - 2 lo constituye el comportamiento observado en las pastas de su almidón, el cual es significativamente diferente al de los híbridos padres, mostrando una mayor facilidad de cocimiento y estabilidad.

En el campo, la suavidad del grano de maíz opaco lo hace vulnerau

ble al ataque de insectos durante su crecimiento. En pruebas tendientes a obtener alguna información sobre la susceptibilidad al daño causado por hongos durante el almacenamiento, el maíz opaco - 2 utilizado resultó ser igual ó menos susceptible que el maíz normal (López Farías, 1972).

Páez et al., en 1969, indicaron que los efectos indeseables del opaco - 2 podrían eliminarse por selección, ó mediante introducción de genes modificantes que hicieran que el endospermo fuera translúcido y duro aun en presencia del gene homocigoto recesivo opaco - 2. Entonces sería posible encontrar granos translúcidos con altos contenido de lisina.

En 1974, Mertz y colaboradores demostraron que el endospermo duro no semejante al del maíz normal, que se cosecha entre los granos conocidos, lleva el gene opaco - 2. Fue entonces, cuando tratando de identificar opaco - 2 con endospermo duro desarrollaron su descubrimiento, realizado en 1966, de que el endospermo del opaco - 2 tiene niveles más altos de aminoácidos libres que el endospermo del maíz normal. Los niveles excesivos de aminoácidos libres en el opaco - 2 pueden ser detectados con ninhidrina. Esta prueba distingue rápidamente entre opaco - 2 harinoso, opaco - 2 de endospermo duro y los maíces normales de endospermo duro.

Los hallazgos de Mertz fueron confirmados por Misra y colaboradores en 1975. En las combinaciones estudiadas entonces, la presencia del gene opaco - 2 elevó invariablemente el nivel de aminoácidos libres sobre aquel de los mutantes simples ó híbridos normales.

1.3 NATURALEZA FISICA Y QUIMICA DEL MAIZ NORMAL Y OPACO

En las variedades de maíz examinadas, la inspección microscópica ha revelado que una semana después de la aparición de los gránulos de almidón en el endospermo surge una segunda clase de gránulos, llamados gránulos de proteína, que empiezan a crecer. Aunque no pueden contarse exactamente, los gránulos no parecen aumentar en número después de su primera aparición, pero su desarrollo se hace claramente sobresaliente en cualquier región dada al paso del tiempo.

En endospermos maduros teñidos con hematoxilina, una sección de célula de endospermo duro tiene la apariencia de una caja de bolitas blancas (granos de almidón) en la que hay balines (gránulos de proteína) que se han usado como empaque entre las bolitas, la caja se llena entonces con una goma transparente (citoplasma viscoso claro) que rodea las bolitas y hace que parezcan un conglomerado rígido. Todas las variedades de maíz estudiadas por Duvick, en 1961, presentan las siguientes características:

1. Rápido crecimiento de los gránulos de proteína, empezando primero en las células de la región de la corona que se mueve progresivamente hacia las células de la porción basal del endospermo.
2. En una región dada del endospermo, el rápido crecimiento de los gránulos de proteína empieza y termina primero en las células interiores. Su tamaño está casi en el límite de resolución del campo luminoso del microscopio, alrededor de 3 micrones de diámetro.
3. Los gránulos de proteína son más grandes y numerosos en las células

de la subaleurona y su tamaño decrece hasta que en el centro, en la región harinosa del endospermo, los gránulos de proteína, como tales, no pueden ser identificados. En contraste, los gránulos de almidón del endospermo son progresivamente mayores de afuera hacia adentro. Estos resultados fueron confirmados después por Wolf y colaboradores en 1969.

Las pruebas de la naturaleza proteínica de los gránulos de proteína son las siguientes:

1. Los gránulos dan una reacción positiva para tirosina con el reactivo de Millon-Serra.
2. Se tiñen de amarillo con I/KI.
3. Dan una prueba negativa ante el reactivo Sudan III para lípidos.
4. No son birrefringentes a la luz polarizada.

El citoplasma viscoso, incidentalmente, da una prueba positiva con el reactivo de Millon y se mancha de amarillo con I/KI, por lo que podría ser también de naturaleza proteínica. Cuando se examinaron secciones de endospermos enteros a simple vista, ó bajo el microscopio de disección, las regiones que estaban coloreadas más profundamente por la reacción de Millon-Serra, por I/KI (color amarillo) y por la reacción xantoprotéica (prueba histoquímica para proteínas y aminoácidos) correspondieron generalmente a aquellas secciones en las que los gránulos de proteína fueron más grandes y más numerosos.

Las determinaciones de nitrógeno a través del procedimiento Micro - Kjeldahl indicaron que las regiones que tenían mayores tamaños y número aparente de gránulos de proteína (regiones de la subaleurona) tenían también los mayores porcentajes de proteína.

<u>Región</u>	<u>Célula No.</u>	<u>Proteína a 14% de Humedad</u>
Aleurona	1	36
Endospermo externo duro	2 - 7	22
Endospermo interno duro	8 - 14	9

(Duvick, 1961).

El porcentaje de proteína de los endospermos duros es mayor en las células de la subaleurona que en aquellas células más cercanas al centro del endospermo.

Existen algunas evidencias de que los gránulos de proteína pueden estar compuestos principalmente, ó en su totalidad, por el complejo de proteínas designado como zeína. Estas evidencias se citan a continuación:

1. Los gránulos de proteína dan una prueba negativa para arginina, aunque las células de la aleurona dan una fuerte prueba positiva. El citoplasma de las células de los endospermos también da una prueba definida, pero no tan fuerte, para arginina. La zeína contiene poca arginina comparada con las glutelinas, las cuales junto con la zeína constituyen la mayor parte de las proteínas del endospermo.
2. En una serie de experimentos para determinar los efectos de la secuencia de tratamientos se encontró que cuando del grano molido se extraía la proteína directamente con etanol, era necesario añadir acetato de sodio para obtener una máxima extracción de zeína (Nagy et al., citado por Duvick, 1961).

Este resultado está de acuerdo con la suposición de que la zeína

está en los gránulos de proteína rodeada por el citoplasma, constituido principalmente de proteínas solubles en álcali, y cualquier tratamiento que peptice primero el citoplasma expondrá un número máximo de gránulos a la acción del etanol.

3. El tiempo de máximo crecimiento de los gránulos de proteína parece coincidir con el tiempo de mayor incremento en la cantidad de zeína del endospermo. Los datos obtenidos por Watson (citado por Duvick) muestran que la mayor velocidad de acumulación de zeína ocurre aproximadamente durante los 14 a 35 días después de la polinización y continúa a velocidad apreciable hasta la maduración completa del grano, aunque esto depende de las variedades de maíz. En las variedades estudiadas por Duvick, la Longfellow (granos no dentados y de endospermo duro) no presentó máxima velocidad de acumulación de zeína hasta 2 ó 3 semanas después de la polinización y en la Gourdseed (granos largos y profundamente dentados, endospermo casi totalmente harinoso) las máximas velocidades de acumulación se alcanzaron 4 semanas después de la polinización. Los descubrimientos de Mertz (1960) indican, por el contrario, que el porcentaje de zeína en la proteína del endospermo no aumenta con el tiempo. Esto hace necesario un reexamen de la velocidad de acumulación de zeína.

4. Hamilton et al., en 1951 (citado por Duvick, 1961), indicaron que el porcentaje de zeína en los endospermos duros era casi el doble del correspondiente a endospermos harinosos.

La presencia de gránulos identificables de proteína, aparentemente no determina, per se, si el endospermo es duro ó harinoso. Más bien

parece ser el umbral en que la proporción de proteína viscosa (citoplasma) a inclusiones intergranulares (de proteína y almidón) llega a ser tal que la proteína viscosa se rompe durante el tiempo de secado. Las células de los endospermos tiernos tienen un porcentaje relativamente alto de agua, y la proteína viscosa en todas las células es lo suficientemente plástica y abundante para recubrir todos los gránulos, como el endospermo se seca durante el proceso de maduración, la proteína viscosa pierde volumen y elasticidad a causa de la pérdida de agua, encogiéndose y algunas veces llegando a ser insuficiente en volumen para cubrir completamente todos los gránulos. En tales casos se rompe. Este proceso puede seguirse a través del microscopio. Las células en las que la proteína viscosa se rompe corresponden normalmente a endospermos harinosos, los espacios vacíos se llenan de aire que hace aparecer blancos y opacos a los granos.

Duvick asoció la translucidez a la presencia de los cuerpos granulares de proteína. Wolf et al., en 1969, demostraron que los cuerpos granulares fueron solubles en alcohol, lo que comprueba que son depósitos de zeína. Reportaron también que los mutantes alta lisina de opaco - 2 y harinoso - 2 son deficientes en tales cuerpos.

Los gránulos de almidón en los endospermos duros normales son poligonales, fuertemente unidos, sin espacios de aire y aparentemente cubiertos con una delgada capa continua de proteína. Una fotomicrografía del endospermo de opaco - 2, en contraste con el endospermo normal, muestra gránulos de almidón casi redondos. La matriz de proteína, no

obstante, es continua y parece encerrar los gránulos de almidón, los cuales no están tan comprimidos y el resultado es una gran cantidad de espacios de aire intergranulares. Esta diferencia también la presenta el sorgo.

Una fotomicrografía del endospermo duro ó modificado V 181 reveló gránulos de almidón angulares, fuertemente ligados, similares en apariencia a aquellos de los endospermos duros del maíz normal. No obstante, hay una diferencia distintiva: la matriz de proteína del grano modificado no tiene cuerpos de zeína. El endospermo blando del modificado V 181 presentó gránulos similares a los del endospermo de maíz opaco. Los endospermos duros modificados tienen mucho menos proteína soluble en alcohol (alrededor de 14%) que los endospermos duros del maíz normal (alrededor de 40%) (Robutti et al., 1974).

La estructura difusa de los endospermos blandos y la alta proporción de huecos intergranulares podría explicar la baja densidad de las variedades opacas; los espacios de aire podrían ser los causantes de la opacidad.

En base a las observaciones microscópicas, Robutti y colaboradores encontraron muy pocos espacios intergranulares en los endospermos duros, y aquellos que estaban presentes se encontraban llenos con la matriz de proteína. Según Duvick, la ausencia de espacios intergranulares llenos de aire, causa que los endospermos de maíz duro tengan apariencia translúcida.

Por su parte Robutti et al., sugiere que la naturaleza compacta

de los gránulos de almidón - en lugar de la cantidad ó tipo de proteína de la matriz - es la responsable de la translucidez, lo que justifica que los endospermos duros modificados sean translúcidos y contengan poco ó nada de cuerpos de zeína.

Los gránulos de almidón de los endospermos harinoso y duro difieren en forma. Una explicación posible del por qué un grano simple de maíz podría tener estos dos tipos de almidón es que durante el proceso natural de secado, la proteína pierde agua y se encoge.

Si se aplica una fuerza suficiente los granos de maíz se rompen; si la fuerza de adhesión entre proteína y almidón es menor que entre los gránulos de almidón, la fractura podría dejar intactos los gránulos de almidón y expuestas las superficies de proteína. Este es el caso de los endospermos blandos, tanto de opaco - 2 como de las variedades modificadas. Las fotomicrograffas de endospermos duros revelaron un predominio de gránulos de almidón rotos, indicio de que la adhesión es más fuerte entre proteína y almidón que entre los gránulos de almidón.

El examen microscópico de endospermos de maíz mostró que la proteína está depositada en las células como dos componentes distintos, cuerpos globulares y una matriz amorfa en la que están embebidos los cuerpos granulares de proteína (Wolf et al., 1969).

Las observaciones enfatizan que la proteína subcelular del endospermo es una estructura más compleja de lo que originalmente se esperaba. Para el estudio microscópico, los gránulos de almidón fueron removidos enzimáticamente, a fin de obtener una visión clara de la proteína

intersticial del endospermo. La proteína en las secciones sin almidón fue teñida con soluciones de I/KI para su observación visual y microfotográfica.

Después del tratamiento con alfa-amilasa para remover el almidón, sólo los depósitos de proteína en forma de una fina red permanecen dentro de las paredes celulares. Los mutantes harinoso - 1 y opaco - 1 presentan una variación en la distribución usual de proteína; en el endospermo de estos maíces frecuentemente hay escasez de células individuales de alta proteína entre las células harinosas de bajo contenido de proteína. Las células alta-lisina están dispuestas al azar en el endospermo y de ellas depende el alto contenido de proteína de estos maíces.

A nivel subcelular, la proteína del endospermo llena el espacio que hay entre los gránulos de almidón y se observa claramente en secciones donde éste ha sido removido, en donde aparece como un sistema de dos componentes formado de cuerpos globulares embebidos en una matriz amorfa.

La solubilidad de los cuerpos globulares de proteína en etanol los identifica como el mayor sitio de depósito de zeína. De pruebas similares de solubilidad se supone que la matriz residual insoluble en etanol es principalmente glutelina. Los gránulos de proteína están presentes no sólo en células de endospermos harinosos, sino también en las células especiales de la subaleurona encontradas en varios tipos de maíz.

Las células de la subaleurona ricas en proteína se encuentran en el maíz harinoso y en los mutantes opaco - 2 y harinoso - 2, en estas variedades las células especiales de la subaleurona forman sólo una capa

parcial, generalmente de una a tres células de espesor, justamente debajo de la aleurona.

Las mediciones de los gránulos de algunas variedades de maíz se dan en la Tabla 1.3.1. Los cuerpos de proteína solubles en etanol se encontraron en todas las variedades de maíz examinadas, con excepción de los mutantes alta lisina opaco - 2 y harinoso - 2. Los datos indican que sólo hay dos niveles de tamaño para los cuerpos de zeína. En variedades con contenido normal de lisina, los diámetros oscilan entre 1.4 a 1.8 micrones, y en los mutantes alta lisina los cuerpos de zeína son de nivel submicroscópico.

La proteína soluble en alcohol, de las variedades con desarrollo normal de los cuerpos de zeína, varía del 25 al 62% (Tabla 1.3.1), en tanto que en el mutante opaco - 2 la proteína soluble en alcohol fue solamente 13.5% y 20% para el harinoso - 2.

En base a análisis de otras estructuras particulares, la proteína de la zeína no parece depositarse en otros sitios del endospermo que no sean los cuerpos granulares esféricos. Esto confirma los conceptos de Duvick.

Christianson et al., en 1969, propusieron como alternativa a la extracción con solventes, la separación de partículas subcelulares, con el propósito de minimizar la interacción entre las fracciones de proteína, ó de éstas con otros constituyentes durante la extracción. Con este procedimiento determinaron la composición de aminoácidos de la matriz de proteína.

TABLA 1.3.1 DIAMETRO MEDIO DE LOS CUERPOS DE ZEINA, PROTEINA TOTAL Y PROTEINA SOLUBLE EN ALCOHOL DE DIFERENTES VARIEDADES DE MAIZ.

Variedad de maíz	Diámetro Promedio (Micrones)	Proteína Total %	Proteína soluble en Etanol %
Híbrido Holmes	1.79	8.5	25.3
Illinois alta-proteína		29.6	
Almidón blando (h ₁)	1.58	12.9	48.9
Blanco Cuzco	1.50	4.3	40.2
Opaco - 1 (O ₁)	1.39	13.6	54.1
Opaco - 2 (O ₂)	0.1(+)	11.4	13.5
Harinoso - 1 (fl ₁)	1.43	14.7	61.5
Harinoso - 2 (fl ₂)	ninguno	14.7	20.0
Opaco -4 (O ₄)	1.41	14.3	
Harinoso - 2/opaco - 2	0.9(++)	13.5	25.2
W64A	1.52	15.5	28.6
W64A0 ₂	0.1(+)	13.8	15.6
Ceroso	1.57	15.1	
Reventador	1.54		
Amilomaíz		18.5	38.3

La proteína total está expresada como porcentaje del endospermo en base seca, la proteína soluble en etanol es el porcentaje de la proteína total del endospermo en base seca.

(+) Mediciones hechas en fotomicrográficas electrónicas.

(++) Sólo se encontraron cuerpos de proteína en algunos granos de la muestra.

(Duvick, 1961)

El material de la matriz (residuo insoluble en alcohol) fue proteína casi en su totalidad (14.3% de nitrógeno), y soluble solo en hidróxido de sodio 0.1N, de lo que se deduce que pertenece a la fracción glutelina. Su perfil de aminoácidos, sin embargo, difiere significativamente del perfil de las glutelinas extraídas del endospermo entero, Tabla 1.3.2.

La proteína de la matriz contiene más lisina, pero menos ácido glutámico y leucina que las glutelinas extraídas de harina del endospermo, las diferencias en la composición de aminoácidos indican que hay poco ó nada de zeína en la proteína de la matriz.

La glutelina que constituye la matriz se encuentra entrecruzada a través de enlaces disulfuro. Los resultados de los análisis de aminoácidos de proteínas obtenidas por los métodos de Osborne-Mendel y Mertz-Lloyd dan resultados confusos acerca de la similitud de las glutelinas de los endospermos de maíces normal y opaco. Tal vez a causa de una contaminación con zeína y su posible interacción con las glutelinas.

La Tabla 1.3.2 presenta la composición de aminoácidos de las proteínas del grano de maíz, determinada en partículas subcelulares, así como la composición de aminoácidos reportada antes para proteínas extraídas de endospermos de maíz.

Paulis et al., en 1969, encontraron que extrayendo la proteína con NaCl 0.5M se separaba tres veces más proteína de los endospermos alta lisina (20.2%) que de los normales (7.8%). La extracción con etanol al 70% rinde más del doble de proteína en el maíz normal (37.6%) que el en-

TABLA 1.3.2. COMPOSICION DE AMINOACIDOS DE LAS FRACCIONES DE PROTEINA DE LAS PARTICULAS SUBCELULARES, Y PROTEINAS EXTRAIDAS DEL ENDOSPERMO DE MAIZ.

Aminoácido	Glutelina	Cuerpos	Matriz		Proteína	
		Libres Zeína	(1)	(II)	del endospermo Zeína	Glutelina
Lisina	51	5	1	22	1	17
Histidina	17	19	15	41	9	29
Arginina	48	16	13	30	11	29
Acido Áspártico	80	36	37	31	47	41
Treonina	42	27	24	29	27	36
Serina	50	51	50	40	52	53
Acido Glutámico	88	172	182	131	190	150
Prolina	58	146	152	155	108	121
Glicina	70	29	19	50	19	61
Alanina	79	98	109	61	128	86
Cistina	..	18	14	34	4	16
Valina	66	32	28	41	38	46
Metionina	21	16	13	14	3	16
Isoleucina	41	28	31	23	42	25
Leucina	72	144	175	85	178	99
Tirosina	24	31	33	26	33	31
Fenilalanina	34	39	47	23	57	31

(I) Soluble en etanol, (II) Insoluble en etanol.

Los datos de la tabla están expresados como: mM/16 g. N.

(Christiansan et al., 1969)

dospermo alta lisina (14.6%). La adición de acetato de sodio (0.5%) al etanol al 70% aumentó la cantidad de proteína extraída de los maíces normal y alta lisina en casi un 10%.

La cantidad de proteína extraída con solventes, para ambos maíces, se presenta a continuación en la Tabla 1.3.3.

El contenido de lisina en las glutelinas del opaco - 2 es mayor que en las glutelinas del maíz normal. También es mayor, para las dos variedades, cuando se extrae con solución etanol-acetato.

En general, todas las glutelinas tienen una composición de aminoácidos intermedia entre la composición de la zeína (Tabla 1.3.4) y las composiciones reportadas, por Paulis y Wall en 1969, para albúminas y globulinas (Tabla 1.3.5). Los datos de ambas tablas están dados como mM/100 g. de proteína.

La composición de aminoácidos de albúminas y globulinas presentes en endospermo y germen.

El triptofano y la cistina no fueron determinados. Existen ligeras diferencias entre las cantidades de arginina, ácido aspártico, alanina, treonina, prolina y glicina de las albúminas y globulinas de la misma fracción del grano de maíz. Con excepción de la prolina, sólo hay pequeñas diferencias en la composición de aminoácidos entre fracciones de proteína similares del germen y endospermo.

La Tabla 1.3.6 compara la composición de aminoácidos de las glutelinas de maíz normal y alta lisina, preparadas con NaOH al 0.2% y con alfa-amilasa. Las glutelinas de maíz alta lisina contienen mayor can-

TABLA 1. 3. 3 CANTIDADES RELATIVAS DE LAS FRACCIONES DE PROTEINA EN ENDOSPERMOS DE MAICES NORMAL Y ALTA LISINA

Solventes	Fracciones de proteína	Proteína total %	
		Normal	Alta lisina
NaCl 0.5 M	Albúminas y Globulinas	7.8	20.2
Etanol			
EtOH al 70%	Zeína	37.6	14.6
EtOH al 70% y Acetato de sodio 0.5%	Zeína	45.8	24.4
NaOH al 0.2%			
después de EtOH al 70%	Glutelinas	43.6	53.2
después de EtOH más acetato de sodio 0.5%	Glutelinas	37.5	46.2
Solubles Totales			
con EtOH al 70%	. . . . .	89.0	88.0
con EtOH al 70% mas acetato de sodio 0.5%	. . . . .	91.1	90.8

La proteína total esta expresada como gramos de proteina en cada fracción entre gramos de proteína total, presente en el grano, por 100. (Paulis et al., 1969)

TABLA 1.3.4 COMPARACION DE AMINOACIDOS DE LAS ZEINAS EX
TRAIDAS CON ETANOL AL 70% Y ETANOL-ACETATO,
PARA MAICES NORMAL Y OPACO - 2

Aminoácido	Etanol		Etanol-Acetato	
	Normal	Opaco	Normal	Opaco
Lisina	0.6	1	1	0.7
Histidina	8	8	28	16
Arginina	10	11	12	12
Acido Aspártico	41	38	36	36
Treonina	24	24	29	28
Serina	52	52	52	52
Acido Glutámico	166	157	180	174
Prolina	94	102	70	117
Glicina	17	20	33	32
Alanina	110	108	100	95
Valina	31	25	31	32
Metionina	10	5	10	9
Isoleucina	31	31	30	29
Leucina	151	157	148	149
Tirosina	31	30	32	31
Fenilalanina	43	44	43	41

(Paulis et al., 1969)

TABLA 1.3.5 ANALISIS DE AMINOACIDOS DE ALBUMINAS Y GLOBULINAS DEL ENDOSPERMO Y GERMEN

Aminoácido	Endospermo		Germen	
	Albúminas	Globulinas	Albúminas	Globulinas
Lisina	44	41	51	37
Histidina	16	25	18	21
Arginina	43	72	44	63
Acido Aspártico	73	58	72	53
Treonina	45	28	47	27
Serina	48	53	49	49
Acido Glutámico	86	114	98	96
Prolina	45	33	27	38
Glicina	93	73	82	70
Alanina	85	60	85	57
Valina	50	49	50	44
Metionina	10	7	8	5
Isoleucina	28	23	24	22
Leucina	49	45	45	44
Tirosina	19	17	17	15
Fenilalanina	21	28	28	27

Los valores están dados como milimoles de aminoácidos por 100 gramos de proteína. (Paulis y Wall, 1969)

tividad de este aminoácido que las glutelinas de maíz normal; en contraste, las glutelinas del maíz normal son más altas en prolina y leucina que las preparadas por el mismo método a partir de maíz alta lisina.

La diferencia entre los contenidos de lisina de las glutelinas de endospermos normal y alta lisina preparadas por extracción con hidróxido de sodio es mayor que entre las glutelinas, de ambos fenotipos, preparadas por técnicas enzimáticas (Tabla 1.3.6). Esta variación sugiere que la proteína deficiente en lisina se extrae preferentemente con hidróxido de sodio.

Sólo hay pequeñas diferencias entre la composición de aminoácidos de las glutelinas alquiladas-reducidas de los maíces normal y opaco, después de la extracción con alcohol. Estos resultados indican gran similitud entre las glutelinas de el maíz normal y el opaco -2; cuando la zeína libre y la proteína unida por enlaces disulfuro, semejante a la zeína, han sido removidas de la preparación.

Los descubrimientos de Mertz et al., en 1967 (citado por Paulis, 1969), indican que la interconexión de grupos disulfuro de la glutelina aislada puede romperse completamente para remover toda la zeína de la glutelina.

La insolubilidad de la glutelina, y su alto contenido de cistina indican que es un sistema distinto de proteína en el endospermo del maíz, caracterizado por subunidades de péptidos unidos por enlaces disulfuro intermoleculares dentro de una estructura tridimensional.

La extracción con NaOH 0.1M a 25°C., que es el método tradicio

TABLA 1.3.6 ANALISIS COMPARATIVO DE AMINOACIDOS DE LAS GLUTELINAS DE MAIZ NORMAL Y OPACO, SERAPADAS POR VARIOS METODOS (Expresado como mM/16 g N por 100 gramos de proteína)

Aminoácido	Preparación							
	Hidróxido de Sodio				Enzima			
	(I)		(II)		Glutelina natural		Glutelina Alk-Red	
	N	O ₂	N	O ₂	N	O ₂	N	O ₂
Lisina	18	24	21	35	27	32	29	31
Histidina	18	18	21	26	30	32	27	29
Arginina	30	27	28	35	31	33	31	33
Acido Aspártico	49	53	54	66	48	51	49	49
Treonina	34	33	35	39	29	40	35	37
Serina	47	44	47	48	46	43	44	45
Acido Glutámico	131	113	130	121	128	122	122	118
Prolina	73	72	76	72	90	87	96	100
Glicina	62	62	61	70	72	74	67	73
Alanina	79	69	76	74	74	68	70	67
Valina	45	52	44	55	51	54	57	62
Metionina	25	14	25	17	17	19	16	13
Isoleucina	29	27	32	34	31	32	29	30
Leucina	85	71	87	79	82	78	74	74
Tirosina	31	23	30	25	25	23	21	21
Fenilalanina	27	25	24	26	26	25	23	23

(I) Se extrajo previamente la fracción soluble en etanol.

(II) Extracción previa con etanol-acetato

Glutelina Natural. - Se determinó después de la digestión del almidón con alfa-amilasa.

Glutelina Alk-Red. - Glutelina tratada enzimáticamente a la que se redujo con mercaptoetanol y cuyos grupos sulfhídrido fueron alquilados con acrilonitrilo. La extracción se hizo con etanol al 70% (Paulis et al., 1969)

nal de separación de la proteína del endospermo, seguida de diálisis remo
vió el 86% de la glutelina presente.

Gran parte de la glutelina así obtenida fue soluble en agua destilada, lo --
que demusstra que el tratamiento alteró evidentemente la proteína (Nielsen
et al., 1970).

La Tabla 1.3.7 presenta los análisis de aminoácidos de glutelinas
preparadas por varios métodos.

En todas las preparaciones de glutelina, la cantidad de amoníaco
es casi igual a la suma de los residuos glutámico y aspártico, así que es-
tos aminoácidos estan presentes principalmente como residuos de las ami-
das, glutamina y asparagina.

La glutamina y asparagina constituyen alrededor del 20% de los residuos
de aminoácidos de la glutelina del maíz, la prolina constituye poco menos
del 15% de los residuos, y los residuos hidrofóbicos tales como leucina y
alanina constituyen poco más del 40% de los residuos. La titulación ampe-
rométrica demostró que ninguna de las preparaciones de glutelina contenía
grupos sulfhídrido, por ejemplo: cisteina.

La glutelina preparada por el método alfa-amilasa contiene 37 re
siduos de cistina por 100 gramos de proteína. Esta cantidad de cistina es
substancialmene mayor que en las glutelinas preparadas con hidróxido de
sodio ó dimetilaminoetanol, era de suponerse ya que el álcali degrada la --
cistina a un complejo de productos. La gran cantidad de cistina en la glute-
lina es más que suficiente para formar una red tridimensional a través de
enlaces disulfuro, esto se postuló como la razón por la que las glutelinas
no son extraibles sin previa ruptura de los enlaces disulfuro.

TABLA 1.3.7 COMPOSICION DE AMINOACIDOS DE GLUTELINAS PREPARADAS POR DIFERENTES METODOS
(expresada como mM de aminoácidos /100 gramos de proteína)

Aminoácido	NaOH 0.1M	Dimetil- aminoetanol	Método de preparación			Alfa- amilasa
			2-Cloroeta- nol al 30%	Urea + SH	DMSO	
Lisina	14	14	13	18	26	19
Histidina	23	39	12	12	31	28
Amoníaco	167	223	240	212	186	173
Arginina	27	24	18	28	29	28
Aspártico	50	33	49	37	46	44
Treonina		34	30	33	35	35
Serina	54	48	51	48	45	48
Glutámico	168	169	213	158	183	162
Prolina	132	124	68	107	84	126
Glicina	56	63	28	28	68	61
Alanina	97	74	110	81	76	88
Cistina	19	26	10	46	...	37
Valina	50	52	47	51	56	55
Metionina	20	16	17	30	21	20
Isoleucina	29	24	33	23	32	31
Leucina	119	88	124	83	83	101
Tirosina	31	25	33	33	31	30
Fenilalanina	32	22	39	22	32	28

Dimetilaminoetanol 0.2M, Urea + SH (Urea 8M-Mercaptoetano 0.075M), DMSO (Dimetilsulfóxido).
(Nielsen et al., 1970)



Hay variaciones significativas en la composición de aminoácidos de las glutelinas preparadas por varios métodos, y puesto que los procedimientos alfa-amilasa y DMSO separan la mayor parte de la glutelina sin degradación química, la composición de aminoácidos de estas preparaciones sería cercanamente representativa del sistema de glutelina presente en el endospermo intacto del maíz.

La glutelina de la matriz de proteína, preparada por digestión del almidón con alfa-amilasa, no es soluble aun en solventes fuertes de proteína tales como urea 8M y DMSO al 90%.

Los estudios citológicos también han revelado que la glutelina es un sistema distinto de proteína, en los endospermos de maíz maduro. La matriz de proteína, aislada de endospermos de maíz tierno por medio de sedimentación, posee propiedades electroforéticas, solubilidad y composición de aminoácidos bastante similares a las de la glutelina (Wolf et al., 1967).

El gene harinoso - 2 incrementa la fracción glutelina, pero tiene poco efecto sobre la zeína. En granos de mazorcas cosechadas 20 días después de la polinización, las fracciones glutelina de los endospermos de maíz normal, opaco - 2 y harinoso - 2 fueron las más similares en composición total de aminoácidos. La Tabla 1.3.8 muestra la composición de aminoácidos de las glutelinas de los endospermos de maíz normal, opaco - 2, y harinoso - 2 innato e híbrido. Los resultados están expresados como milimoles por 100 milimoles.

El contenido de lisina de la glutelina del opaco - 2 innato no fue

TABLA 1.3.8 COMPOSICION DE AMINOACIDOS DE LAS GLUTELINAS DE LOS ENDOSPERMOS DE MAIZ NORMAL OPACO 2, Y HARINOSO 2, INNATO E HIBRIDO.

Aminoácido	R802 normal	R802 opaco - 2	WF9 X M14 normal	R802X R75 opaco - 2	R802 harinoso - 2
Lisina	4.7	4.7	4.5	5.5	5.5
Histidina	3.5	3.2	4.1	3.7	3.0
Arginina	4.2	4.3	4.0	4.7	4.5
Acido Aspártico	7.3	7.9	7.1	8.2	8.8
Treonina	4.3	4.5	4.5	4.3	4.5
Serina	5.2	5.5	5.2	5.1	5.6
Acido Glutámico	14.1	13.2	14.6	13.0	13.3
Prolina	9.6	9.5	10.5	8.3	8.1
Glicina	8.5	8.8	8.2	8.3	8.0
Alanina	8.6	8.6	8.5	8.7	9.2
Cistina	1.4	0.8	0.6	0.6	0.5
Valina	7.4	7.7	7.3	7.6	7.2
Metionina	1.7	1.8	1.7	1.9	1.4
Isoleucina	4.2	4.4	4.2	4.6	4.5
Leucina	9.1	9.0	9.3	9.2	9.5
Tirosina	2.8	2.7	2.7	2.6	2.9
Fenilalanina	3.3	3.4	3.1	3.7	3.5

(Sodek y Wilson, 1971)

diferente del contenido presente en el maíz normal, mientras que las glutelinas del opaco - 2 híbrido y harinoso - 2 contenían 5.5% de lisina.

Para la composición de aminoácidos libres, albúminas y globulinas sólo se analizaron los maíces normal y opaco - 2 innatos. Las fracciones aminoácidos libres contenían cantidades relativas de aminoácidos que diferían grandemente de aquellas encontradas en los endospermos enteros ó en cualquiera de las fracciones de proteína. Entre los aminoácidos libres hay altos niveles de ácido aspártico, ácido glutámico y prolina, y las dos amidas, las cuales se toman en cuenta como la mayor parte de nitrógeno en esta fracción. En contraste, la leucina, la cual es muy abundante en las proteínas tiene una proporción muy pequeña en la fracción aminoácidos libres.

La composición de las fracciones albúmina y globulina fue similar, tanto en los endospermos de maíz normal como en los de maíz opaco. La Tabla 1.3.9 ilustra la composición de aminoácidos de las fracciones aminoácidos libres, albúmina y globulina.

En 1974, Robutti et al. determinaron la composición proteínica de las fracciones dura y **handa** de los endospermos de granos modificados de maíz opaco - 2.

Los contenidos de proteína de los endospermos de maíz normal, opaco - 2 y variedades modificadas se presentan en la Tabla 1.3.10. Las variedades estudiadas: Compuesto K (Comp. K), Veracruz 181X Antigua Grupo 2 (V181), y CIMMYT O.P. 2 (COP 2), fueron proporcionadas por el CIMMYT.

TABLA 1.3.9 COMPOSICION DE AMINOACIDOS DE LAS FRACCIONES AMINOACIDOS LIBRES, ALBUMINA, Y GLOBULINA DE LOS ENDOSPERMOS DE MAÍZ INNATO R802 NORMAL Y OPACO 2. (milimoles/100 milimoles).

Aminoácidos	Aminoácidos Libres		Albumina		Globulina	
	Normal	Opaco	Normal	Opaco	Normal	Opaco
Lisina	2.5	4.2	5.4	5.6	5.0	5.2
Histidina	0.6	0.8	1.9	1.8	2.0	1.9
Arginina	1.1	1.5	5.3	4.9	5.5	6.0
Acido Aspártico	24.8	25.9	8.2	9.2	8.6	9.3
Treonina	1.2	1.0	5.0	5.4	4.9	4.7
Serina	4.6	4.0	5.6	5.6	5.6	5.3
Acido Glutámico	17.4	21.3	12.3	10.6	11.6	10.9
Prolina	19.6	8.6	6.9	6.6	7.4	6.9
Glicina	4.4	1.9	10.1	10.5	11.3	12.2
Alanina	5.9	2.2	11.0	10.4	10.4	10.7
Cistina		0.3	0.2	1.4	1.2	0.3
Valina	1.1	1.4	7.1	7.6	7.0	7.1
Metionina			1.3	1.3	1.2	1.1
Isoleucina	0.5	0.6	4.4	4.7	4.1	4.7
Leucina	0.6	0.8	9.3	8.6	8.1	7.6
Tirosina	1.7	1.5	2.5	2.6	2.6	3.0
Fenilalanina	1.0	0.9	3.3	3.3	3.6	2.7
Asparagina	7.9	7.2				
Glutamina	4.9	15.9				

Sodek y Wilson, 1971)

Tabla 1.3.10 CONTENIDO DE PROTEÍNA EN ENDOSPERMOS ENTEROS Y SECCIONADOS

Variedad	Proteína del endospermo (% Base seca)		
	Entero	Duro	Blando
Modificado HL1	8.1	8.1	8.2
Modificado NL27	8.2	8.2	8.4
Modificado IIL46	9.5	9.3	9.4
<u>Opaco - 2</u> Comp. K	7.3	..	..
Modificado Comp. K	10.3	10.2	10.1
Normal V 181	9.8	..	..
<u>Opaco - 2</u> V181	8.0	..	..
Modificado V181	9.7	..	..
Normal COP 2	9.7	..	..
Opaco -2 COP 2	8.3	..	..
Modificado COP 2	11.3	..	..

(Robutti et al., 1974)

En las variedades opaco - 2 el contenido de proteína fue menor que en sus contrapartes normales. No obstante, los granos modificados tuvieron contenidos de proteína esencialmente iguales a aquellos de los fenotipos normales. El contenido de proteína, aproximadamente el mismo para las porciones dura y blanda de las cuatro variedades modificadas analizadas.

La composición de aminoácidos de los endospermos enteros de maíz (pelados y degerminados) se muestra en la Tabla 1.3.11.

Hay una pérdida de calidad proteínica en los opacos - 2 modificados, en comparación con el fenotipo opaco - 2, a causa de que la proteína del endospermo modificado es más baja en lisina que la proteína de los endospermos opacos. Los resultados sugieren que los fenotipos translúcidos de opaco - 2 tienen una calidad proteínica menor que aquellos del maíz opaco. Sin embargo, la calidad proteínica de esos fenotipos podría ser tan alta como la de los tipos opacos, ya que los endospermos modificados contienen aproximadamente 2% más de proteína que los endospermos opacos y la lisina por unidad de peso del endospermo sería casi la misma en ambos fenotipos.

El incremento de la cantidad de proteína del maíz, provocado por la fertilización con cantidades excesivas de nitrógeno, no resuelve el problema de escasez de lisina en el grano, ya que el aumento de proteína se registra fundamentalmente en la fracción zeína. Por este motivo resultan superiores las variedades opaco - 2 (alta lisina) sobre las variedades de alto contenido de proteína.

TABLA 1.3.11 COMPOSICION DE AMINOACIDOS (g/100 gramos de proteína) DE LOS ENDOSPERMOS DE LOS FENOTIPOS NORMAL, OPACO - 2, Y MODIFICADO DE LAS VARIETADES V181 Y COMP. K

Aminoácido	V 181			Comp. K	
	Normal	Opaco	Modificado	Opaco	Modificado
Lisina	1.50	3.78	2.96	3.78	3.27
Histidina	2.71	3.66	3.49	3.47	4.15
Amoñaco	2.07	2.23	2.28	1.78	1.81
Arginina	2.70	5.16	4.20	4.81	4.54
Acido Aspártico	5.14	8.91	7.81	9.97	7.65
Treonina	3.03	3.91	3.64	3.84	3.68
Serina	4.52	4.31	4.43	4.26	4.42
Acido Glutámico	21.55	17.38	19.51	20.29	18.68
Prolina	9.55	9.50	9.62	8.98	9.75
Glicina	2.64	4.34	3.92	4.24	4.07
Alanina	7.94	6.07	6.12	6.50	6.06
Cistina	2.73	3.19	4.23	2.36	4.18
Valina	4.53	5.18	5.09	5.22	5.26
Metionina	1.69	1.47	1.13	1.45	1.48
Isoleucina	3.45	3.51	3.31	3.19	3.33
Leucina	15.50	9.58	10.61	8.48	10.21
Tirosina	3.59	3.62	3.48	3.61	3.49
Fenilalanina	5.17	4.17	4.11	3.76	3.95

(Robutti et al., 1974)

1.4. IMPORTANCIA NUTRICIONAL DEL MAIZ OPACO

El maíz opaco - 2 pronto fue puesto a prueba por su importancia en nutrición. Para pruebas en animales, el cerdo resulta útil por su sistema digestivo similar al del hombre y sus conocidas necesidades alimentarias; aprovechando ésto se realizó una prueba a gran escala en 1967 y se encontró que la relación de unidades de alimento requerido por unidad de peso ganado fue sólo 3.3 a 1.0 para maíz opaco (alta lisina) contra 7.0 a 1.0 para maíz normal. En pruebas preliminares encontraron que los cerdos alimentados con maíz opaco crecieron 50% más rápido que aquellos alimentados con maíz normal sin suplemento.

Antes de concluir los estudios con animales se empezaron a hacer pruebas con maíz opaco - 2 en nutrición humana.

Bressani, en 1966, alimentó con una papilla a niños de 3 a 5 años de edad a un nivel de 2 gramos de proteína de maíz por kilogramo de peso del cuerpo, el índice de balance de nitrógeno (Valor Biológico) igualó al de la proteína de la leche descremada al mismo nivel. Cuando la papilla fue alimentada a un nivel inadecuado (1.5 gramos de proteína por kilogramo de peso del cuerpo) su valor biológico correspondiente fue del 90% con respecto al de la proteína de la leche descremada alimentada al mismo nivel de proteína.

En 1967, Pradilla et al. hicieron una serie de pruebas con maíz opaco para el tratamiento de la desnutrición infantil, usaron una dieta previamente probada en animales de laboratorio consistente principalmente de maíz opaco - 2 (alta lisina) con pequeños suplementos protéicos de leche ó vegetales. Sus primeros pacientes fueron dos niños de 5 y 6 años, quienes

sufrían desnutrición en tercer grado y estuvieron bajo cuidados intensivos. Los pequeños habían estado tan severamente desnutridos que su desarrollo antropométrico era inferior al de un niño de 24 meses. Una dieta de maíz les hizo recuperar rápidamente las funciones vitales y después de 70 días mostraron excelente absorción y retención del nitrógeno (citado por Harpstead, en 1971).

Animados por este éxito los investigadores continuaron sus experimentos con buenos resultados, encontraron que la dieta a base de maíz opaco es muy flexible gracias a su aceptabilidad, mayor digestibilidad sobre el maíz normal y su alto contenido de aminoácidos esenciales.

Young et al., en 1971, determinaron digestibilidad, valor biológico y utilización neta de proteína del maíz opaco cultivado en Colombia.

En su experimento 8 estudiantes varones, sanos, que continuaron sus actividades normales durante el período de prueba, fueron sometidos a una dieta libre de proteína durante 3 días para ayudar a la rápida adaptación a las dietas bajas en proteína de la prueba. Este período fue seguido por 10 días durante los cuales recibieron una dieta de prueba a base de maíz entero, a este segundo período siguió otro igual en que fueron alimentados con maíz desgerminado y un último período de 5 días alimentados con la preparación de maíz entero. Se usó la pérdida diaria media de nitrógeno fecal durante los períodos de 10 días para estimar la calidad de la proteína del maíz, comparada con la proteína del huevo. Los valores de 37 y 9 mg de nitrógeno por kilogramo de peso del cuerpo, obtenidos por Young en estudios previos, fueron usados para estimar las pérdidas

necesarias de nitrógeno en orina y heces fecales respectivamente.

La verdadera digestibilidad del opaco - 2 fue alta, correspondiendo un coeficiente de digestibilidad de 92% al maíz entero y 95% al desgerminado comparados con el 96% para proteína de huevo.

Clark et al., en 1967, en estudios de balance de nitrógeno en es-tudiantes, demostraron que 300 gramos de opaco - 2 alimentados diariamente en la forma de sus fracciones molidas en seco (germen y endospermo) mantenían a la mayoría de ellos dentro del balance de nitrógeno.

En otro estudio realizado por Clark y colaboradores, en 1977, se evaluaron tres líneas isogénicas de maíz, normal, opaco - 2 y opaco 2 - dulce 2 a dos niveles de proteína. La prueba se aplicó a 8 jóvenes cuyo promedio de edad fue 23 años, 68.8 kg de peso y 179 cm de estatura.

Las dietas contenían 5.84 g de nitrógeno. El balance diario promedio de nitrógeno fue -0.28 ± 0.34 , 0.31 ± 0.23 y 0.4 ± 0.08 gramos respectivamente, cuando el maíz normal, opaco - 2 y opaco 2 - dulce 2 fueron suministrados a 5.5 gramos de nitrógeno; y -0.07 ± 0.17 , 0.38 ± 0.21 y -0.04 ± 0.25 g cuando el maíz aportaba sólo 4.4 g de nitrógeno y el resto era obtenido de otros alimentos. Aunque estos valores no fueron significativamente diferentes, ambas variedades alta lisina tienden a ser superiores al maíz normal a 5.5 gramos de nitrógeno y el opaco causó mejoramiento aún a 4.4 gramos de nitrógeno. La digestibilidad aparente del opaco - 2 fue 68.8% y del normal y opaco 2 - dulce 2 66 y 65.5% respectivamente.

La calidad de proteína del opaco - 2 con relación a otras proteínas cuya calidad es aceptada como superior se comparan en la Tabla 1.4.1,

TABLA 1.4.1 CALIDAD DE DIFERENTES TIPOS DE PROTEINA

	Cómputo FAO	Valor Biológico
Huevo	100	95
Maíz opaco entero	71	79
Maíz opaco desgerminado	. . .	82
Lecne de vaca	78	74
Soya	73	76
Caseína	80	69

(Buckle, 1972).

se han utilizado como factores de evaluación el cómputo químico (Índice FAO) y el valor biológico obtenido en jóvenes norteamericanos.

Se observa que tanto el maíz opaco entero como el desgerminado presentan un valor biológico similar al de la leche ó la soya y superior al de la caseína.

En comparación directa con la proteína de harina de soya, el PER del opaco - 2 y la harina de soya son iguales por lo que a través de alteraciones genéticas podría obtenerse maíz de calidad proteínica similar a la de la soya.

La Tabla 1.4.2 compara el patrón de aminoácidos del maíz opaco 2 - frágil 2 doble mutante con el patrón de aminoácidos sugerido por la FAO para alimentación infantil.

Si suponemos que el patrón FAO de 5.2% de lisina es el nivel ideal de lisina para los niños, el doble mutante opaco 2 - quebradizo 2 alcanza este nivel. En tanto que el maíz normal contiene alrededor del 52% y el opaco - 2 producido en México tiene generalmente un 38% del nivel ideal. Además, los dobles mutantes eliminan la fracción zeína casi en su totalidad (Misra et al., 1975). No obstante sus ventajas, los dobles mutantes presentan el inconveniente de reducir los rendimientos del grano entero, los cuales serían alrededor del 50% de los correspondientes a los híbridos normales. A causa de esta reducción no se producen dobles mutantes.

Nutricionalmente el maíz opaco - 2 no es un elemento enriquecedor de proteína, debido a su baja concentración de ésta, pero resulta útil

TABLA 1.4.2 PATRON DE AMINOACIDOS FAO COMPARADO CON EL MAIZ DOBLE MUTANTE

Aminoácido	Patrón FAO sugerido para niños	Patrón del endospermo 02 bt ₂
Histidina	1.4%	3.8%
Isoleucina	3.5	4.1
Leucina	8.0	8.3
Lisina	5.2	5.3
Metionina + Cistina	2.9	4.7
Fenilalanina + Tirosina	6.3	10.1
Treonina	4.4	5.5
Valina	0.85	1.3
	<u>4.7</u>	<u>7.0</u>
Total	37.3	49.9

(Mertz, 1974)

cuando se consume en productos a base de maíz ó cuando suplementa proteínas de calidad inferior ó similar como es el caso del trigo.

Dutra de Oliveira y Pereira da Silva, en 1971, reportaron que el valor nutritivo de las mezclas de maíces híbrido y opaco no muestran mejoramiento estadísticamente significativo sobre el maíz híbrido normal hasta que la cantidad de opaco alcanza el 75% de la proteína de la dieta. Por otra parte, todas las mezclas de opaco - 2 y harina de trigo muestran mejor calidad que el trigo solo, cuando son fuentes únicas de proteína en la dieta.

Según la Tabla 1.4.1 puede considerarse adecuado un valor de 70 para el índice FAO, podría entonces aspirarse a buscar el nivel de suplementación que produzca el índice más cercano a ese valor.

A partir de un 30% de substitución (Tabla 1.4.3) se empiezan a obtener índices FAO superiores a 60, el nivel de 70 se obtiene al 50% de substitución. Los niveles de proteína se mantienen entre 9.8 y 11.9%, que aunque son bajos resultan adecuados para alimentos de consumo popular.

En Colombia, utilizando harinas crudas, sémola y harinas precocidas de maíz opaco como ingredientes en la producción de arepas (tortillas), pan y pastas alimenticias a los niveles indicados en la Tabla 1.4.4 se observó un notable aumento de calidad proteínica en los productos a base de maíz opaco - 2 ó suplementados con él.

Se estima que aproximadamente el 20% de la población de los países en desarrollo está desnutrida, y alrededor de un 60% está mal nutrida. Este es el caso de México donde el maíz, dada su escasa calidad proteica, no cubre las necesidades nutricionales mínimas (Villegas, 1972).

TABLA 1.4.3 CALIDAD DE PROTEINA EN MEZCLAS DE TRIGO Y OPACO

Mezcla	Composicion		Proteína Total(%)	Indice FAO
	Trigo	Maíz opaco		
A	100%	. . . %	11.9	47
B	90	10	11.7	52
C	80	20	11.5	56
D	70	30	11.3	61
E	60	40	11.1	66
F	50	50	10.9	70
G	40	60	10.6	73
H	30	70	10.4	73
I	20	80	10.2	72
J	...	100	9.8	71

(Buckle, 1972)

TABLA I. 4. 4 EL MAÍZ OPACO-2 COMO INGREDIENTE EN ALIMENTOS DE CONSUMO POPULAR

Producto	Ingredientes		Proteína total (% b. h.)	Calidad de proteína Cómputo FAO
	Otros	Maíz opaco		
Arepa	Maíz común	. . .	5.9 (+++)	42 (+)
Arepa	...	100%	5.9 (+++)	70
Pastas de harina mixta	Trigo 50%	Harina 50%	9.3 (++)	70
Pastas comerciales	Trigo 100%	. . .	11.1 (++)	47
Pan	Trigo 100%	. . .	9.6 (++)	47
Pan de harina mixta	Trigo 80%	Harina 20%	9.3 (++)	56
Pan de harina mixta	Trigo 70%	Harina 30%	9.1 (++)	62

(+) Proteína del huevo \neq 100

(++) Base húmeda (20% de humedad)

(+++) Base húmeda (40% de humedad)

(Buckle, 1972)

El consumo nacional total de maíz es de aproximadamente 12 millones de toneladas anuales, de las cuales el 80% está destinado a consumo humano, y el 60% es esencialmente de autoconsumo (Betanzos, 1975). En el medio rural el maíz llega a constituir hasta un 70% de las fuentes calóricas y la principal de proteína. Chávez, en 1972, sugirió una correlación inversa entre ingreso y consumo de maíz; las poblaciones más pobres consumen proporcionalmente mayor cantidad, mientras que las de mayor nivel socioeconómico consumen una dieta más variada reduciendo así el consumo de maíz.

Los efectos mejoradores del gene opaco - 2 sobre la calidad proteínica del maíz, y su importancia en la prevención de mal nutrición, han sido demostrados en múltiples ocasiones, algunas de ellas ya citadas. De aquí que resulte importante fomentar el cultivo de variedades de maíz con el gene opaco - 2 principalmente entre los pequeños agricultores, cuya producción es casi en su totalidad de autoconsumo. Esto tendría la ventaja de mejorar la calidad de la ingesta diaria de proteína sin alterar la dieta básica de los sectores de menor ingreso.

1.5 METODOLOGIAS ACTUALES DE PROCESAMIENTO DE MAIZ.

Los primeros reportes arqueológicos calculan al maíz silvestre una antigüedad de 7000 años, de 1500 a 2000 años después fue domesticado y ha llegado a ser un cultivo básico, principal fuente de calorías y proteínas, para vastas poblaciones de México y Centroamérica (Mangelsdorf et al., 1964).

En México, el maíz se consume fundamentalmente en forma de tortillas, para cuya elaboración es sometido a un tratamiento térmico-alkali-

no tan antiguo como la domesticación del mismo, llamado nixtamalización (Nextli, ceniza o cal y tamalli, masa de maíz .

Cocer maíz en agua de cal para hacer tortillas y tamales. El licor de cocción se denomina Nejayote; de Nextli, ceniza y áyoh, caldo o cosa aguada).

El proceso de nixtamalización mejora el valor nutricional del maíz, pero simultáneamente reduce su contenido total de nutrientes (Bressani et al., 1958; Katz et al., 1974).

Katz formuló una hipótesis acerca del uso de la nixtamalización, y tratamientos alcalinos en general, en todas las civilizaciones cuya fuente principal de alimentación es el maíz, en contraste con otras culturas que no practican la nixtamalización y por ello el maíz no representa el cultivo más importante, y la mayor fuente de proteína de la dieta. Sugiere, además, que el efecto antagónico de la leucina sobre la conversión de triptofano a niacina es reducido por el aumento de isoleucina, y que el aumento en la relación isoleucina a leucina provocado por la cocción alcalina ayudaría a minimizar los efectos de la deficiencia de niacina que inducen a la pelagra.

El cambio positivo en la calidad nutricional del maíz sometido al proceso de nixtamalización resulta probablemente de una disminución relativa de la solubilidad de la porción zeína de la proteína del maíz.

Cuando los datos se expresan en base a gramos de aminoácido por 100 gramos de maíz, indican que en las tortillas hay una reducción absoluta de la mayoría de los aminoácidos esenciales, con excepción de lisina; no obstante la conservación de lisina resulta inesperada a causa de las pérdidas considerables de nitrógeno total durante el proceso de cocción.

A pesar de que las tortillas son un alimento básico en México y otros países latinoamericanos, la tecnología tradicional aplicada a su elaboración es totalmente empírica y no ha sufrido cambios apreciables.

Recientemente se han tratado de optimizar las condiciones del proceso de nixtamalización, variando tiempos de cocción, concentraciones de Cal y relación de agua (Bazúa et al., 1977).

Proceso Mecanizado

El proceso industrial en los molinos de nixtamal se inicia con la limpieza del maíz a través de cribas o harneros, para llevarlo después a ollas o tinas con capacidades entre 450 y 750 kg (6 a 10 bultos de 75 kg) y adicionarle la cal hidratada o viva en proporción de 10 gramos por cada kilogramo de maíz y cubrirlo con agua caliente a una temperatura de 90 a 93 °C; a continuación se mezcla en forma manual o mecanizada durante 8 a 15 minutos, con una paleta se voltea el maíz hasta 6 veces seguidas con un intervalo de media hora de reposo después de las cuatro primeras. En seguida el nixtamal se mantiene en reposo de 2 a 3 horas, dependiendo del volumen y calidad del maíz y posteriormente se elimina con agua limpia toda la cal excedente, en la etapa conocida como lavado, Cuando se pone "nixtamal caliente", que significa moler inmediatamente después de la nixtamalización, debe bajarse la temperatura del nixtamal a menos de 40°C mediante suministro de agua fría. De lo contrario la masa presentará una consistencia pegajosa no apta para la elaboración de tortillas.

En la molienda mecanizada del nixtamal predomina el uso de piedras volcánicas, cuyos diámetros fluctúan entre 6 y 14 pulgadas, y cuya picadura se ubica todavía en los rangos de una verdadera labor de artesa nía. Los bancos de molienda se accionan con motores eléctricos ó de com bustión interna, variando su potencia entre 5 y 30 caballos, según el diámetro de las piedras a utilizar y el volumen de materia prima a procesar; pero en todo caso este no sobrepasa los 556 kg de maíz por hora.

De maíz a masa de nixtamal se obtienen rendimientos entre 1700 y 1900 kg por tonelada, según la calidad de la materia prima.

Proceso de Fabricación de Harina de Maíz Nixtamalizado.

En 1950, surgió la fabricación de harina de maíz nixtamalizado co mo respuesta al problema de conservación de la masa de nixtamal que en unas cuantas horas ya no es adecuada para el consumo humano y, como producto del que pueden adquirirse los volúmenes que se desee y prepararse cada vez sólo en la cantidad requerida, conservándose el resto en buen estado aun en climas extremosos.

A distinta escala, el proceso de producción de harina es similar al que emplean en los molinos de nixtamal desde la limpieza hasta la mo lienda, con la salvedad de que en las plantas a gran escala han sustituido las tinas por cocedores de flujo continuo y las más recientes construídas por CONASUPO han incorporado la peletización del nixtamal mediante ex trusión en la etapa posterior al lavado para disminuir el tiempo de secado.

En términos generales el proceso podría describirse como sigue:

1. El maíz pasa por una limpiadora con el objeto de eliminar olotes,

Copia 1

tamo y otras impurezas. En caso de que contenga más de 13% de humedad y deba almacenarse antes de entrar a producción, se elimina el excedente por medio de una secadora.

En esta etapa se registra la merma provocada por limpieza y bo dega que representa la disminución de humedad y retiro de impurezas.

2. El maíz limpio se pesa y envía a los cocedores en donde se lle va a cabo la maceración, agregando agua en presencia de cal. El nixtamal así producido se desintegra en molino de impacto. La merma que tiene lugar en esta etapa está representada por las impurezas flotantes y sólidos solubles que se eliminan en el nejayote y agua de lavado.
3. El producto molido pasa a través de un secador a fin de reducir el grado de humedad; posteriormente, y antes de pasar a los cernidores, la harina se sujeta a un tratamiento de enfriamiento. En esta etapa de deshidratación y enfriamiento la merma que ocurre se identifica con la eliminación de agua y polvos.
4. Una vez que pasa por los cernidores, la harina es enviada a una tolva de almacenamiento, de donde se transporta al área de envasado y empaque (CONAIM, 1976).

En cuanto a la calidad del producto, éste debe cumplir las especificaciones establecidas por la norma oficial DGN:

Especificaciones Químicas

Humedad Máxima	10% (al envasar)
Cenizas	2%
Proteínas mínimas	7.5%

Fibra cruda máxima	3%
Extracto étereo	5%
Lignina	reacción negativa

Especificaciones Físicas

1. Las tortillas deberán resistir la prueba de doblado, es decir, al doblarse no deberán formar grietas.
2. La finura de la harina será tal que el 85%, como mínimo, pasará a través de una malla 60 (250 micrones).

El rendimiento de maíz a harina es alrededor de 950 gramos por kg de materia prima.

El rendimiento de masa varía de 2.2 a 2.25 kg de masa por kg de harina y el de tortillas es del orden de 1.7 kg de tortillas por kg de harina.

En el proceso tradicional de nixtamalización el rendimiento de tortillas es del orden de 1.45 kg de tortillas por kg de maíz.

La rancidez normalmente no se presenta, a menos que la harina sea empacada a altas temperaturas. La duración de la harina antes de descomponerse es de 4 a 6 meses en invierno y de 3 meses en verano. Esto no representa problema, ya que la duración promedio de la harina en los anaques es de 15 días y su tiempo máximo en los mismos antes de perder su calidad es de un mes (Del Valle, 1972).

Entre las principales ventajas de la harina sobre la masa de nixtamal, destacan las siguientes:

1. La nixtamalización en grandes cantidades permite aprovechar el hollejo, ya que con una lixiviación más corta y efectiva se optimizan los efectos de temperatura, pH y agitación, obteniéndose un nixtamal apropiado y reduciéndose las pérdidas de vitaminas, proteínas y almidones a un 0.8% en peso del maíz contra 3.5 a 4% que normalmente se pierde en los molinos de nixtamal.
2. El sistema de flujo continuo proporciona un cocimiento uniforme, en el grado estrictamente necesario y bajo control absoluto, que puede variarse en cualquier momento, de acuerdo con la calidad y tipo de maíz que se utilice.
3. La peletización del nixtamal facilita un secado uniforme, con la menor cantidad posible de unidades de calor y sin merma alguna del producto por pérdidas en el aire.
4. La deshidratación a alta temperatura da por resultado un cocimiento perfecto del aceite y una mejor gelatinización del almidón, con lo que aumenta la absorción de agua del producto y su rendimiento.
5. La molienda con martillos permite altas escalas de producción, y la posibilidad de moler "pelets" en lugar de una masa húmeda elimina prácticamente la recirculación de partículas gruesas y uniforma la granulometría, con economía en consumo de energía y en mantenimiento de equipo.

Adicionalmente, hay que señalar que las fábricas de harina pueden producir desde 4 hasta 15 toneladas de maíz por hora, lo que significa una productividad entre 20 y 350% mayor que la de los molinos de nixtamal.

La transformación de maíz a tortilla a través de harina representa un aumento del 58% en el consumo de energía eléctrica y el 11% en consumo de energía calorífica, estos aumentos son compensados con la disminución en los siguientes consumos: 14% de maíz, 35% de cal hidratada y 16% de agua con respecto al proceso de transformación a través de masa de nixtamal.

Proceso alternativo

Como alternativa a los procesos de nixtamalización y fabricación de harina de maíz nixtamalizado se plantea, en este trabajo, el proceso de extrusión.

» La extrusión es una operación definida generalmente como el acto de texturizar o cocer un material al forzarlo a través de una boquilla o dado. La cocción por extrusión aprovecha el calor generado tanto por fricción del producto con las paredes del tubo y el tornillo como el calor que se suministra por medio de vapor o energía eléctrica en algunos tipos de extrusor cocedor. Este equipo había sido usado tradicionalmente en la industria de los plásticos para fundirlos y, al calentarlos modificar su estructura y su forma por medio de diferentes boquillas de salida. Los extrusores usados inicialmente en la industria de alimentos siguieron este patrón y se han utilizado para procesar harina de frijol soya, tratando de texturizarlo simulando fibras de músculo y obtener substitutos de la carne.

Un extrusor simple consta de una tolva alimentadora que conduce el material al canal del tornillo. Este es accionado por un motor a través de un

reductor de velocidad, y en algunos modelos, el tornillo está apoyado en el otro extremo sobre un cojinete de baleros. El tamaño de los extrusores está dado por el diámetro interno del barril. Los tamaños más comunes son 1, 1 1/4, 2, 2 1/4, 3 1/4, 3 1/2, 4 1/2, 6 y 8 pulgadas y su capacidad varía entre 5 y 1000 lb/hr para 1 y 8 pulgadas respectivamente.

La tolva alimentadora varía dependiendo del tipo de material, en algunos casos es necesario otro tornillo alimentador para tener un flujo constante de material al extrusor.

El tornillo o gusano es el corazón del extrusor. Su función es transportar la materia prima y enviarla a la boquilla a un gasto constante. En casi todos los diseños de tornillos el área seccional del canal disminuye conforme se llega al dado o boquilla para compensar el cambio de densidad global y diferencias en la eficiencia de transporte del material sólido (crudo) y derretido (cocido).

El barril ofrece una de las superficies para impartir los esfuerzos cortantes al material. Sirve además como superficie de transferencia de calor, ya sea para enfriar o para calentar. La relación de longitud a diámetro en los extrusores es una variable de diseño muy importante que depende del tipo de material a extruir y su rango varía de 10:1 a 25:1.

Los extrusores pueden ser impulsados por motores eléctricos, y recientemente se han desarrollado modelos que pueden ser accionados con el motor de un tractor. Esto es particularmente práctico porque permite su uso en regiones carentes de energía eléctrica. Por este motivo se propone la posibilidad de producción de una harina de maíz, con propiedades similares a

las de la harina de maíz nixtamalizado, que pueda conservarse largo tiempo en bolsas de polietileno sin problemas de rancidez. A nivel rural ésto reduciría considerablemente el tiempo de preparación y las labores de molienda en equipos tan rústicos como el tradicional metate.

→ En la Figura 2, aparecen algunas de las ventajas del proceso de extrusión de harinas de maíz normal y opaco sobre otras metodologías aplicadas a la elaboración de tortillas.

En el proceso tradicional de nixtamalización se requiere un tiempo de 20 horas para la elaboración de tortillas y un consumo de agua de 8:1 respecto a la cantidad de maíz procesado. Además, arrastra parte de los nutrientes del grano.

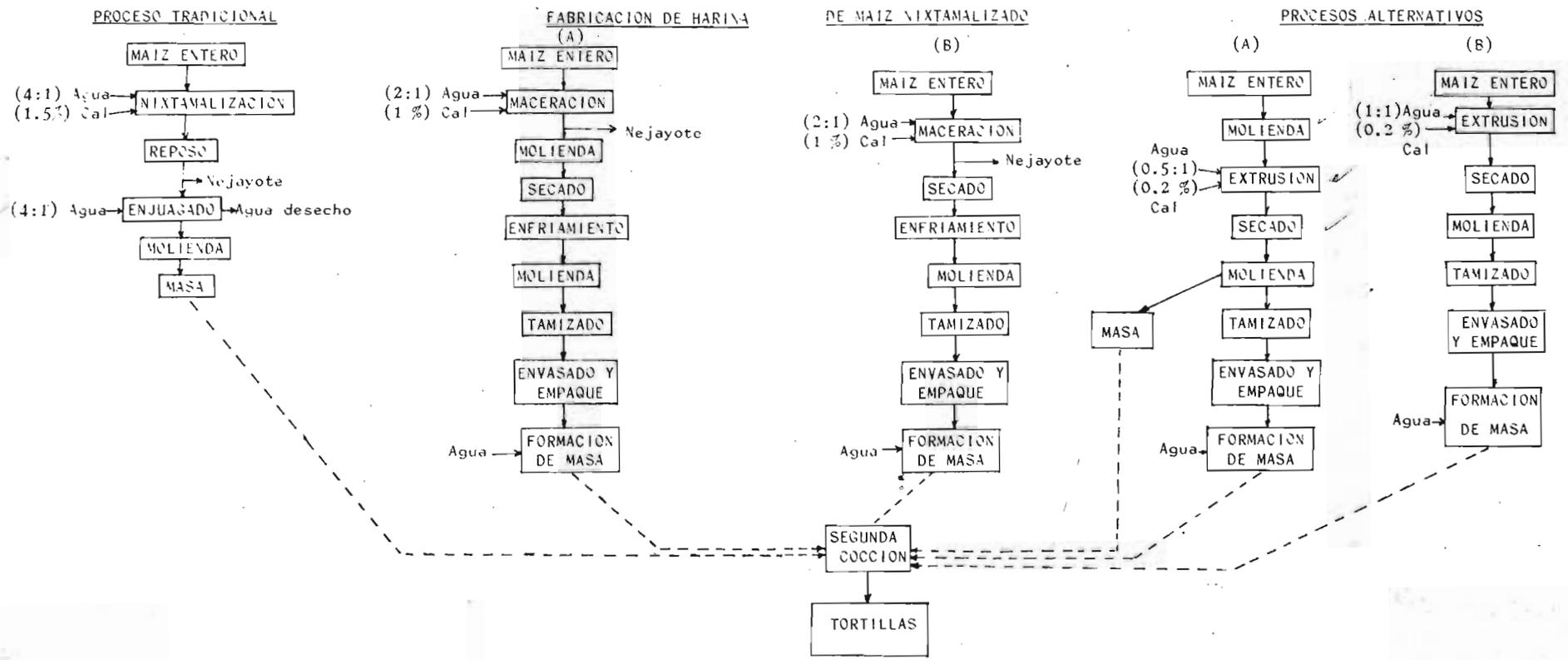
No obstante, que en el proceso de fabricación de harina de maíz nixtamalizado se reducen las pérdidas de nutrientes, y permite mayor aprovechamiento del hollejo debido a una lixiviación más corta, persiste aún el problema de eliminación del nejayote.

En el proceso de extrusión el tiempo necesario para elaboración de tortillas se reduce a 3 horas, también se reduce el consumo de cal y agua. Otra ventaja sería el posible mejoramiento de la calidad nutricional del producto, ya que no hay pérdida alguna de nutrientes en agua de desecho porque no existen efluentes en el proceso, lo cual elimina toda posibilidad de contaminación por efluentes con una alta demanda biológica de oxígeno (BOD). Además, el breve tiempo de residencia en el extrusor provoca menor destrucción de los elementos nutricionales sensibles al calor.

DBO
P60

FIGURA 2. Comparación entre el proceso de extrusión y los procesos

actuales de nixtamalización.



Otra característica relevante del proceso de extrusión es que puede implementarse tanto para nivel urbano como para nivel rural. A nivel urbano con las ventajas anotadas antes sobre el proceso de fabricación de harina de maíz nixtamalizado y, en este caso el extrusor podría ser impulsado por un motor eléctrico. En las zonas rurales, donde se carece de energía eléctrica, podrían utilizarse los modelos diseñados para operar impulsados por un motor de combustión interna.

Como desventajas del proceso pueden anotarse:

1. Introducción de una nueva tecnología.
2. Sólo se ahorra la tercera parte de la energía total consumida.

2.- DESARROLLO DE LA TECNOLOGIA

El proceso de extrusión, cuya aplicación estuvo inicialmente limitada a la industria de los plásticos, resultó ser un método económico de gelatinización de cereales. Los primeros productos alimenticios extruídos fueron pastas, para las cuales simplemente se mezclaba harina de semolina con agua y/o vapor y se pasaba a través de una boquilla a alta presión. Posteriormente el proceso de extrusión ha demostrado su vasta aplicación dentro de la industria alimentaria debido a la gran cantidad de ingredientes, texturas, formas y densidades de productos que es capaz de procesar.

La cocción casi instantánea es alcanzada bajo una operación continua que provoca un daño mínimo a los elementos nutricionales sensibles al calor. El extrusor actúa como un cocedor continuo a presión, y la humedad no se evapora hasta que la presión es liberada en la boquilla. Puede ser controlado sobre un amplio rango de condiciones de proceso y es un convertidor suficientemente eficiente de energía eléctrica o mecánica a energía térmica, además de tener características útiles como secador.

2.1.- METODOLOGIA DEL PROCESO DE EXTRUSION

La Figura 3, ilustra las operaciones que se realizan en una planta de cocción por extrusión. La metodología de este proceso incluye las siguientes etapas:

1. Molienda de la materia prima.
2. Un medio ininterrumpido de alimentación de la materia prima en forma granular o de harina, o mezclas de materias primas, a velocidades controladas.

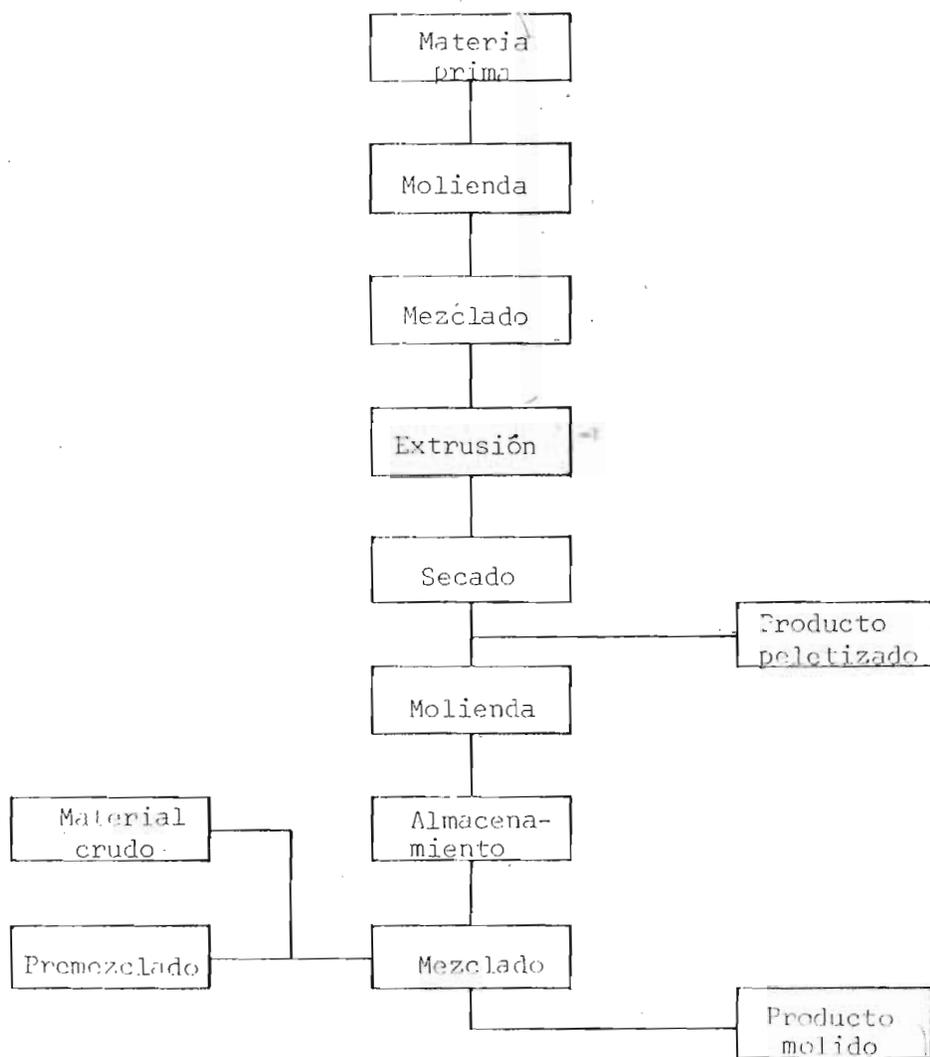


Fig. 3 Diagrama de bloques de una planta de extrusión típica para alimentos balanceados.

(De Muelenagre y Buzzard, 1969).

3. Un método de preacondicionamiento de los materiales que entran, mediante vapor a temperatura moderada y cuidadosamente controlada (82-99° C) y presión atmosférica. Algunos materiales no requieren este preacondicionamiento.
4. Un método de aplicación uniforme de humedad como vapor y/o agua.
5. Un arreglo configurado particular del extrusor para la cocción de cada producto, y diseñado para trabajar materiales humedecidos convertidos en pastas y transportar estas pastas a través de todo el extrusor a temperatura moderada, excepto en la sección final del extrusor, (sección de cocción).*
6. Un medio de elevar óptimamente la temperatura de la masa a la temperatura deseada de extrusión (normalmente 171 a 176° C) y convertir la masa de una pasta amorfa a una estructura coloidal.

→ El calor puede ser suministrado en alguna de las tres formas siguientes, o combinación de ellas:

- a) La fricción generada por esfuerzo cortante de la flecha actuando sobre la masa.
 - b) Vapor vivo inyectado dentro de la masa plastificada.
 - c) Suministro externo de calor por medio de calentadores en el barril y la flecha. Este calentamiento externo es provisto por calentadores eléctricos o por chaquetas de vapor.
7. La formación del extrudato al tamaño y forma deseada a través de una boquilla final, y el medio de cortar el extrudato expandido en segmentos del tamaño requerido.
 8. El secado y enfriamiento del producto extruído a la humedad y temperatura precisa en un secador enfriador diseñado para los productos procesados.

* Cuando los materiales no han sido preacondicionados con vapor, los rangos de temperatura en el extrusor son menores que cuando han sido preacondicionados.

2.2. EQUIPO IDEAL

→ Un extrusor ideal deberá cumplir con las siguientes condiciones de diseño y construcción:

1. Que no contamine.
2. Fabricado de metales no corrosivos ni tóxicos, con superficies lisas que no posean cavidades donde el producto pueda acumularse y degradarse.
3. Preferiblemente que las partes que tienen contacto con el alimento sean de acero inoxidable.
4. Si se inyecta vapor o agua para preacondicionamiento del producto las válvulas deberán ser de acero inoxidable y diseño higiénico.
5. Los lubricantes no serán tóxicos.
6. El extrusor debe ser fácilmente desarmable para su limpieza e inspección. Que una vez removida la boquilla, la flecha sea capaz de extraer todo el material que permanece dentro del extrusor (Williams, 1977).

2.3 CLASIFICACION DEL EQUIPO DE EXTRUSION

Los extrusores de alimentos pueden clasificarse en dos formas; de acuerdo a su comportamiento termodinámico y por la forma en que se desarrolla la presión.

Termodinámicamente pueden clasificarse en los siguientes grupos:

1. Extrusores autógenos (casi adiabáticos) que generan su propio calor por conversión de energía mecánica en el propio proceso de flujo. No requieren chaquetas intercambiadoras de calor.
2. Isotérmicos. Se mantiene la temperatura constante mediante enfriamiento para remover el calor generado por la conversión de energía mecánica.

3. Politrópicos. Operan entre las condiciones extremas autógenas e isotérmicas. Todos los extrusores de alimentos son de este tipo, pero algunos tienden más hacia las condiciones autógenas y otros a las isotérmicas.

Los extrusores son ante todo un tipo de bomba que impulsa a los materiales a través de una boquilla. El aumento de presión se debe a la resistencia al flujo presentada por la boquilla y cambios en la geometría del tornillo. La profundidad entre barril y tornillo o la configuración ("pitch") de la hélice del tornillo pueden disminuir en la dirección del flujo (Harper y Harman, 1973).

De acuerdo a la manera en que se genera la presión los extrusores pueden ser:

1. Tipo desplazamiento directo o positivo. Este tipo de extrusores incluye el extrusor tipo pistón y el extrusor de doble tornillo.
2. Tipo indirecto o de flujo viscoso. Este tipo de extrusores modifican las características del producto extruído.

2.4. DISEÑO IDEALIZADO DE LOS EXTRUSORES

Los elementos importantes de un extrusor de tornillo simple se presentan en la Figura 4. El material es alimentado desde una tolva a la garganta de alimentación, de donde se dirige al canal del tornillo.

El material al ser transportado a lo largo del canal está también sujeto a mezclado, calentamiento y esfuerzo.

Casi no existe información acerca de los cambios reológicos y químicos que ocurren durante la extrusión de alimentos. La teoría relativa al proceso se ha desarrollado en base a los plásticos debido a que las propiedades de los alimentos son más complejas y difíciles de definir. No obstante, se superan

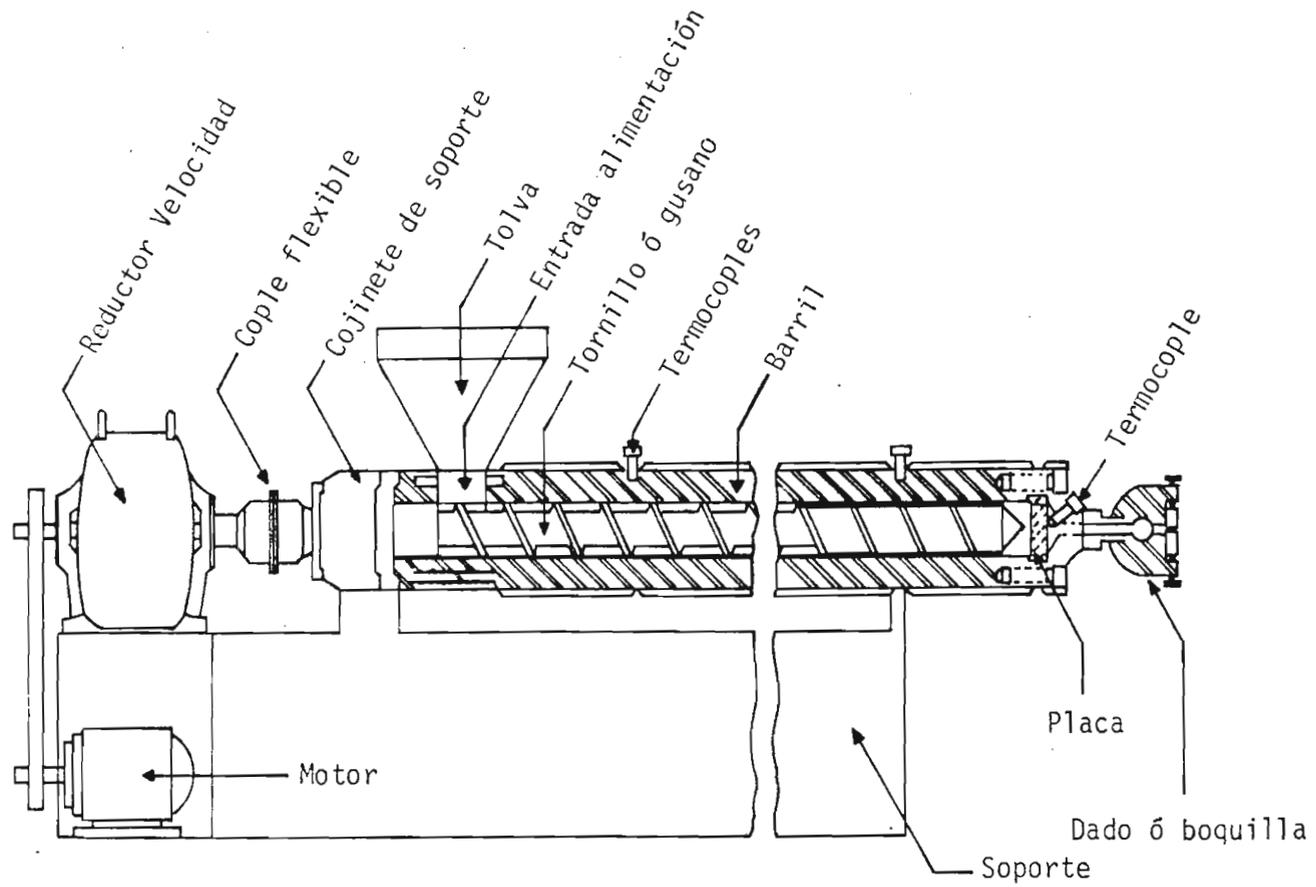


Figura 4. Elementos de un extrusor (Bernhardt, 1974)

estas limitaciones usando varios criterios simplificados en el análisis de la operación de extrusión:

1. El producto es un fluido Newtoniano.
2. El extrusor es isotérmico y por ésto no hay cambios de viscosidad.
3. La geometría del tornillo es simple y constante a través de su longitud.

Al respecto, Harper y Harman proponen una configuración diferente para el tornillo, en la que distinguen una sección de alimentación, una de transición y una sección de extrusión o cocción como tal, conocida en inglés como "metering section". Estas secciones están determinadas por el diámetro del tornillo y el barril.

4. El barril se ajusta estrechamente sobre el tornillo.
5. La zona de alimentación se desprecia en el análisis.

Bajo estas suposiciones puede derivarse un modelo idealizado del diseño y operación de un extrusor de tornillo simple (Figura 5). Esta simplificación no ofrece un diseño seguro, pero permite predicciones cualitativas para resolver los problemas que se presentan en la extrusión de alimentos.

A pesar de los criterios usados, las ecuaciones generales derivadas bajo estos supuestos pueden aplicarse para predecir la respuesta de las condiciones de proceso a los cambios en las variables de operación.

Zona de alimentación. La función de esta zona es comprimir el material y transportarlo a la zona de cocción. Las ecuaciones para las zonas de alimentación de los extrusores de polímeros se basan en la suposición de que el material alimentado forma un lecho sólido que se desliza a lo largo del canal en forma rígida. El análisis del modelo idealizado desprecia esta zona (Rossen y Miller, 1973).

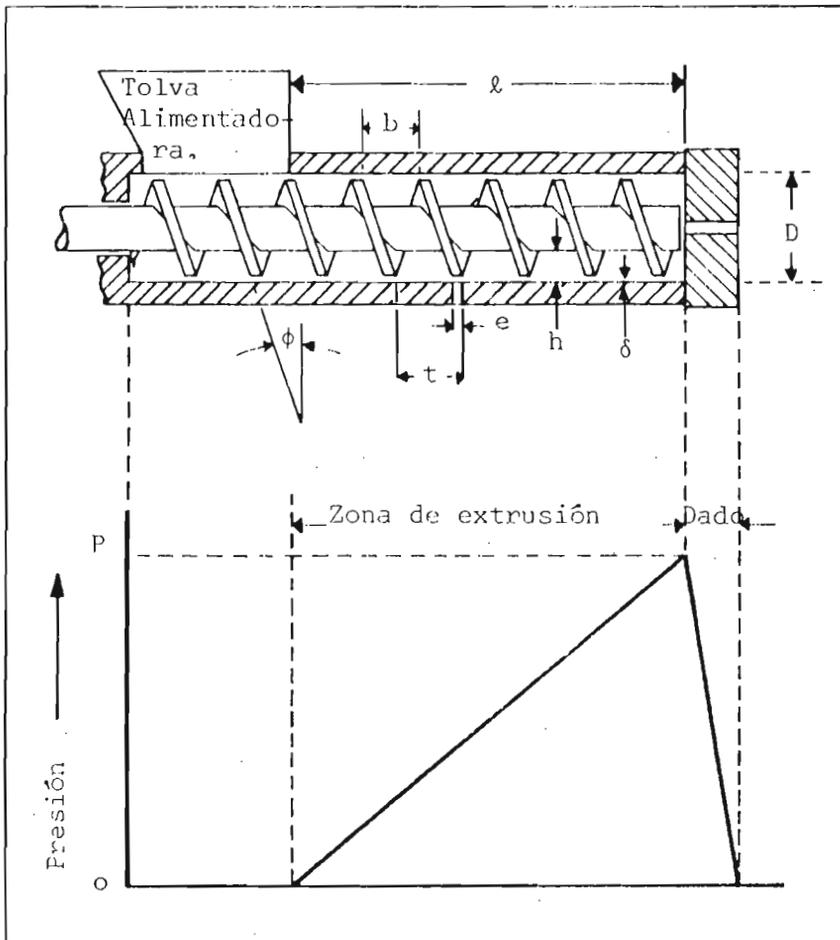


Fig. 5 Modelo ideal de diseño y operación de un extrusor de tornillo simple.

(Borren y Miller, 1973)

Harper y Harman (1973), consideran una zona de transición entre la zona de alimentación y la de cocción que involucra flujo en dos fases. Han observado que cuando se alimentan al extrusor materiales alimenticios sólidos hay un comportamiento similar a la fusión de los plásticos dentro del extrusor. La fusión ocurre en la superficie del barril y en una delgada película entre el lecho sólido y el que fluye al pozo de fusión de la parte posterior de la hélice.

Zona de cocción o "metering section". Esta sección es quizá la más importante del extrusor. Su función es recibir el material comprimido, homogeneizarlo y hacerlo pasar a través de la boquilla a presión constante. La homogeneización está acompañada por mezclado intensivo de los flujos longitudinal y transversal del canal.

El tratamiento matemático de esta zona supone que el material actúa como un verdadero fluido, exhibe deformaciones al esfuerzo y no se desliza en las superficies del tornillo y el barril. Esta sección del extrusor se comporta como una bomba centrífuga, con la capacidad de bombeo relacionada inversamente a la presión de bombeo.

El mecanismo de este efecto de presión puede describirse separando el flujo neto del extrusor en dos componentes ficticios denominados flujo de arrastre y flujo de presión.

$$Q_{\text{neto}} = Q_a + Q_p \quad (1)$$

Q_{neto} = flujo neto

Q_a = flujo de arrastre

Q_p = flujo de presión

Flujo de arrastre. El componente longitudinal del flujo es denominado flujo de arrastre por las razones que se ilustran en la Figura 6. La velocidad del barril con respecto al tornillo (v_b) puede dividirse en dos componentes. El componente en la dirección longitudinal al canal (v_a) es el responsable del flujo por arrastre. El componente transversal al canal (v_c) no afecta directamente el flujo, pero contribuye al mezclado y corte.

La distribución de velocidad del material en la dirección longitudinal al canal aparece también en la Figura 7. La velocidad varía de cero, en la superficie del tornillo, a v_a en la superficie del barril. La velocidad del flujo de arrastre es proporcional a la velocidad promedio en el canal, y se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_a = \alpha N \quad (2)$$

donde:

$$\alpha = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 h \left(1 - \frac{ne}{t}\right) \sin \phi \cos \phi \quad (3)$$

Q_a = flujo de arrastre

N = velocidad del tornillo en revoluciones/tiempo

D = diámetro del barril

h = profundidad del canal

n = número de canales paralelos del tornillo

e = espesor de la hélice

$t = \pi D \tan \phi$

ϕ = ángulo de la hélice del tornillo

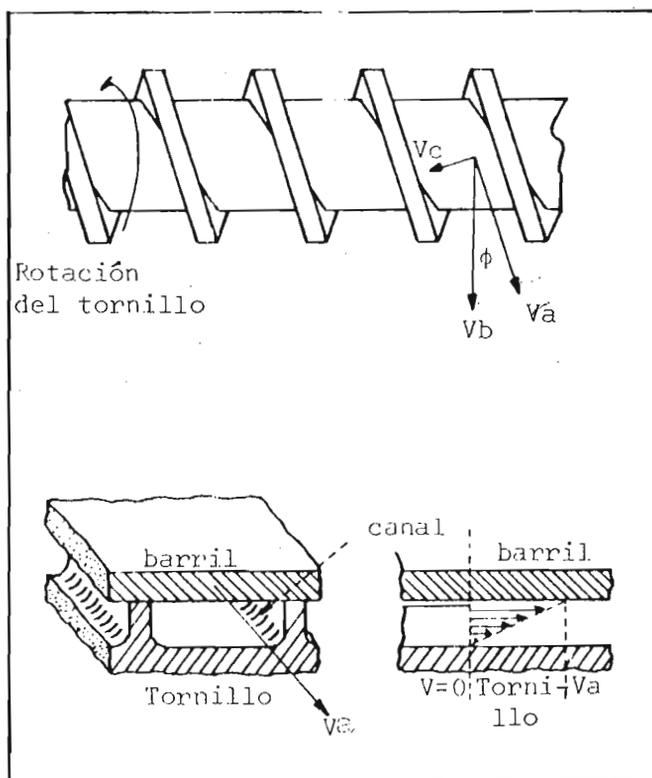


Fig. 6 Componentes del flujo de arrastre.

Componentes de flujo	Perfil de Velocidad	Ecuación
Flujo de presión		$Q_p = -\frac{B\rho}{\mu l}$
Flujo de arrastre Q_a		$Q_a = aN$
Flujo neto Q_{Neto}		$Q_{\text{Neto}} = aN - \frac{B\rho}{\mu l}$

Fig. 7 Distribución de velocidad del material en la dirección longitudinal (Rossen y Miller, 1973).

De las ecuaciones 2 y 3 puede verse que el flujo de arrastre depende sólo de la velocidad y geometría del tornillo, y es independiente de la presión y viscosidad. Sin embargo, el enfriamiento tiende generalmente a retardar el flujo de arrastre y reducir la salida de material. El calentamiento del tornillo incrementa el flujo de arrastre, y cuando éste es mayor que el flujo de presión se incrementa la salida de material.

Flujo por presión. El componente del flujo debido a presión puede visualizarse imaginando un tornillo estático donde fluye el material en dirección inversa al extremo de descarga a alta presión. Como en cualquier situación de flujo, la velocidad de flujo es proporcional al gradiente de presión a lo largo del tornillo, e inversamente proporcional a la resistencia (viscosidad y geometría del tornillo). Una ecuación que relaciona estas variables es (Bernhardt, 1974, p. 175):

$$Q_p = - \frac{\beta}{\eta} \frac{\Delta P}{L} \quad (4)$$


donde $\Delta P/L$ es el gradiente de presión, β es una constante y η la viscosidad del material. Los factores de tamaño y forma para la geometría del tornillo están contenidos en β :

$$\beta = \frac{1}{12} \pi D h^3 \left(1 - \frac{nc}{L}\right) \sin^2 \phi \quad (5)$$

para cada extrusor, β es constante y el flujo por presión depende solamente del gradiente de presión y de la viscosidad.

Flujo neto. La velocidad de distribución del flujo neto puede esquematizarse por superposición de las distribuciones individuales de los flujos de arrastre y de presión. En el ejemplo de la Figura 7, un gran flujo por presión ha creado una área de velocidad negativa cerca del tornillo. En realidad este

flujo, de dirección inversa, crea corrientes de conglomerados de moléculas (eddies) que contribuyen al mezclado y corte.

La boquilla. La presión en el extrusor ideal alcanza un máximo en el extremo del tornillo, y cuando el material pasa a través de la boquilla hay una caída de presión hasta la presión atmosférica. La velocidad de flujo a través de la boquilla es función de la viscosidad, geometría de la boquilla (resistencia) y caída o gradiente de presión como lo ilustra la siguiente ecuación (Bernhardt, 1974, p. 249):

$$Q_{\text{boquilla}} = k \frac{\Delta P}{\eta}$$

donde:

Q_{boquilla} = flujo de material a través de la boquilla

ΔP = gradiente de presión

η = viscosidad de la alimentación

k = constante de la boquilla (función de su geometría)

La boquilla tiene como función principal dar la forma y el tamaño deseados al producto extruído. Para los fines del presente trabajo no se ha considerado necesario el uso de esta sección, ya que sólo se pretende obtener una harina precocida.

2.5. CARACTERISTICAS DE OPERACION

La etapa de preacondicionamiento, en la cual la temperatura se eleva a 93° C aproximadamente y el contenido de humedad a un 25%, contribuye poco a la cocción del material. La cocción tiene lugar en la cabeza del extrusor, donde la energía friccional generada por el motor se convierte en calor. Este

aumento de calor en el material que pasa a través del extrusor es equivalente a la potencia gastada por éste.

El incremento de temperatura en la cabeza del extrusor puede expresarse como sigue (De Muclenaere y Buzzard, 1969):

$$T = \frac{(KVA) \times (K)}{M_{\text{sól}} C_{p \text{ sól}} + M_{\text{líq}} C_{p \text{ líq}}} \quad (6)$$

donde:

KVA = potencia requerida por el extrusor

K = constante para convertir KVA a energía calorífica

$M_{\text{sól}}$ = flujo de material seco

$C_{p \text{ sól}}$ = calor específico del material seco

$M_{\text{líq}}$ = flujo de humedad (agua)

$C_{p \text{ líq}}$ = calor específico del agua

La Ecuación 6 establece que la temperatura alcanzada durante la extrusión depende de la potencia requerida, el flujo de material sólido y el contenido de humedad del material que entra al extrusor. Si el flujo es constante, la temperatura alcanzada será proporcional a la potencia gastada.

Se ha encontrado en la práctica que para una área de boquilla dada, la potencia requerida varía casi linealmente, salvo pequeños cambios ($\pm 10\%$), con el flujo alrededor del punto de control. Esto significa que una vez seleccionada la boquilla las propiedades de un material extruído específico están también fijadas, e independientemente del flujo, en tanto que la relación potencia requerida/flujo permanezca constante.

Por ésto, la selección del área de boquilla resulta del balance entre las ventajas económicas de un alto flujo obtenido con boquilla grande y el grado mínimo de cocción necesario. Este último está determinado también por el tamaño de partícula del material alimentado al extrusor (Anderson et al., 1969; Spadaro et al., 1971).

El flujo del extrusor depende del contenido de grasa del material que se extruya. Materiales con alto contenido de grasa se extruyen a flujos altos y bajos contenidos de humedad. Este efecto podría ser causado por el aumento de lubricación dentro del extrusor, y da por resultado menores temperaturas de extrusión.

El mismo efecto lubricante puede conseguirse por adición de agua a la entrada a la cabeza del extrusor; pero aunque atractivo económicamente, tiene la desventaja de que el grado de cocción alcanzada se reduce. El flujo puede minimizarse por reducción del área de boquilla pero tiene un efecto limitante, el alto ~~contenid~~ contenido de grasa o humedad de los materiales hace que el área de boquilla llegue a ser demasiado pequeña y no permite una operación libre de problemas.

La presión generada en la dirección del eje del tornillo no es grande hasta que el material es forzado contra la placa del fondo, en donde está localizada la boquilla. Puede, por ésto, suponerse que la mayor parte de la cocción ocurre en la zona comprendida entre el extremo del tornillo y la placa del fondo, y que el tiempo de cocción a alta temperatura será igual al tiempo de residencia en esta zona (de 2 a 3 segundos aproximadamente en el Sprout Waldron), por lo que la rapidez de transferencia de calor será un factor limitante.

Cuando el material extruído abandona la boquilla se expande violentamente con la evaporación instantánea ("flasheo") de las fracciones volátiles, la cantidad perdida de éstas está controlada por la temperatura de extrusión. La evaporación provoca un rápido enfriamiento del producto, que conduce a la desnaturalización de proteínas (i.e. inhibidores de tripsina, etc.).

Posterior a la expansión hay una contracción del material a su diámetro de equilibrio, la expansión inicial no parece estar relacionada a la composición del producto y es causada por la transición de alta presión dentro del extrusor, a las condiciones ambientales.

El diámetro de equilibrio, por lo general, es considerablemente menor que el obtenido inicialmente y varía con la composición del producto y la evaporación de fracciones volátiles.

Un balance de calor del producto durante la expansión podría expresarse como (De Muclenaere y Buzzard, 1969):

$$M_{fv} \lambda = M_{sól} C_{p sól} + M_{líq} C_{p líq} \quad (7)$$

donde:

M_{fv} = masa de la fracción vaporizada

λ = calor latente de vaporización

$M_{sól}$ = flujo del material seco

$C_{p sól}$ = calor específico del material seco

$M_{líq}$ = flujo de humedad (agua)

$C_{p líq}$ = calor específico del agua

La caída de temperatura del producto extruído debida la evaporación instantánea ("flasheo") del vapor será como sigue:

$$\Delta T_{\text{ev. inst.}} = \frac{M_{\text{vf}} \lambda}{M_{\text{sól}} C_{\text{p sól}} + M_{\text{líq}} C_{\text{p líq}}} \quad (8)$$

2.6. VENTAJAS DE LA COCCION POR EXTRUSION

1. El proceso es muy versátil. Bajo las mismas condiciones básicas de higiene, más los ingredientes apropiados, puede producirse una ~~gan~~ entera de productos alimenticios (con o sin suplementos proteínicos) como cereales para desayuno, alimentos granulados instantáneos, bebidas en polvo, alimentos infantiles, proteínas vegetales texturizadas, harinas precocidas, etc.

Con diferentes variables de proceso puede producirse una amplia variedad de alimentos para animales, ganado, peces y animales de laboratorio.

2. La gelatinización de cereales o almidones (ruptura de moléculas a través de una combinación de humedad, calor, presión y esfuerzo mecánico) por extrusión da como resultado una mayor absorción de agua en el producto extruído. Dicha absorción mejora la digestibilidad y disponibilidad calórica del producto (Smith, 1974).

Para la gelatinización de almidones no es importante dar forma al extrudato, la cocción será controlada simplemente con el fin de obtener características específicas de gelatinización o dextrinización. Un alto contenido de humedad y baja temperatura producen un grado medio de gelatinización, mientras que una baja proporción de humedad y alta temperatura conducen a un alto grado de gelatinización y dextrinización de algunos almidones (Williams, 1977).

Los almidones gelatinizados por extrusión son capaces de ligar microingredientes (vitaminas, minerales, colores, sabores, etc.) uniforme e irreversiblemente a través del extrudato. Además, las características de solubilidad

y textura de los carbohidratos cocidos por extrusión pueden adaptarse sobre un extenso rango.

3. Puede modificar histológicamente y reestructurar los concentrados de proteína para producir proteínas vegetales texturizadas.

La brevedad del período de cocción en los sistemas HT/ST ("High Temperature - Short Time") significa menor destrucción del contenido vitamínico que en cualquier otro método de cocción.

4. Los productos cocidos por extrusión tienen excelentes características bacteriológicas, están libres de larvas, patógenos o salmonela con lo que su vida de anaquel es superior a la de productos elaborados por otros métodos.

5. El tratamiento HT/ST es menos nocivo para el valor proteínico de los alimentos que el secador rotatorio, particularmente en la etapa final del proceso, cuando el bajo contenido de humedad provoca una considerable reducción de la lisina disponible.

6. Los alimentos precocidos por extrusión, además de eliminar el prolongado tiempo de preparación, logran una considerable economía en combustible sobre todo en lugares donde no se dispone de gas o electricidad. Existen modelos como el Brady Crop 206 que pueden ser impulsados por un motor de combustión interna.

7. Puede controlar los inhibidores del crecimiento encontrados en la soya, siendo el principal el inhibidor de tripsina. La tripsina es una enzima proteolítica necesaria en la digestión para catalizar la síntesis de aminoácidos en el tracto digestivo.

Las hemaglutininas son los componentes tóxicos de los inhibidores crudos encontrados en la soya (algunas veces llamadas lectinas, fitohemaglutininas o soyinas), tienen la capacidad de aglutinar los glóbulos rojos y son a menudo específicas para un grupo sanguíneo particular.

Además del inhibidor de tripsina y las hemaglutininas existen otras sustancias que ejercen deterioro fisiológico sobre el hombre y los animales: saponinas, el factor bociógeno, un factor anticoagulante, un factor diurético y la lipoxidasa. Esta última oxida y destruye los carotenos.

La lipoxidasa es también la enzima que liga los ácidos grasos, y protege contra la peroxidación que se desarrolla exclusivamente sobre los lípidos libres de la masa. De aquí que la lipoxidasa necesite ser controlada, pero en forma tal que permita aprovechar su propiedad de enlazar grasas y ligar proteínas de soya entera cuando se combinan con harinas de cereales para su extrusión simultánea.

La lipoxidasa es esencialmente sensible al calor por lo que resulta difícil su control, con la inactivación de la lipoxidasa se destruye el sabor amargo de la soya. Para compensar la inactivación de la lipoxidasa, y la consecuente pérdida de su propiedad de ligar ácidos grasos, se emplean emulsificantes que en mezclas con harina de soya permiten usar mayores cantidades de esta harina en el pan, sin pérdida de volumen en la hogaza ni presencia de lípidos libres que rápidamente desarrollen olores rancios.

Se han recomendado como agentes emulsificantes el estearil 2 lactilato de calcio y el estearil 2 lactilato de sodio.

8. Pueden cocerse ingredientes individuales o mezclas, lo que reduce

el costo de labor y procesado, además del peligro de contaminación que existe cuando los productos son cocidos separadamente y después mezclados.

9. En el proceso de cocción por extrusión no hay efluentes ni otros residuos del proceso.

10. Requiere espacios limitados por toneladas de capacidad de producción, y un arreglo adecuado de los componentes del sistema reducirá las necesidades de labor por toneladas de producto.

11. Los extrusores-cocedores consumen menos energía total por tonelada de producto que otros métodos de cocción, y son termodinámicamente eficientes.

12. La mano de obra requerida es menor que en otros sistemas de cocción.

13. El proceso tiene una gran capacidad de producción.

14. Se obtienen diferentes formas, densidades y texturas de productos (chiclosos, blandos, quebradizos, flexibles, firmes, crujientes, etc.) con cambios mínimos en las condiciones del proceso.

Además de la selección de ingredientes y aditivos para impartir las características deseadas a los productos, hay otros factores que afectan las texturas, densidad, sabor, solubilidad y forma. Estas variables de proceso incluyen:

- i. El método de preacondicionamiento de los ingredientes y/o mezclas.
- ii. El tipo y punto de aplicación de la humedad.
- iii. Control de pH de los ingredientes o mezclas.
- iv. Control de temperatura y contenido de humedad de los productos que entran al extrusor.

- v. Control de temperatura en cada sección del extrusor.
- vi. Control del punto en el que se obtiene la máxima viscosidad de la masa.
- vii. Control de las velocidades de extrusión.
- viii. Control de las relaciones tiempo/temperatura en cada sección del extrusor.
- ix. Control del período durante el cual las temperaturas del producto se elevan a las máximas temperaturas de extrusión.
- x. Control de las temperaturas finales de extrusión.
- xi. Selección de la forma y tamaño de los componentes del sistema.
- xii. Las boquillas se seleccionan para dar forma al extrudado pero afectan también la textura del producto final.
- xiii. Selección del tipo, tiempo de residencia y temperatura del secador, así como las velocidades en éste y en el enfriador. Selección de las humedades deseadas en el punto final.
- xiv. Punto y método de aplicación del sabor.

2.7. DESVENTAJAS DE LA COCCION POR EXTRUSION

1. Los extrusores procesan solamente harinas o materiales granulares. Puede añadirse al sistema de molienda como parte complementaria, aunque con pérdidas de eficiencia (debidas al mayor esfuerzo cortante requerido), capacidad y flexibilidad en la gama de texturas.

2. En mezclas que contienen proteínas de leche se observa una mayor destrucción de lisina que en otros productos, por lo que requieren ser cocidos en el menor de los rangos disponibles de temperatura de extrusión, es decir 100 a 135° C, para una óptima utilización biológica de la proteína.

3. Algunas de las vitaminas microencapsuladas pueden premezclarse con los cereales antes de la cocción y mostrar poca pérdida de estabilidad vitamínica, probablemente debido a la brevedad de los períodos a alta temperatura (12 a 20 seg.) en un sistema HT/ST; pero ciertas vitaminas, particularmente la vitamina C, presentan pérdidas excesivas durante el proceso. Podrían aplicarse externamente después de la extrusión y secado del producto.

4. No ha sido posible destruir el inhibidor del crecimiento "gossypol" encontrado en la semilla de algodón (Smith, 1974).

2.8 EFECTOS DE LOS CEREALES SOBRE LA TEXTURA

Algunas características de los cereales modifican la textura del producto obtenido. A continuación se presenta un somero análisis de ellas.

1. Desde el punto de vista de la textura, el gluten es el componente estructuralmente importante de las proteínas, confiere las propiedades de elasticidad y retención de gas. Durante la cocción por extrusión hay un marcado aumento en volumen del gluten; las proteínas son desnaturalizadas y los filamentos proteínicos son estirados mientras conservan su estructura básica similar a un enrollamiento. La tendencia a encogerse de la condición distendida es alcanzada en el momento en que las proteínas pasan a través de la boquilla final de extrusión.

2. Si el gluten es el componente estructuralmente importante de las proteínas, los carbohidratos deben ser considerados como unidades estructuralmente análogas que se repiten. De los carbohidratos, los almidones son la porción mayor y estructuralmente la más importante.

3. En productos cocidos por extrusión, las grasas o aceites pueden ser usados por sus propiedades lubricantes de manera diferente a su función en la elaboración de pan. En productos extruídos el aumento en la cantidad de grasa reduce la temperatura de extrusión.

La grasa divide y liga a las enzimas, las cuales son desnaturalizadas o desactivadas durante la extrusión. Esto imparte la estabilidad oxidativa a los lípidos en el extrudato (Smith, 1974).

2.9. EVALUACION DE PRODUCTOS EXTRUIDOS

La primera evaluación nutricional de un producto extruído destinado a consumo humano fue realizada por Mustakas y colaboradores, en 1964. El producto en cuestión era harina de soya entera que suministraría proteína de alto valor biológico.

En el sistema desarrollado para la cocción de harina de soya entera, los objetivos fueron: a) obtener una harina de soya con un alto valor biológico, b) cocer la soya de una manera apropiada para inactivar los inhibidores del crecimiento sin afectar el valor biológico de la proteína, o la solubilidad de ésta en el producto, c) elaborar un producto agradable y libre de ese sabor amargo propio de la soya, d) hacer un producto con vida de anaquel adecuada que no requiera refrigeración, e) encontrar estándares aceptables de higiene bacteriológica y contaminación, f) desarrollar un proceso económico que pueda llevarse a cabo con un mínimo de labor y equipo.

El contenido de lisina disponible de la harina extruída, expresado como porcentaje de proteína, se comparó favorablemente con el de harinas

comerciales de soya entera. La inactivación de inhibidores del crecimiento se reflejó a través de pruebas para inhibidor de tripsina y actividad de ureasa. Uno de los efectos del tratamiento térmico sobre la soya procesada comercialmente es reducir la tiamina y niacina a niveles muy bajos; la comparación de estas vitaminas antes y después de la extrusión indicó poca destrucción del contenido original de vitaminas.

En 1969, Anderson y colaboradores aplicaron el proceso de extrusión para producir una mezcla nutritiva propuesta por los programas de la AID (Agency for International Development) llamada CSM que contenía harina precocida de maíz, harina de soya, sólidos de leche descremada, vitaminas y minerales. Esta mezcla se comparó con otra de la misma composición producida en un secador de tambor. Se encontró que el proceso de extrusión era adecuado y podía substituir al método que usaba secador de tambor.

En pruebas realizadas sobre harina comercial de maíz amarillo, la gelatinización fue evaluada por medición de absorción de agua, solubilidad en agua, consistencia de suspensiones acuosas y modelo amilográfico de viscosidad. El índice de absorción de agua (Water Absorptive Index, WAI) es el peso del gel obtenido por gramo de muestra seca y es usado para medir el poder de hinchamiento del almidón. Como índice de la solubilidad en agua (Water Solubility Index, WSI), se emplea la cantidad de sólidos secos recuperados por evaporación del sobrenadante de la prueba de absorción de agua, expresada como porcentaje de sólidos secos en la muestra (2.5 gramos).

Las partículas de menos de 14 mallas recibieron un tratamiento inadecuado durante la extrusión. La velocidad de alimentación también fue muy

importante; a altas velocidades el material fue subprocesado. Figura 8.

De Muelenaere y Buzzard, en 1969, compararon dos tipos de extrusores, el Wenger y el Sprout Waldron, con los secadores de tambor para maíz desgerminado. Los extrusores probados operan con el mismo principio general, la diferencia fundamental entre ellos es la manera en que se alimentan con el material preacondicionado.

Con el Sprout Waldron el preacondicionamiento es alcanzado por medio de vapor de alta presión; la materia prima es alimentada en un tanque a presión mediante un transportador de tornillo de diámetro decreciente que comprime y empuja el material contra la placa del fondo del extrusor. El tiempo de residencia en el preacondicionador puede variar de 2 a 8 min. En el Wenger X - 25 el material es conducido dentro del extrusor por un transportador de tornillo de velocidad variable. Antes de que el material entre al extrusor se le inyectan vapor vivo y agua caliente. La operación completa se lleva a cabo a presión ambiente y la materia prima no se comprime, ni está sujeta a esfuerzo cortante, antes de alcanzar la cabeza del extrusor.

La diferencia en las viscosidades alcanzadas a 95°C , de 650 ± 50 U.B (Unidades Brabender) y 2100 U.B. para materiales procesados por extrusión y en secador rotatorio respectivamente, podrían explicarse por el hecho de que el esfuerzo cortante ejercido por la acción del tornillo del extrusor destruye parte de las moléculas de almidón. Este efecto es de gran valor en la producción de alimentos instantáneos porque permite que el producto sea gelatinizado totalmente sin tener que afrontar los problemas de aglutinamiento que frecuentemente se presentan en materiales gelatinizados en secadores

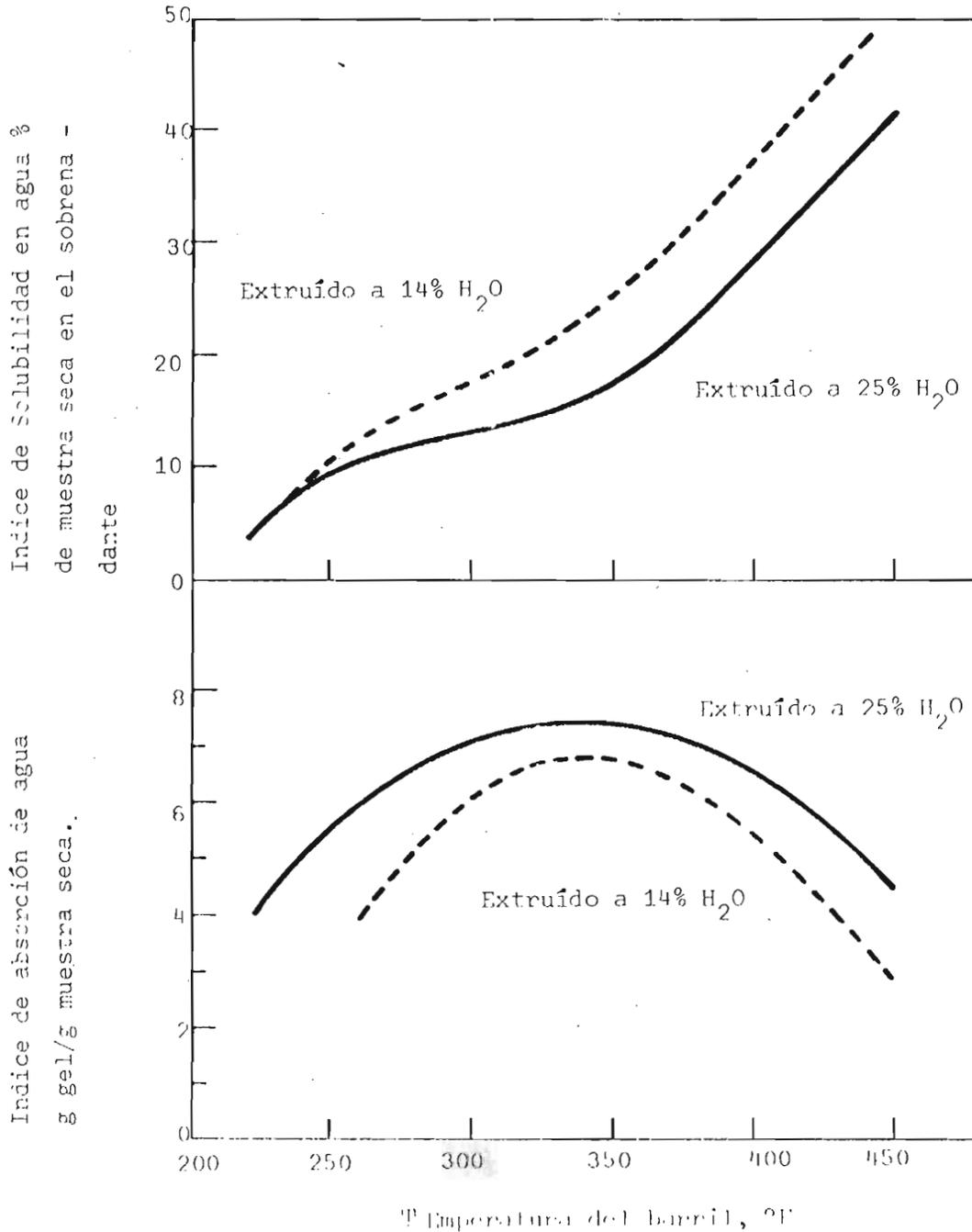


Fig. 8 Indices de solubilidad en agua (A) y absorción de agua (B) para harina de maíz cocida por extrusión (Anderson et al., 1969).

La Figura 8 presenta los resultados de pruebas en que la harina de maíz fue extruida en un extenso rango de temperaturas.

rotatorios.

El grado de cocción no varió significativamente al cambiar el preacondicionamiento, lo que confirma que la cocción ocurre en la cabeza del extrusor principalmente.

El tratamiento corto tiempo- alta temperatura fue muy efectivo no sólo en la cuenta total de bacterias sino también en la destrucción completa de E. Coli. En la Tabla 2.9.1 se hace una comparación entre la cuenta de bacterias de mezclas de cereales ricas en proteína extruídas en el Sprout Waldron y Wenger X - 25.

Aunque la materia prima esté grandemente contaminada, la cocción por extrusión destruye prácticamente todos los microorganismos.

El Sprout Waldron destruye el inhibidor de tripsina con el mismo efecto que la autoclave, aunque el grado de destrucción depende de las condiciones bajo las cuales sea operado el extrusor. Una potencia demasiado baja y la consecuente generación limitada de calor ocasionarán menor destrucción.

La destrucción de vitaminas durante la extrusión en el Sprout Waldron se ilustra en la Tabla 2.9.2. Se da también el porcentaje de destrucción de vitaminas resultante de 2 minutos a ebullición con agitación continua de un producto similar a la mezcla extruída (42 g/ 284 ml H₂O).

Los efectos relativos al procesamiento en Sprout Waldron, Wenger y secador rotatorio sobre la disponibilidad de lisina de mezclas ricas en proteína se presenta en la Tabla 9.2.3.

La mayor destrucción de lisina (28%) se presenta en un producto que contiene leche descremada, extruído a través del Sprout Waldron. El efecto

TABLA 2.9.1. CUENTA BACTERIOLOGICA DE UNA MEZCLA DE CEREALES RICA EN PROTEINA COCIDA EN EXTRUSORES SRPOUT WALDRON Y WENGER.

	Antes	Después	
		Sprout Waldron	Wenger
Coliformes/100 g	1600	negativa	2
Staphylococcus	positiva	negativa	negativa
Streptococcus no hemolíticos	positiva	negativa	negativa
E. Coli	positiva	negativa	negativa
B. lactic aerogenes	positiva	negativa	positiva
B. subtilis	positiva	positiva	positiva
Salmonella	negativa	negativa	negativa

(De Muelenaere y Buzzard, 1969)

TABLA 2.9.2. PORCENTAJE DE DESTRUCCION DE VITAMINAS DURANTE LA COCCION POR EXTRUSION DE UNA MEZCLA MAIZ/SOYA/CACAHUATE COMPARADA CON LA DESTRUCCION QUE TIENE LUGAR EN UN PERIODO DE 2 MINUTOS A EBULLICION.

Vitaminas	% Destrucción (Extrusión)	% Destrucción (2 min. a ebullición)
Vitamina C	33.4	78.6
Niacina	2.8	6.2
Vitamina A	52.5	24.9

(De Muelenaere y Buzzard, 1969)

TABLA 2.9.3. EFECTO DE LA EXTRUSION SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE LISINA.

Muestra	Tratamiento	Lisina disponible g/100 g de proteína	% Destrucción de lisina
Soya entera	Ninguno	5.32	0
	Wenger	5.34	0
Mezcla soya- leche en polvo-	Ninguno	4.43	0
	Sprout Waldron	3.19	28
Soya desgrasada	Ninguno	4.31	0
	Wenger	4.19	3
Maíz -sorgo	Sprout Waldron	3.76	13
	Secador rotatorio	3.46	20

(De Muelenaere y Buzzard, 1969)

de destrucción de aminoácidos parece estar fuertemente relacionado con la cantidad de azúcares reductores presentes. Con cantidades moderadas adicionales de leche en polvo descremada aumentan grandemente las pérdidas de lisina, probablemente debido a la intensificación de la reacción de Maillard resultante de la alta concentración de azúcares (Matz, 1975).

Sabiston; Stromnacs y Kennedy (1957) observaron que la reducción de la eficiencia de proteína, en pan de trigo y arroz, provocada por este efecto era alrededor de 20% con respecto a los ingredientes no horneados. Las pérdidas de lisina se incrementan conforme aumentan los tiempos de horneado, he aquí una ventaja de los productos precocidos por extrusión sobre los productos elaborados tradicionalmente.

En 1970, Mustakas y colaboradores determinaron inactivación de inhibidores de tripsina en harina de soya entera, a 120°C esta inactivación es significativamente menor que a 135 o 148°C.

En 1971, Bookwalter y colaboradores elaboraron tortillas, pan de maíz y pescado empanizado utilizando mezclas de harinas de maíz con harina de soya entera y desgrasada, éstas últimas procesadas por extrusión. Por otra parte, Conway y Anderson (1973) aplicaron el proceso de extrusión a mezclas de harina de maíz amarillo enriquecidas con soya.

Posteriormente, en 1974, Bookwalter y colaboradores ampliaron sus estudios y compararon maíz rico en lisina con maíz normal (variedades opaco - 2 Funk 25410 y amarillo dentado Schwenk 211) y encontraron que la cantidad de lisina disponible antes y después de la extrusión permanecía esencialmente constante. Además de lisina disponible, se determinaron

también los índices de absorción de agua y de solubilidad en agua propuestos por Anderson et al. en 1969 (Tabla 2.9.4).

Los experimentos fueron llevados a cabo en un extrusor Wenger X-5, a temperaturas de 138 a 149 °C., a 0.7 gal/hora de agua, 60 lb/hora de materia prima y boquilla de 1/8 de pulgada.

Bajo las mismas condiciones de cocción, aparentemente los almidones del híbrido rico en lisina gelatinizan en mayor grado que los del maíz amarillo dentado. Además, el maíz rico en lisina presentó mejores propiedades de amasado y textura, así como un volumen de hogaza ligeramente mayor que el pan elaborado con maíz normal.

Mercier y Feillet, en 1975, estudiaron temperaturas de extrusión y contenido de amilosa en el producto. Los resultados obtenidos fueron que todos los almidones de cereales presentan un máximo de expansión a temperaturas de 170 a 200 °C. La cantidad de almidón soluble se incrementa con la disminución de la temperatura de extrusión, y del contenido de humedad del producto antes de la extrusión. En un estudio preliminar se observó que las condiciones de secado del maíz antes de la extrusión no afectan apreciablymente las características del producto extruido.

A partir de 1975, Crowley desarrolló un nuevo tipo de extrusor, el -- Brady Crop Cooker que opera como un extrusor seco, esto es, no requiere vapor para acondicionar el grano. Además consta de dos gusanos, uno que -- sirve como molino y el otro que lleva a cabo la cocción por fricción. Este tipo de extrusor ha sido probado por Lin y Cater (1975), en la inactivación de

TABLA 2.9.4. PROPIEDADES DE LAS FRACCIONES DE MAÍZ PROCESADAS POR EXTRUSION

Fracciones	Antes de la cocción			Después de la cocción		
	WAI	WSI	Lisina disponible (g/16 g N)	WAI	WSI	Lisina disponible (g/16 g N)
Maíz alta lisina						
Partículas de la 1a. 2a. y 3a. rupturas	2.2	1.0	3.3	2.9	50.9	3.2
Harina gruesa de bajo contenido de grasa	2.2	1.3	3.4	3.6	40.3	3.0
Harina fina de bajo contenido de grasa	2.2	1.0	3.5	3.8	38.1	3.4
Finos del degerminador	2.2	1.4	3.8	2.6	51.7	3.8
Maíz dentado amarillo						
Partículas de la 1a. 2a. y 3a. rupturas	2.1	1.4	1.9	5.3	23.2	1.9
Harina gruesa de bajo contenido de grasa	2.3	1.4	2.4	5.2	27.6	2.4
Harina fina de bajo contenido de grasa	2.4	1.4	3.0	4.6	30.8	2.7
Finos del degerminador	2.7	3.8	2.6	5.8	27.7	2.6

WAI = Índice de absorción de agua, gramos de gel/g de muestra

WSI = Índice de solubilidad en agua. % de solubles

(Bookwalter et al., 1974).

la enzima lipasa, presente en el salvado del arroz, principal responsable de la hidrólisis del aceite para formar ácidos grasos libres y causa de rancidez de los productos. Los resultados de esta evaluación fueron satisfactorios y se notó también una resucción en la capacidad de absorción de agua que puede contribuir indirectamente a la estabilidad del salvado cuando éste se almacena en condiciones húmedas.

Los extrusores secos son operados con motores de tractor ó usando una flecha especial, conocida como PTO, ("Power Take Off Unit") que permite moler y cocer el grano sin necesidad de corriente eléctrica. El uso de estos últimos ha sido impulsado por agencias gubernamentales norteamericanas en países en vías de desarrollo.

3.- OPTIMIZACION DE LA PRODUCCION.

Los experimentos realizados hasta ahora sobre optimización de las variables del proceso de extrusión han estado enfocados principalmente - habia la obtención de alimentos texturizados ricos en proteína, como es - el caso de la soya texturizada en forma de carne. Por este motivo se propone al presente encontrar las condiciones de proceso más adecuada para extrusión de harinas, tanto de maíz normal como de opaco, y que ocasionen un detrimento mínimo a la calidad nutricional de éstas.

3.1- ANTECEDENTES.

En 1970, Mustakas y colaboradores realizaron estudios con soya a fin de obtener harina de soya entera de alta calidad. La optimización de las condiciones de extrusión se limitó entonces a tres criterios:

- 1.- Destrucción de inhibidores del crecimiento, indicada a través de actividad de ureasa, inhibidor de tripsina e índice de solubilidad de nitrógeno del producto.
- 2.- Estabilidad oxidativa, medida en forma de valores peróxido (meq/Kg- de aceite).
- 3.- Sabor, evaluado por medio de prueba organoléptica en una escala de 10 puntos.

Criterios:

Rango de Aceptación:

Actividad de ureasa

0.05-0.15 aumento de PH

Valor peróxido

20 meq/Kg ó menos

Marca de sabor

6 ó mayor

Las relaciones de eficiencia proteica (Protein Efficiency Ratio, - - PER) observadas en ratas de cuatro semanas confirmaron los resultados

químicos. Los valores de PER mejoraron progresivamente cuando los niveles de inactivación del inhibidor de tripsina fueron superiores al 89 %.

La Figura 9 presenta el contorno de respuesta, ó isograma, para cada una de estas variables obtenido con los datos de 24 corridas.

La región designada como área 1 satisficé los tres criterios de optimización puesto que sus rangos de aceptación caen en esta zona. La temperatura de operación podria limitarse entre 120 y 140 °C y el intervalo de tiempo de residencia por humedad de 38 a 47.

3.2 MATERIAL, EQUIPO Y METODOS.

El desarrollo experimental de este trabajo estuvo dividido en dos etapas. En la primera fase de la experimentación se trabajó con maíz normal (Compuesto Tlaxcala), maíz opaco - 2 (Compuesto Bajío B- 74 R) con endospermo 100 % opaco y soya procedentes del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. El equipo empleado entonces fue un molino Super - Line de la Mitsubishi Electric Corporation, tipo SCL- NR y un máximo de 1930 RPM (Figura 11); y dado que no se contaba con un extrusor, estas pruebas preliminares fueron llevadas a cabo en un extrusor Brabender facilitado por la compañía Especialidades Industriales y Químicas S.A. En este extrusor el calor era generado por medio de resistencias y la configuración de su tornillo constante.

En la Figura 12 aparece el extrusor Brabender empleado en esta primera fase experimental. Este equipo puede ser usado con diferentes cabezas facilmente intercambiables; pero para los propósitos del trabajo no fue necesaria su utilización.

En el extrusor Brabender la relación de longitud a diámetro es -

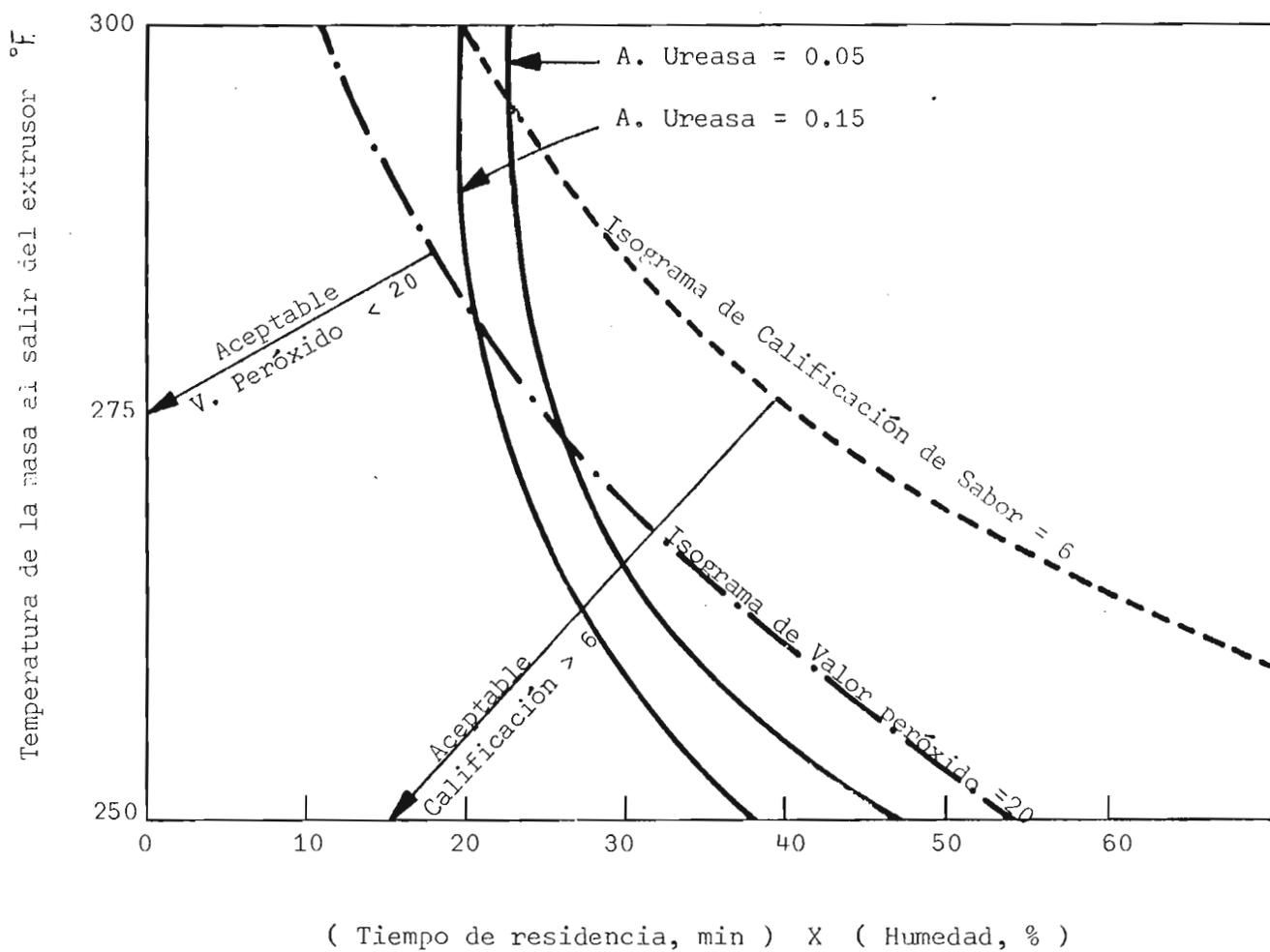


Figura 9. Contornos de respuesta para optimización de índices nutricional, de sabor y de estabilidad. (Mustakas et al., 1970).

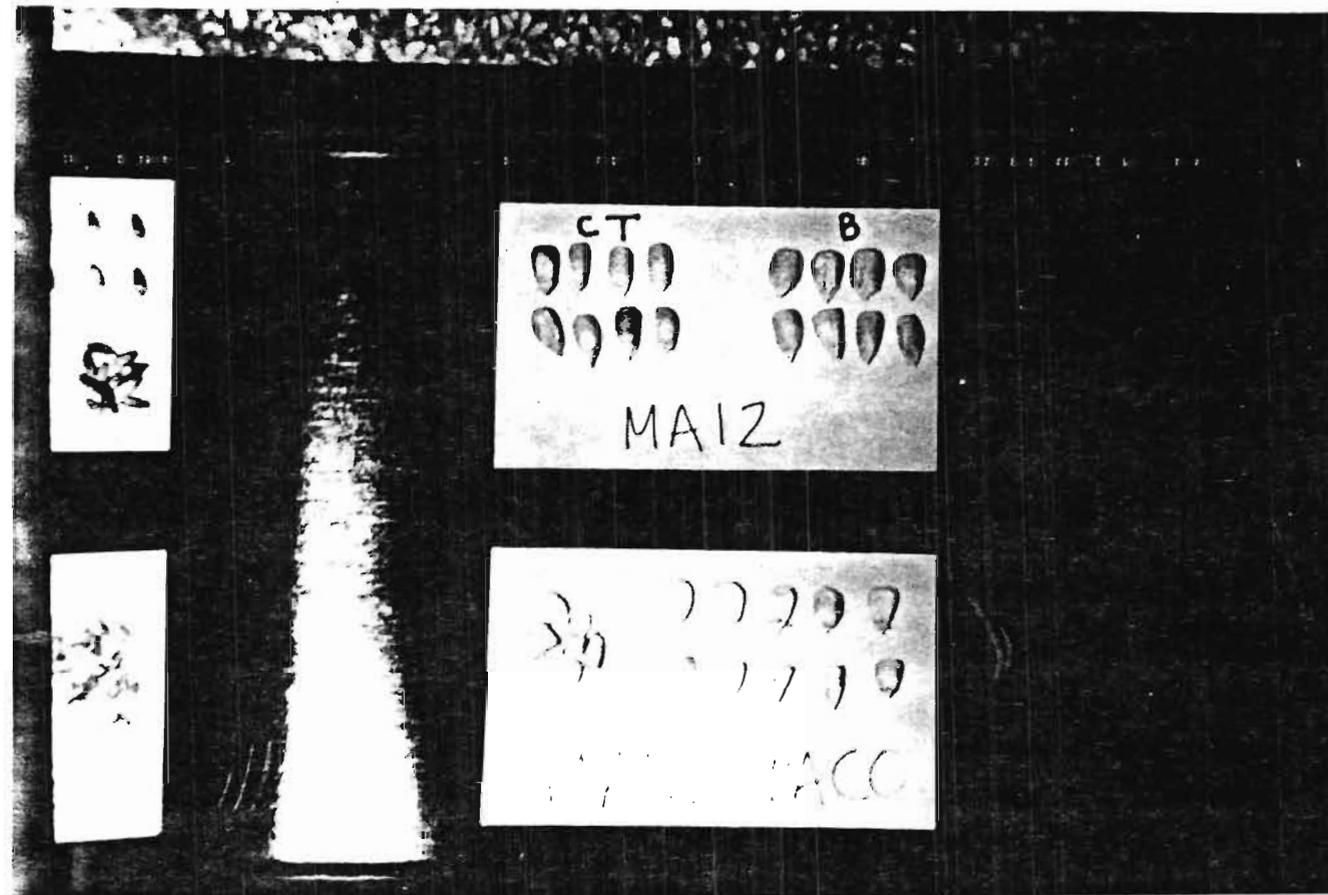


Fig.10 Maíz normal (compuesto Tlaxcala) y maíz opaco - 2 (compuesto Bajío B-74R) usados en la primera fase experimental.

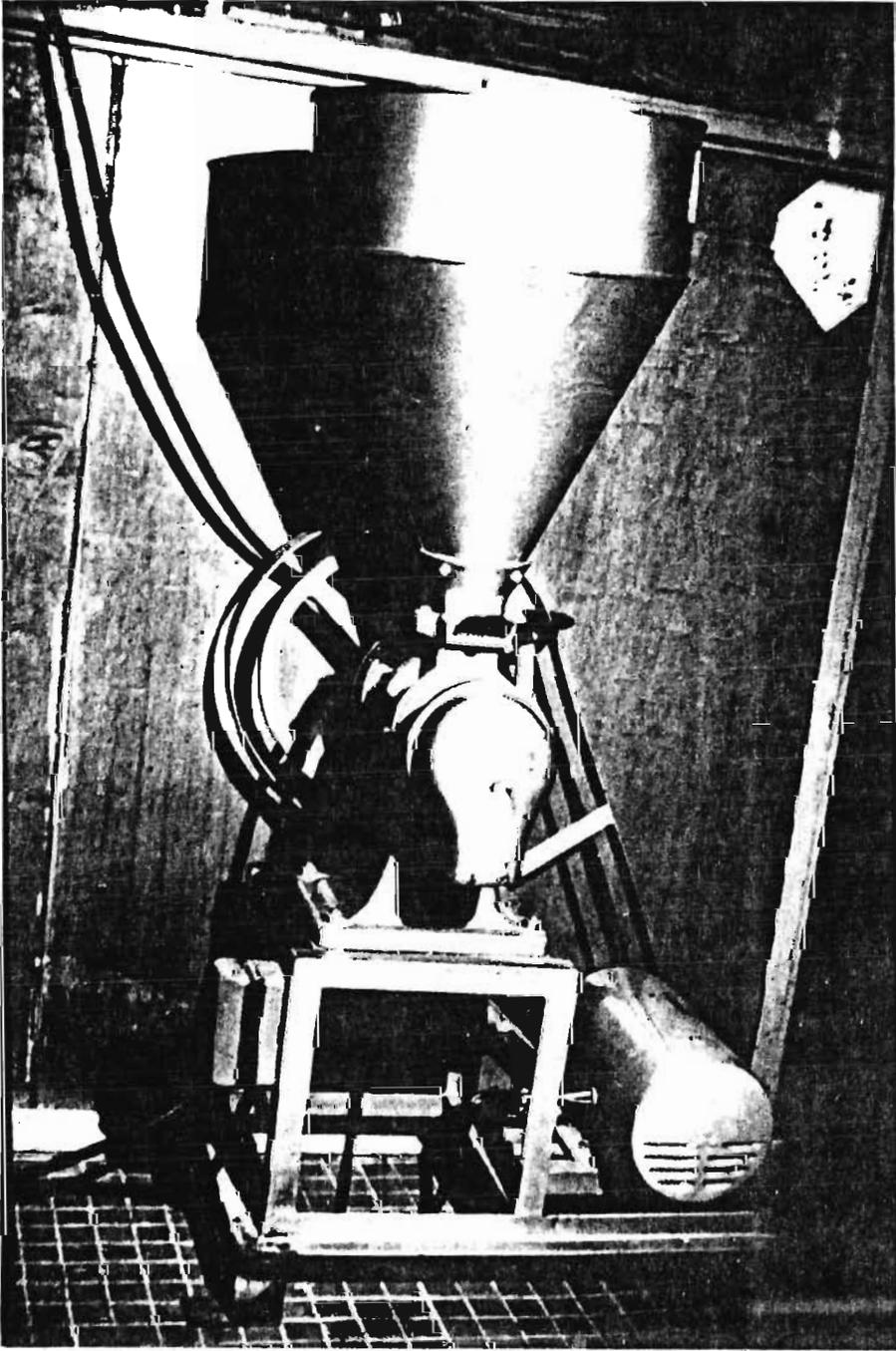


Figura 11 Molino Super Line S Para granos

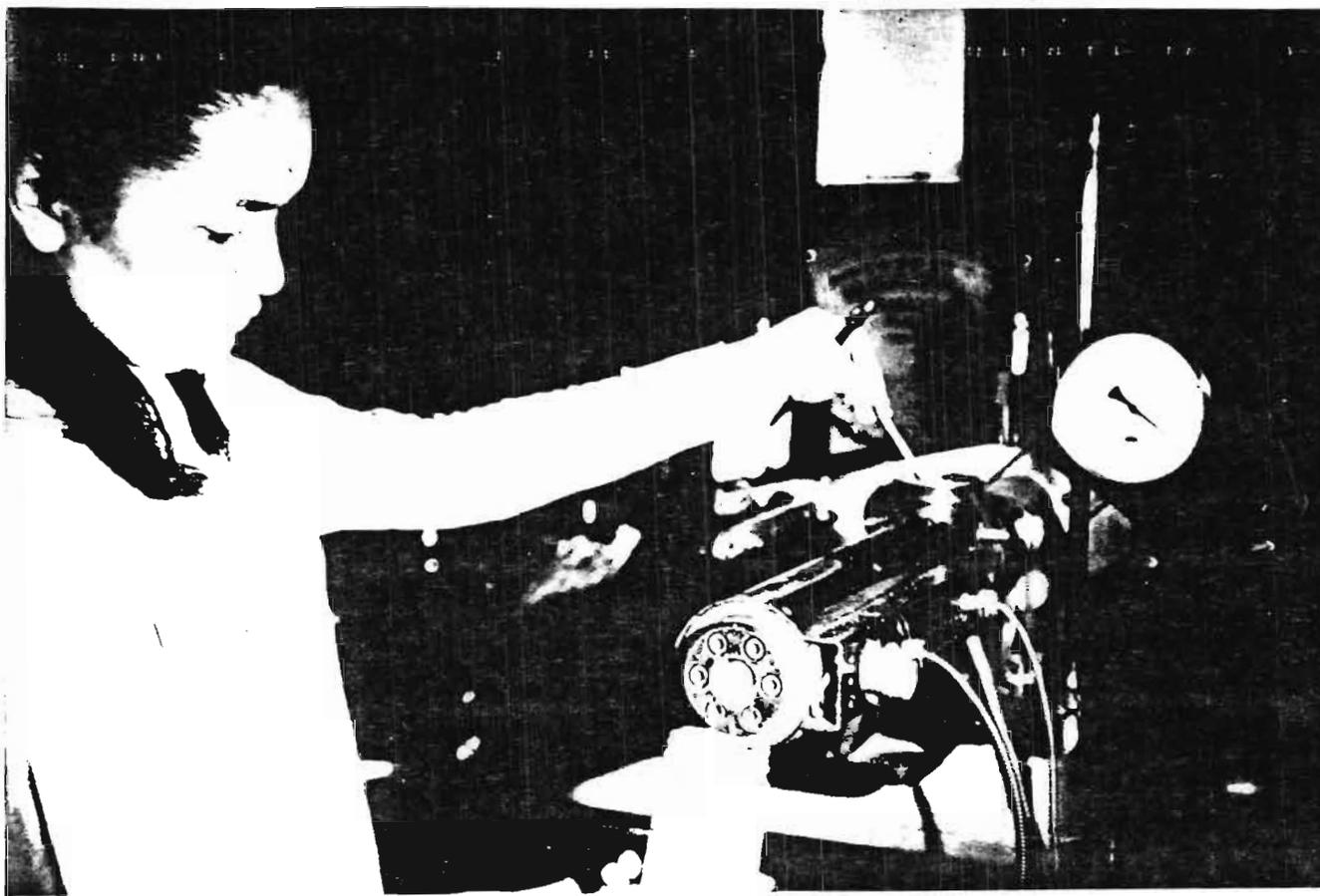


Fig. 12 Extrusor Brabender usado en la primera fase experimental

$L = 20 D$, el diámetro es de 19.1 mm (3/4"). Consiste de un cilindro dividido en dos zonas de calentamiento (ó enfriamiento), el calentamiento en estas dos zonas y en la tercera zona es controlado por medio de termopares que están conectados a una consola de control (Lichtinger, 1975).

El extrusor puede estar equipado con diferentes tipos de tornillo sinfin. Estos tornillos varían en su relación de compresión y geometría. En este caso se utilizó un tornillo con una relación de compresión de 1:1, esto quiere decir que la profundidad de la rosca del tornillo es constante a lo largo del extrusor. Una relación de compresión de 3:1 quiere decir que la profundidad de la rosca decrece en una relación de 3:1 a lo largo del extrusor. A mayores relaciones de compresión corresponden mayores presiones para una temperatura dada y mayor grado de expansión del producto al salir por la boquilla.

Durante la segunda fase experimental se utilizó harina de maíz crudo, de una variedad comercial de maíz blanco cristalino de procedencia desconocida, e hidróxido de calcio en polvo. La extrusión de la harina se realizó en un extrusor Wenger X - 5 para alimentos

El extrusor Wenger X - 5 presentado en la Figura 13 es similar a los extrusores comerciales diseñados para procesar cereales. Está provisto con válvulas individuales para vapor y agua en cada sección del barril. La velocidad del tornillo puede variar de 400 a 1,500 RPM. Un amperímetro indica la carga del motor y un medidor de flujo marca la cantidad de agua que se inyecta en la sección de alimentación. El extremo de descarga está equipado con un termopar que indica la temperatura final del producto.

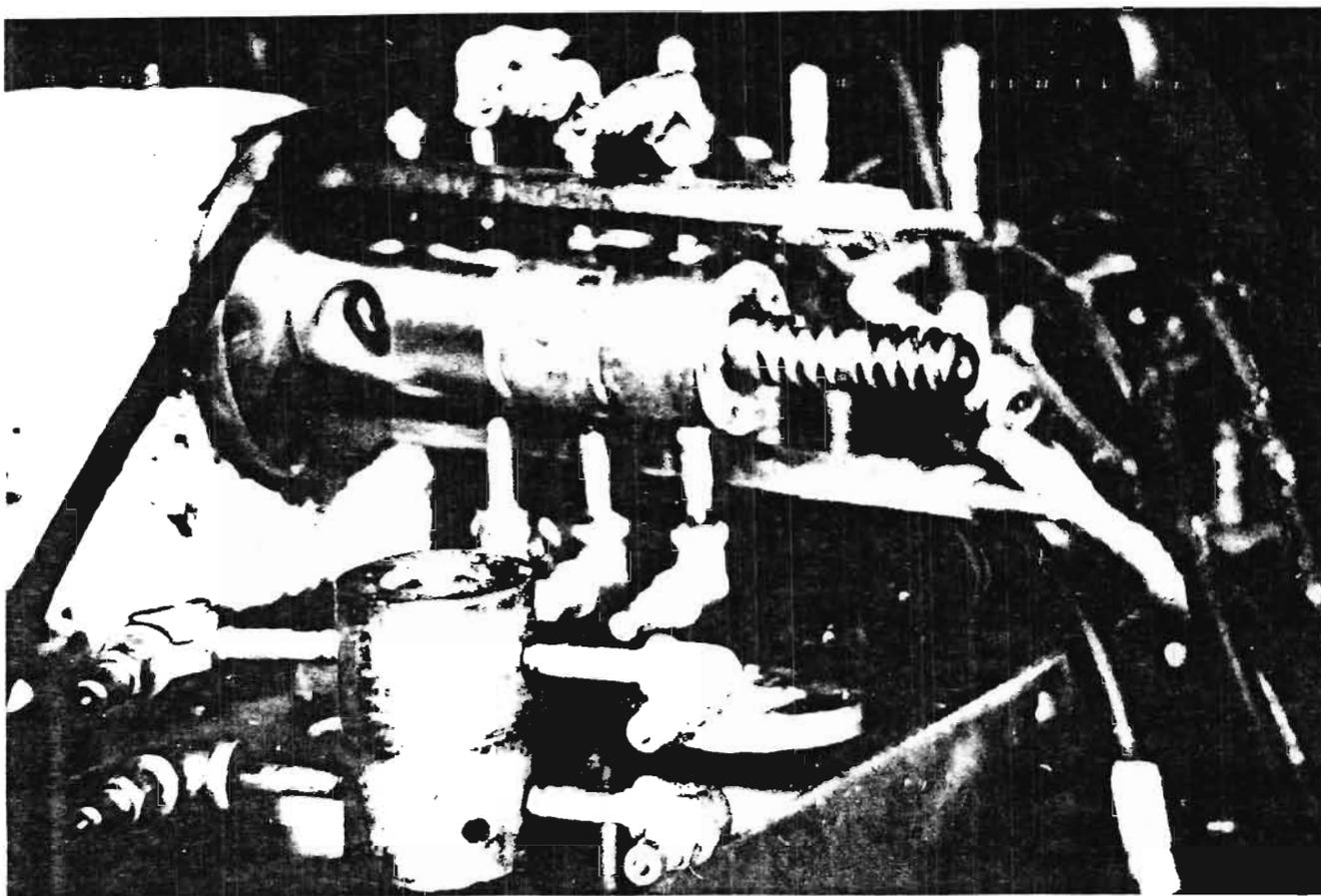


Fig. 13 Extrusor Wenger X - 5 para alimentos

El tornillo es de una pulgada de diámetro y tiene una longitud activa total de 10.5 pulgadas. Tanto la sección de alimentación, como la primera sección de la zona de extrusión tienen una hélice con una configuración de 5/8 de pulgada, y las otras tienen una doble hélice de las mismas dimensiones. Las secciones del tornillo están divididas por áreas de flujo restringido que previenen el flujo en dirección opuesta.

Las secciones del barril son separables y, con excepción de las de alimentación y la primera sección, pueden ordenarse en diferentes formas. La sección de alimentación, la primera sección y las secciones intermedias tienen estrías rectas, y la sección de descarga tiene estrías espirales. La capacidad de este equipo puede llegar a superar las 100 lb/hr, dependiendo del material y las condiciones de proceso.

La Figura 14 es una vista de la placa de soporte del extrusor Wenger X-5.

En ambas etapas experimentales se analizaron proteína total, lisina y triptofano. La proteína total se determinó por el método Microkjeldahl, basado en la oxidación de materia orgánica y fijación del nitrógeno en forma de sal, NH_4HSO_4 ó $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. La lisina se cuantificó por el método de Tsai modificado por Villegas y Mertz (1971), cuyo fundamento es una hidrólisis enzimática de las muestras con papaína y bloqueo con cobre de los grupos alfa-amino de los aminoácidos libres.

El método para determinación de triptofano fue el de Opienska y Blauth modificado por Hernández y Bates (1969), basado en la hidrólisis enzimática de las muestras con papaína y la reacción del triptofano con FeCl_3

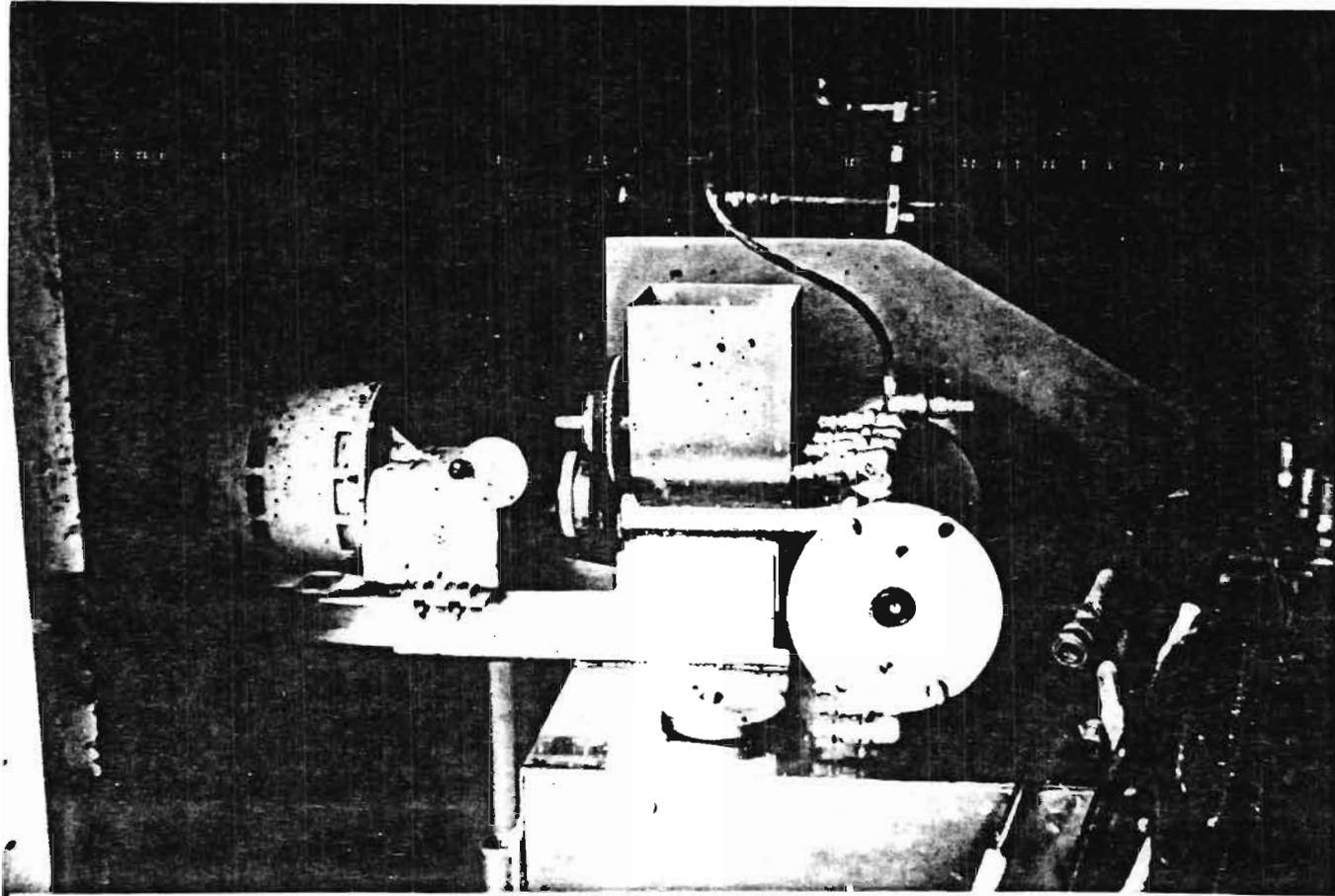


Fig. 14 Vista de la placa de soporte de un extrusor Wenger X - 5 .

que permite determinarlo colorímetricamente (ver apéndice).

Los análisis se efectuaron en el Laboratorio de Análisis Químicos del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas.

3.3 EXPERIMENTOS.

Durante la primera parte de los experimentos se obtuvieron harinas precocidas y se probaron sus cualidades en la elaboración de productos de gran consumo, uno de los cuales, la tortilla, constituye un alimento básico para los grupos de menor ingreso.

En la segunda etapa se trataron de reproducir las condiciones de cocción alcalina propias del proceso de nixtamalización, a fin de obtener una harina precocida similar a la harina comercial de maíz nixtamalizado (MINSA), misma con la que se comparó.

Primera Fase:

Los granos se molieron previamente en el molino Super Line. Al principio de la operación se alimentó al extrusor harina de soya con el objeto de calentarlo. Una vez caliente el equipo (80 °C aproximadamente) se alimentó la harina de maíz normal, sin adición de agua. En esta etapa preliminar no hubo un control exacto del flujo del material ya que el proceso no era continuo y sólo se contaba con escasas cantidades de material (1 Kg aproximadamente). Al finalizar la extrusión de la harina de maíz normal se alimentó nuevamente al extrusor harina de soya con el fin de limpiarlo, aprovechando para esto su alto contenido de grasa. La extrusión de la harina de maíz opaco se verificó en idéntica forma.

Se obtuvieron harinas precocidas semejantes a la harina de maíz nixtamalizado y con ellas se elaboraron tortillas, atoles y tamales; pero

al ser usadas para hacer tortillas presentaron pobres cualidades reológicas esto es, no podían "tortearse" manualmente porque se rompían y fue necesario usar una tortilladora manual. Tomando esto en cuenta y que nutricionalmente les faltaba la cal, elemento indispensable ya que en la dieta tradicional la tortilla es la mayor fuente de calcio, se adicionó cal al agua de rehidratación. Con la adición de cal y dando un tiempo de reposo de media hora se logró obtener una masa más maleable.

La Tabla 3.3.1 presenta las formulaciones de los productos elaborados a partir de harinas extrudidas:

Tortillas.- Las masas se prepararon mezclando a mano los ingredientes. Las tortillas se hicieron en una tortilladora manual de presión y se cocieron un minuto de cada lado sobre un comal.

Atole.- La harina y el piloncillo fueron disueltos en agua, la mezcla resultante se agregó al agua en ebullición y se agitó constantemente con una cuchara de madera hasta su total cocción.

Tamales.- La manteca se batió a mano hasta ablandarla y acremarla. Se añadió el resto de los ingredientes para formar una masa suave que se colocó a cucharadas (60 gramos aproximadamente) en hojas remojadas de mazorca, que se cerraron y doblaron dando forma a los tamales. Estos fueron cocidos al vapor durante una hora.

A los productos obtenidos se les determinó proteína total y lisina y se evaluaron organolépticamente.

Segunda Fase:

En esta segunda etapa se intentó superar los problemas presentados por las harinas extrudidas durante la primera fase y para ello se reproduje

TABLA 3.3.1. FORMULACIONES DE LOS PRODUCTOS ELABORADOS

Tortillas		Atole		Tamales	
Harina precocida	200 g	Harina precocida	50 g	Harina precocida	200 g
Agua*		Agua		Agua+	
(Aproximadamente)	200 g	(Aproximadamente)	450 g	(Aproximadamente)	200 g
		Piloncillo	50 g	Manteca	100 g
				Sal	5 g

* Se agregó 0.5 g de cal

+ Se agregó 1.0 g de bicarbonato de sodio

ron las condiciones de cocción alcalina propias del proceso de nixtamalización.

Se utilizó un extrusor Wenger X - 5 para alimentos, adaptado para recibir un flujo constante de agua y materia prima.

Los tornillos usados fueron de dos tipos: uno de canal profundo y vuelta simple y otro de canal poco profundo y doble vuelta. Las velocidades usadas en el tornillo fueron de 1200 a 1500 RPM, y no se usó sistema de calentamiento ó enfriamiento de ningún tipo, el calor fue producido sólo por fricción. Tanto en la primera como en esta segunda fase experimental no se usó boquilla en el extrusor.

En esta ocasión la harina se mezcló previamente con cal (hidróxido de calcio) en polvo. Se realizaron corridas a diferentes concentraciones de cal: 1.0, 0.5, 0.2 y 0.1 %.

La operación del extrusor se inició con agua a un nivel de 80 cm³/min. Las harinas mezcladas con la cal se alimentaron a flujo constante de 5 g/ seg.

Una vez que el producto salía a una temperatura superior a 60°C, el gasto de agua se reducía a 60 cm³/min. Bajo estas condiciones se obtuvieron masas con propiedades organolépticas similares a la masa de maíz nixtamalizado. Para apagar el extrusor se elevó el gasto de agua a 80 cm³/min nuevamente y se disminuyó paulatinamente el gasto de harina, hasta que saliera solamente agua por el extrusor.

El producto extruído fue usado en parte para hacer tortillas inmediatamente después de procesado, y el resto fue secado en un secador de banda y molino nuevamente a un tamaño de partícula de 180 mallas.

A las harinas y tortillas, al igual que a la harina comercial de maíz nixtamalizado, se les determinó proteína total, lisina y triptofano.

Esta segunda fase fue llevada a cabo en el International Institute of Protein Food Technology, Santa Monica California, por la maestra C.D. de Bazúa . Los análisis Químicos se efectuaron en el Laboratorio de Análisis Químicos del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas.

4. - RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En base a los experimentos ya descritos se obtuvieron los siguientes resultados.

4.1. - PRIMERA FASE

Los experimentos fueron corridos en un extrusor Brabender bajo temperatura controlada en las secciones 1 y 2 del barril. En los casos donde sólo aparece una temperatura, ésta fue igual para las dos secciones del barril del extrusor.

Los resultados de proteína total, lisina y triptofano para granos crudos y extruídos se presentan en la tabla 4.1.1, así como la velocidad del gusano del extrusor a la que se realizaron las pruebas.

Los resultados obtenidos para harina de soya indican que a una misma temperatura (100° C) hay mayor reducción del contenido de proteína, lisina y triptofano cuando el tiempo de residencia es mayor, lo cual comprueba lo observado por Anderson en 1969 y por Bookwalter en 1971. Una mayor temperatura de extrusión ($T_1 = 140$ y $T_2 = 170$ ° C) provocó mayor grado de destrucción en proteína y triptofano. La lisina presentó un aumento relativo, atribuible al error experimental y a que se halla expresada como porcentaje de proteína.

Para el maíz opaco se observó reducción en proteína, lisina y triptofano, siendo este último el más afectado.

Para maíz normal también se redujeron la proteína y el triptofano. El aumento relativo de lisina nuevamente es atribuible a la forma

TABLA 4.1.1 CONTENIDO DE PROTEINA, LISINA Y TRIPTOFANO PARA GRANOS CRUDOS Y, PROCESADOS POR EXTRUSION BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE TEMPERATURA Y TIEMPO DE RESIDENCIA.

		PROTEINA (g/100g de muestra)	LISINA (g/100g de proteína)	TRIPTOFANO (g/100 g de proteína)
SOYA	T ₁ = 100° C 40 RPM	49.8	6.92	1.56
	T ₁ = 100° C 22 RPM	49.8	6.8	1.54
	T ₁ = 140° C T ₂ = 170° C 40RPM	41.8	7.36	1.45
MAIZ OPACO	GRANO CRUDO	9.5	3.9	1.22
	T ₁ = 80° C T ₂ = 100° C 60RPM	9.1	3.8	0.78
MAIZ NORMAL	GRANO CRUDO	11.5	2.37	0.61
	T ₁ = 100 ° C T ₂ = 120 ° C 80 RPM	10.1	2.51	0.48

La velocidad de rotación del tornillo del extrusor, expresada en revoluciones por minuto (RPM), determina el tiempo de residencia en el equipo. Conforme aumenta la velocidad del tornillo se reduce el tiempo de residencia.

como se halla expresado el resultado y al error experimental.

En la elaboración de alimentos tradicionales sólo se trabajó con las harinas precocidas de maíz normal y opaco. Los productos se hicieron de acuerdo a las formulaciones presentadas en el Capítulo 3 de este trabajo.

Los resultados de los análisis de proteína, lisina y triptofano de los productos elaborados se presentan en la Tabla 4.1.2. Se da también como medida comparativa el requerimiento diario mínimo (Minimum Daily Requirement, MDR) para un niño de tres años y doce kilogramos de peso, así como el necesario para mujeres.

El requerimiento diario mínimo, propuesto por Gruthrie (1971), para niños pequeños es de 0.103 gramos de lisina disponible (LD) por kilogramo de peso y, para mujeres jóvenes es de 0.5 g de LD por día.

Es interesante notar que 120 gramos de tamales proporcionan sólo el 20% del requerimiento diario mínimo para un niño de tres años, mientras que las tortillas en la misma cantidad aportan el 40% de este requerimiento. No obstante esto, la gente se siente más satisfecha comiendo tamales.

La Tabla 4.1.3 sintetiza los resultados de la evaluación organoléptica de los productos. No se detectó diferencia entre las tortillas elaboradas comercialmente y las de maíz normal y opaco - 2 precocidas por extrusión.

Los atoles mostraron una ligera diferencia en textura, olor y apariencia general. Los obtenidos a partir de las harinas extruídas de maíz normal y opaco - 2 presentaron una consistencia arenosa y un

TABLA 4. 1. 2 LISINA DISPONIBLE EN PRODUCTOS ELABORADOS A PARTIR DE HARINAS PROCOCIDAS POR EXTRUSION.

CANTIDAD DE PRODUCTO	PROTEINA TOTAL (g)	NORMAL			OPACO - 2		
		LISINA DISPONIBLE g/10 g proteína	% +	MDR ++	LISINA DISPONIBLE g/10g	% proteína +	MDR ++
TORTILLAS 4 piezas (120 g)	10	0.2	16	40	0.34	27	68
ATOLE 1 taza (120 g)	3	0.07	5	13	0.10	8	20
TAMALES 2 piezas (120 g)	5	0.10	8	20	0.18	14.5	36

+ El mínimo requerimiento diario para un niño de 3 años, de 12 kg de peso es de 0.103 g por kg de peso. (Gruthrie 1971)

++ El mínimo requerimiento diario para mujeres es de 0.5 g/día. Op. cit.

TABLA 4.1.3 RESULTADO DE LA EVALUACION ORGANOLEPTICA DE LOS PRODUCTOS

	TORTILLAS			ATOLE			TAMALES		
	Comercial	Normal	Opaco	Comercial	Normal	Opaco	Comercial	Normal	Opaco
TEXTURA	E	E	E	E	B	B	E	E	E
SABOR	E	E	E	E	E	E	E	E	E
OLOR	E	E	E	E	B	B	E	E	E
APARIENCIA GRAL.	E	E	E	E	B	B	E	B	B

Calificación: E = excelente, M - malo, B = bueno

La calificación se asignó cuando 8 de 10 panelistas, como mínimo, estuvieron de acuerdo.

olor más fuerte.

No hubo diferencia apreciable entre los tamales elaborados a partir de harina comercial y los obtenidos a partir de las harinas precocidas obtenidas durante esta primera fase del experimento.

4. 2. - SEGUNDA FASE

En las pruebas llevadas a cabo con maíz normal blanco cristallino de procedencia desconocida se observó que el color de las harinas precocidas era afectado por las concentraciones de cal. Se usaron varias concentraciones en pruebas preliminares y se encontró que la concentración de 0. 2% (con respecto a la cantidad de harina de maíz) era la óptima para las características de color, olor, sabor y propiedades reológicas de la masa extruída que se obtenía. En esta segunda fase se aplicó agua a la harina alimentada al extrusor, en una proporción de 1:1 respecto a la cantidad de harina de maíz.

Los panelistas no pudieron registrar diferencias en olor y textura de tortillas hechas a partir de masa extruída y de harina de maíz nixtamalizado. En sabor y color tampoco encontraron diferencias.

En el proceso tradicional de nixtamalización se descarta el licor de cocción y con él se remueve una considerable cantidad de cal. En el proceso de extrusión toda la cal añadida permanece en la masa, por esto es necesaria una menor cantidad para llevar a cabo la hidrólisis alcalina. Las figuras 15 y 16 presentan las masas y tortillas obtenidas a partir de masas extruídas a 0. 2 y 1. 0% de cal, así como la que se obtiene por el proceso tradicional de nixtamalización. La última

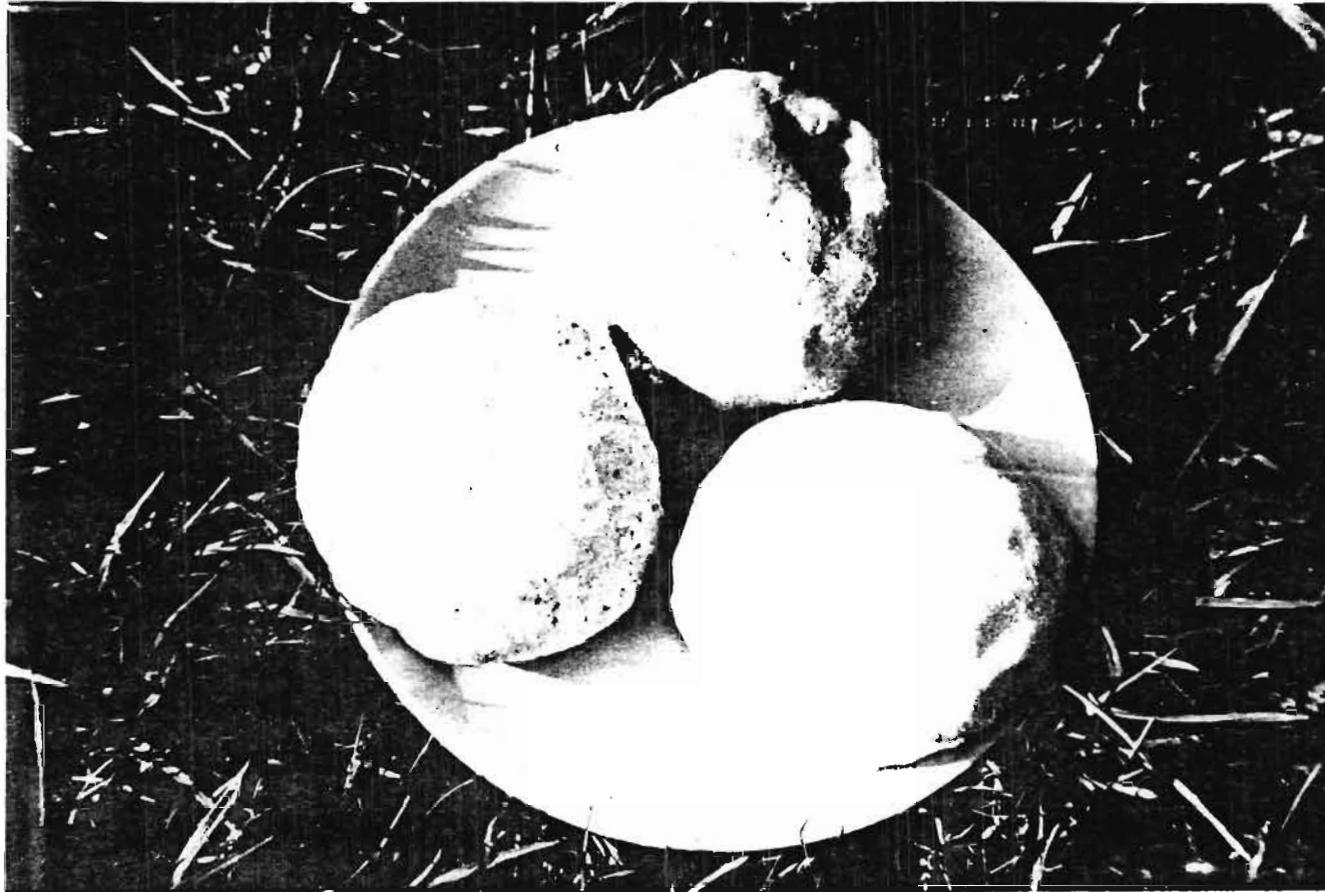


Fig. 15. Masas obtenidas por extrusión con 1% y 0.2% de cal comparadas con masa de maíz nix-tamalizado.



Fig. 16 Tortillas obtenidas de masas extruídas con 1% y 0.2% de cal comparadas con una tortilla de maíz nixtamalizado.

presenta gránulos debido a la molienda, pero cuando la masa es pasada varias veces a través del molino no se aprecia diferencia en la textura.

La Tabla 4.2.1 presenta los resultados de los análisis químicos de maíz, harinas (extruídas a 0.2 y 1.0 % de cal, y comercial de maíz nixtamalizado, MINSA) y tortillas. Estos valores son afectados por heterogeneidad de las muestras tomadas, lo cual explica alguna discrepancia entre ellos tal como una mayor cantidad de proteína para la muestra extruída a 1.0 % de cal (hidróxido de calcio).

Las diferencias en el contenido de lisina y triptofano para las harinas extruídas a 0.2 y 1.0% de cal pueden atribuirse a una descomposición química provocada por la cocción alcalina a alta temperatura. El triptofano es el más sensible a esta descomposición.

CONCLUSIONES

Los resultados de las dos fases experimentales indican que es posible hacer tortillas usando el proceso de extrusión como un proceso alternativo a la nixtamalización.

Organolépticamente es difícil distinguir entre los productos elaborados a partir de harinas precocidas por extrusión y los obtenidos de masa preparada por el proceso de nixtamalización.

El producto obtenido por extrusión puede aglutinarse para formar una masa con la que directamente se elaboran las tortillas, o bien secarse y molerse para formar una harina que se utilizará en el momento necesario y tendrá una vida de anaquel semejante a la de la harina de maíz nixtamalizado (Figura 17).

TABLA 4.2.1 PROTEINA, LISINA Y TRIPTOFANO EN MAIZ CRUDO, HARINAS Y TORTILLAS

	Grano de maíz		Harina de maíz				Tortillas	
	Endos permo	Entero	Nixtama lizada 1% Cal	Extruida		Minsa	Nixtamalizada 1% Cal	Extruida 0.2% Cal
				0.2% Cal	1% Cal			
PROTEINA TOTAL g/100 g muestra	9.0	10.43	10.4	9.6	9.9	10.3	10.2	9.8
LISINA TOTAL g/100 g proteína	1.65	2.76	2.57	2.41	2.32	2.39	2.54	2.39
TRIPTOFANO TOTAL g/100 g proteína	0.566	0.765	0.505	0.731	0.585	0.708	0.57	0.704

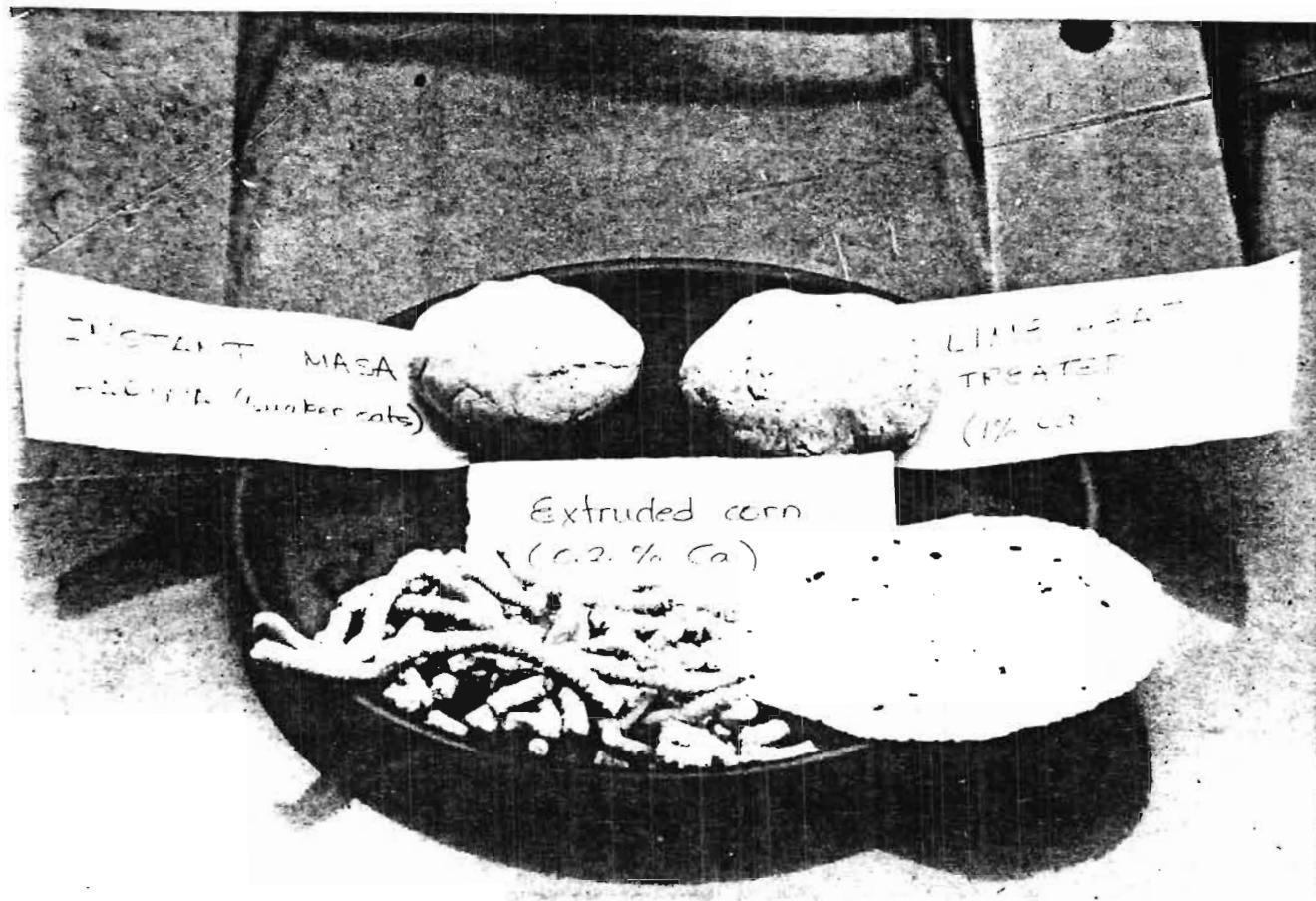


Figura 17. Producto extruido al 0.2% de cal y tortilla elaborada a partir de él comparados con masas de maíz nixtamalizado y de harina de maíz nixtamalizado.

En términos generales se observó que la lisina es más resistente a la destrucción que el triptofano.

El proceso de extrusión representa ahorros considerables de agua y de cal y un ahorro de energía de la tercera parte de la energía total suministrada en los procesos actuales (Sterner, 1978)

5. - BREVE ANALISIS ECONOMICO

El proceso alternativo puede examinarse desde el punto de vista de dos consideraciones básicas. Una de ellas es la simplicidad del equipo; que pueda constriuirse, mantenerse y operarse en México. La operación y mantenimiento deberá realizarse no sólo en zonas urbanas sino también rurales. La otra consideración será su disponibilidad a todas las capas de la población, por lo que la economía de los sistemas de extrusión debe considerarse antes de que puedan juzgarse como factibles. Por estas consideraciones se hace un análisis económico a dos niveles; a nivel urbano, donde se plantea la instalación de una planta para la obtención; de harinas precocidas y, a nivel rural donde los recursos son menores y se requiere una operación más sencilla y económica.

5.1. - EVALUACION ECONOMICA A NIVEL URBANO Y SEMIINDUSTRIAL

A nivel urbano el análisis está basado en el análisis económico realizado por Stone y colaboradores (1976, 1977) para sistemas de extrusión de bajo costo.

De los sistemas HT/ST (alta temperatura - corto tiempo) propuestos por Stone, los que mejor responden a las necesidades actuales de México son: el sistema de producción de harinas precocidas y el sistema de fabricación de harina de soya entera. La evaluación para ambos sistemas fue hecha a partir de los correspondientes esquemas de equipo necesario. Los costos de manufactura también fueron calculados.

Las suposiciones usadas en dichos análisis se enumeran a continuación:

1. - El equipo para la planta será comprado en los Estados Unidos y será enviado al lugar de la planta libre de gastos (para México puede considerarse la posibilidad de construir el equipo en el país ó importarlo, en cuyo caso se elevarían los costos de compra de equipo).
2. - El grano llegará a la planta en bolsas y no será necesaria su limpieza.
3. - Se usó depreciación en línea recta, a 10 años para el equipo y a 50 años para el edificio.
4. - Los costos de mantenimiento, anuales, será 10% del valor de compra del equipo.
5. - La planta operará a producción total durante 2200 horas.
6. - No se incluyen impuestos sobre la propiedad, ni seguros.
7. - Se usa un interés simple de 10% sobre préstamos de capital.
8. - Los gastos fijos por concepto de nómina se estiman en 15% de los costos de operación.
9. - El costo de materia prima es de:
 - 2.50 pesos /kg de maíz
 - 3.00 pesos /kg de soya
10. - Los costos por servicios se calculan en:
 - combustible 16.00 pesos /galón
 - electricidad 1.40 pesos /Kw-h
11. - Los costos de construcción serán de 2,470 pesos /m²
12. - Se requieren dos meses de capital de trabajo.

- 13.- El desperdicio de cascarilla de soya tendrá un valor de 0.55 pesos /kg.
- 14.- El proyecto será financiado a 10 años.

Sistema de producción de harina precocida.

Este sistema fue diseñado para producir harinas o sémola que puedan usarse para hacer papillas u otros productos. El análisis está hecho para un producto con 80% de maíz y 20% de soya.

El diagrama del sistema se muestra en la Figura 18. Puede emplearse un equipo para remover la cascarilla de los granos que entran. Hay tres tanques de almacenamiento para mantener una provisión de materia prima suficiente para dos días. El material puede ser transportado dentro de la planta y colocado en un molino donde son mezclados los ingredientes, y premolidos antes de la extrusión.

Después de la extrusión el material es transportado a un secador/enfriador donde la humedad del producto se evapora, se preacondiciona para una molienda subsecuente. Después de que el producto se ha enfriado se muele. Se ilustra el sistema de producción de sémola que requiere un molino barato de martillos; el costo adicional del molino para producción de harinas finas sería de aproximadamente 690,000 pesos. Después de la molienda el producto es transportado y empacado a mano.

La síntesis de los costos se presenta en la Tabla 5.1.1. Los costos de manufactura aparecen en la Tabla 5.1.2. Los costos se hallan expresados en pesos mexicanos aplicando un factor de cambio de 23 pesos/dólar.

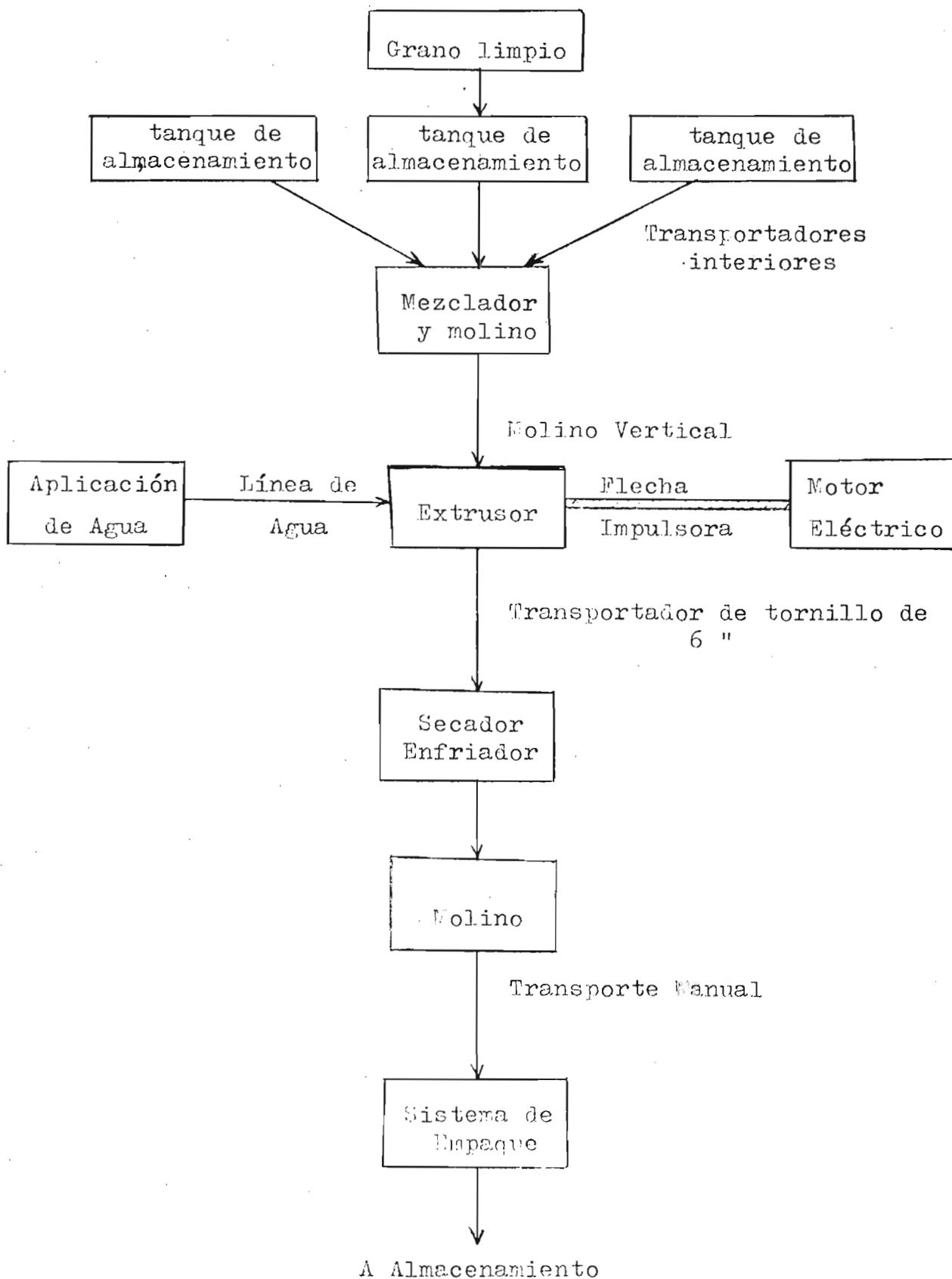


Fig. 18 Diagrama deflujo en una planta de harinas precocidas.

TABLA 5.1.1. COSTOS PARA EL SISTEMA DE FABRICACIÓN DE HARINA PRECOCIDA.

A. - Compra de equipo

Perladora	103 500.00
Transportador vertical	6 900.00
Tanques de almacenamiento	46 575.00
Transportadores de alimentación	20 700.00
Molino	66 700.00
Extrusor	103 500.00
Equipo de eaplicación de agua	2 875.00
Motor eléctrico	195 500.00
Transportador de producto	13 800.00
Secador - Enfriador	166 600.00
Molino de producto	69 000.00
Equipo eléctrico	36 800.00
Equipo de empaque	8 050.00
TOTAL	839 500.00

B. - Costos del Equipo de Transporte

Embalajes de madera (Huacales)	27 600.00
Fletes	23 000.00
Embarques	80 500.00
TOTAL	131 100.00

C. - Gostos de Instalación

Mano de obra	18 400.00
Suministros	11 500.00
TOTAL	29 900.00

D. - Servicios (Se considera que ya se cuenta con ellos)

Edificio	563 500.00
Terreno	1 012 000.00
TOTAL	1 575 500.00

E. - Imprevistos (20% de costos fijos) 315 100.00

Costos totales - Capital de trabajo	1 890 600.00
-------------------------------------	--------------

TABLA 5.1.2 COSTOS DE MANUFACTURA (HARINA PRECOCIDA)

a. Costos directos de Producción

Materia prima (Granos)	1 453.60
Materiales de empque	870.00
Mano de obra	121.90
Electricidad	41.40
Combustible	80.50
Mantenimiento	37.95
Gastos generales	5.75
Costos de transporte	69.00
Costos directos totales de Producción	2 680.20

b. Costos Directos de Manufactura

Gastos fijos por concepto de nómina	18.40
Costos de laboratorio	5.75
Costos Directos Totales de Manufactura	24.15

c. Costos Indirectos de Manufactura

Depreciación	50.60
Interés sobre préstamos de capital	139.85
Costos Indirectos Totales de Manufactura	259.45
COSTOS TOTALES DE MANUFACTURA	2 975.75

Los costos están expresados en pesos /hora.

El capital de trabajo necesario para la operación de la planta durante 2 meses puede calcularse de los costos totales de manufactura y, para este sistema serán aproximadamente la mitad de los costos de equipo, lo que indica la facilidad del sistema y su bajo costo.

Sistema de fabricación de harina de soya entera

Otra posibilidad sería utilizar el sistema diseñado para producción de harina de soya entera. Este sistema es más simple que el anterior porque se trabaja con un sólo ingrediente. Esto elimina dos tanques de almacenamiento, y sus correspondientes sistemas de transporte. El suministro proporcionado de varios ingredientes no es necesario y la molienda previa del material crudo se lleva a cabo en la etapa de descascarado, eliminando el molino premezclador. Se instala también un cocedor-secador más simple que reduce los costos de equipo. El molino del producto final, es el más complejo de la planta y es necesario para transformar el aceitoso producto extruído en una harina. Después de la molienda, el producto es empacado dentro de grandes bolsas de tela o papel para su almacenamiento. Son suficientes estas bolsas puesto que la harina probablemente se use a granel en panaderías u otras instituciones.

Un diagrama de la planta, Figura 19, ilustra un diseño más simple.

Los costos para la fabricación de harina de soya entera se presentan en la Tabla 5.1.3. La tabla ilustra el bajo costo del sistema, aunque el producto molido final tenga un alto costo.

La Tabla 5.1.4 enfatiza la alta proporción de los costos de manufactura representados por la materia prima y empaque. El capital de trabajo para este sistema durante un período de dos meses sería alrededor de la mi tad de los costos de equipo.

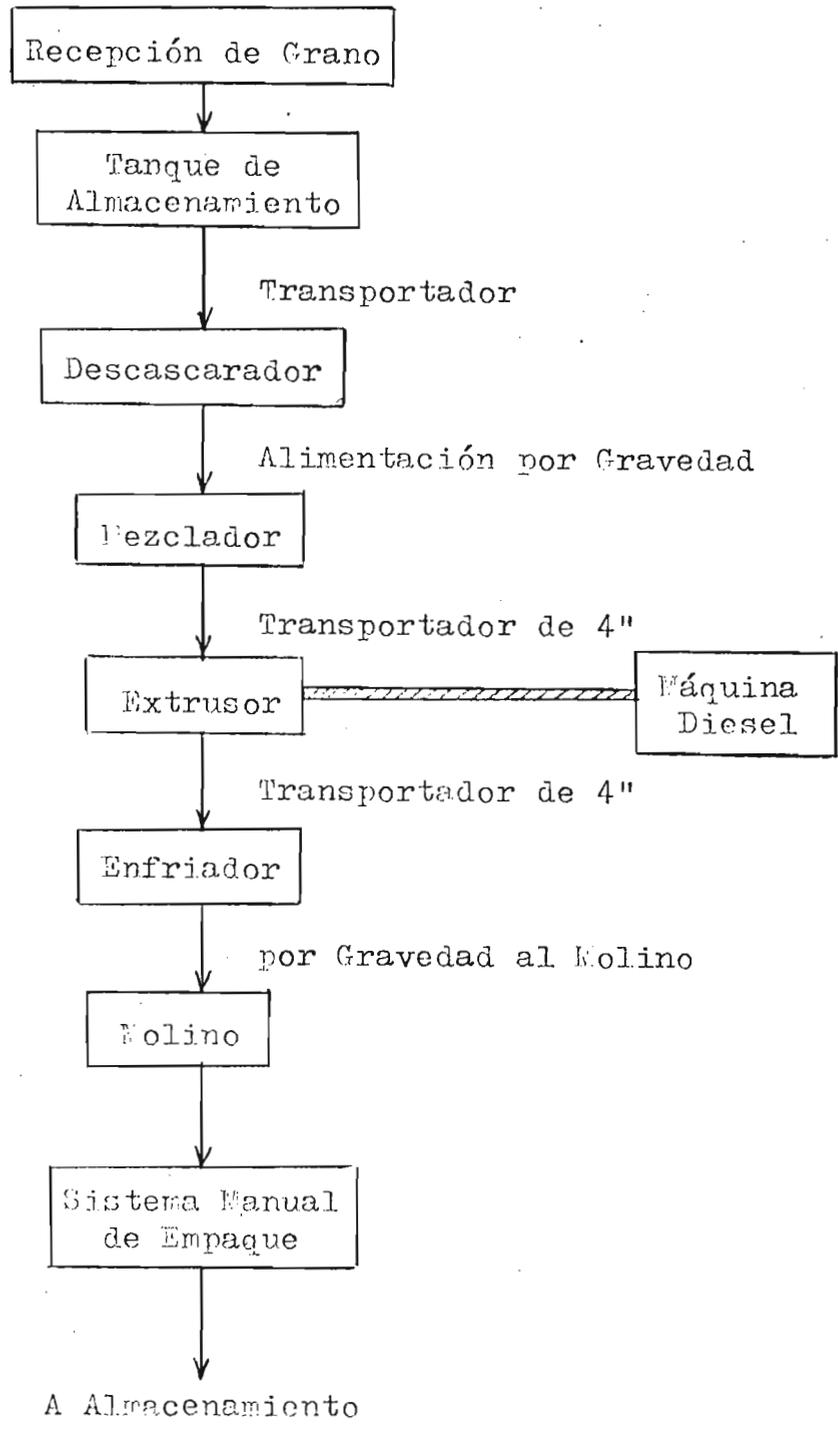


Fig. 19 Diagrama de bloques para el sistema de fabricación de harina de soya entera.

TABLA 5.1.3 COSTOS PARA EL SISTEMA DE FABRICACIÓN DE HARINA DE SOYA ENTERA

A. - Compra de Equipo

Transportador vertical	6,900.00
Tanque de almacenamiento	15,525.00
Transportadores internos del sistema	6,900.00
Descascarador	69,000.00
Mezclador	19,550.00
Transportador	6,900.00
Extrusor	103,500.00
Máquina Diesel	147,200.00
Transportador	6,900.00
Enfriador	57,500.00
Molino	655,500.00
Equipo de empaque	10,350.00
Equipo eléctrico	42,550.00
TOTAL	1 136,775.00

B. - Costos del Equipo de Transporte

Embalajes	20,700.00
Fletes	75,900.00
Embarques	21,850.00
TOTAL	118,450.00

C. - Costos de Instalación

Mano de obra	14,950.00
Suministros	9,200.00
TOTAL	24,150.00

D. - Servicios (Se considera que ya se cuenta con ellos)

Edificio	437,000.00
Terreno	1 290,875.00
TOTAL	1 727,875.00

E. - Imprevistos (20% de costos fijos) 345,575.00

Costos totales - Capital de trabajo	2 073,450.00
-------------------------------------	--------------

TABLA 5.1.4 COSTOS DE MANUFACTURA (HARINA DE SOYA ENTERA)

a. Costos Directos de Producción

Materia prima (soya)	1 863.00
Materiales de empaque	501.40
Mano de obra	64.40
Electricidad	27.60
Combustible	64.40
Mantenimiento	54.50
Gastos generales	5.75
Costos de transporte	80.50
Costos Directos Totales de Producción	2 663.85

b. Costos Directos de Manufactura

Gastos fijos por concepto de nómina	9.65
Costos de laboratorio	5.75
Costos Directos Totales de Manufactura	15.40

c. Costos Indirectos de Manufactura

Depreciación	61.85
Interés sobre préstamos de capital	233.70
Costos Indirectos Totales de Manufactura	295.55
COSTOS TOTALES DE MANUFACTURA	2 294.80

Los costos están expresados en pesos /hora

SINTESIS DE LAS CONSIDERACIONES ECONOMICAS IMPORTANTES DE
AMBOS PROCESOS

	Harina Precocida	Harina de Soya
I. Capital Requerido		
Costos totales-Capital de trabajo	1 890 600.00	2 073 450.00
Capital de trabajo	1 090 200.00	1 090 890.00
T O T A L	2 981 720.00	3 164 340.00
II. Costos de Manufactura (pesos/hora)		
Costos Directos de Producción		
Materia prima	1 453.60	1 863.00
Materiales de empaque	870.10	501.40
Mano de obra	121.90	64.40
Otros	234.60	235.05
Costos de Manufactura	295.55	310.95
T O T A L	2 975.75	2 974.80
VELOCIDAD DE PRODUCCION (kg/hora)	454	544.8
VALOR DEL PRODUCTO (pesos/kg)	6.10	5.60

SUPOSICIONES USADAS EN EL DESARROLLO DE LOS ANALISIS ECONOMICOS DE AMBOS SISTEMAS.

I. Materia prima (relación)	80% maíz 20% soya	100% soya
Cantidad comprada (% de producción)	125	115
Cantidad reducida a desperdicio durante el descascarado (% de producción)	18	15
II. Empaque		
Tipo de bolsa	papel/polietileno	tela
Tamaño de bolsa	454 g	25 kg
Costo por bolsa (pesos)	0.50	23.00
Cajas de cartón para embalaje de	24 bolsas	...
Costo de la caja	8.75	...
III. Mano de obra		
Número de supervisores a 23 pesos/hora	1	1
Operadores del extrusor (11.50 pesos/hora)	2	1
Operadores del equipo de empaque (11.50 pesos/hora)	.....	2
Obreros (6.90 pesos/hora)	1	....
Conserjes "	1	1
IV. Costos de transporte		
Carga máxima (ton)	12	12
Transporte (pesos/ton-km)	2.85	2.85
Distancia promedio (km)	48.3	48.3
V. Velocidad de producción (kg/hora)	454	544.8
VI. Uso de servicios		
Electricidad (Kw-h)	25	20
Combustible (gal/hora)	5	4
VII. Costos de servicios		
Electricidad (pesos/Kw-h)	1.40	1.40
Combustible (pesos/galón)	16.00	16.00
VIII. Costos de Mantenimiento	10% del valor del equipo	10% del valor del equipo

Sistemas de producción de harina de maíz precocida por extrusión,
bajo condiciones alcalinas.

En base a lo propuesto por Stone es posible estimar los costos de producción de harina de maíz precocida, de propiedades si milares a las de la harina de maíz nixtamalizado.

Este sistema reúne características de los sistemas de produc- ción de harina precocida y de fabricación de harina de soya entera. Se asemeja más a este último, pero con la ventaja de requerir un molino menos costoso dada la menor cantidad de grasa del grano y, no requerir equipo para descascarado del grano. El diagrama de la planta se reduciría al presentado en la Figura 20. Los costos para este sistema se resumen en la Tabla 5.1.5 y los costos de ma- nufactura en la Tabla 5.1.6.

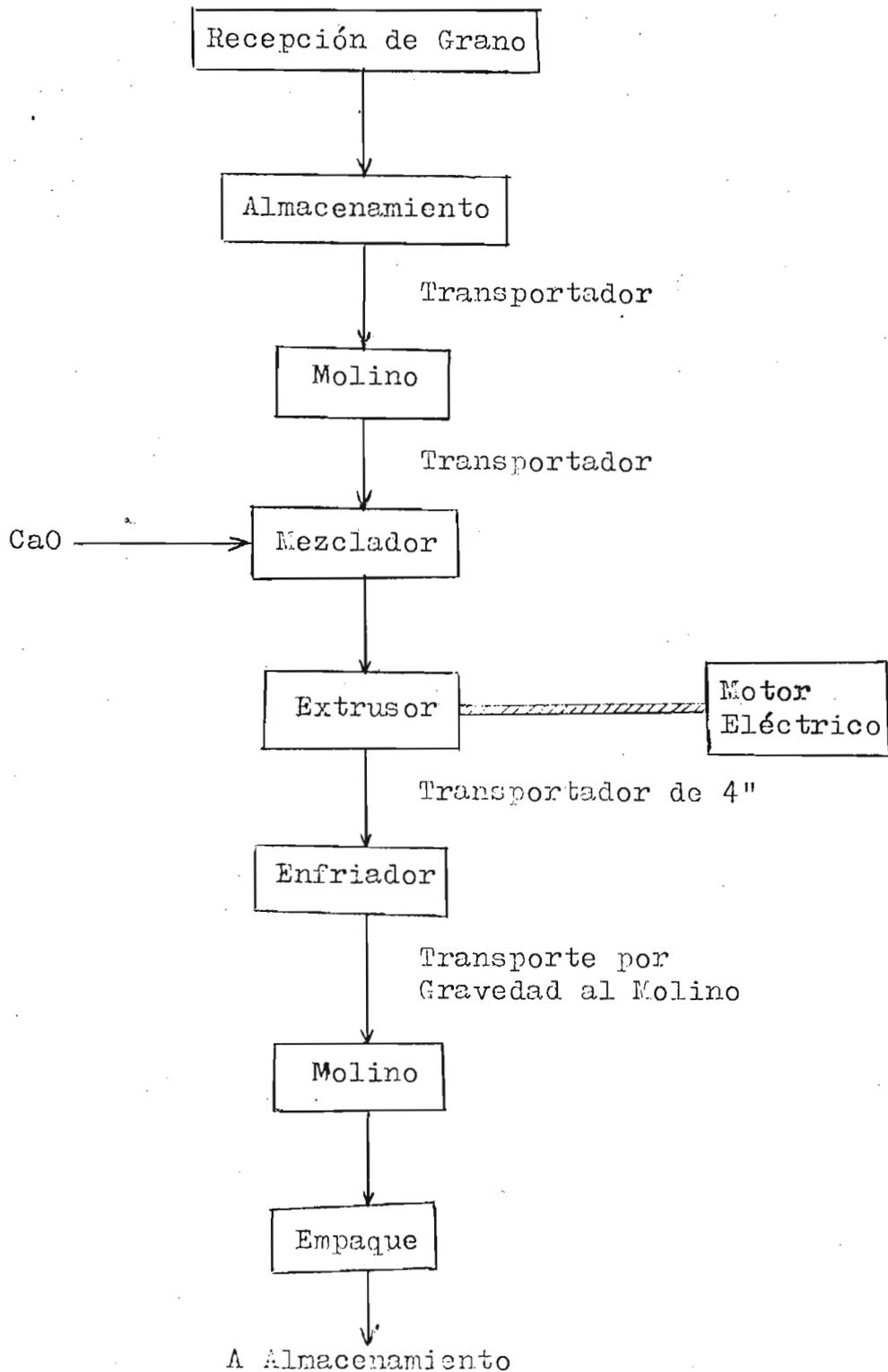


Fig. 20 Sistema de producción de harina de maíz precocida -- por extrusión, bajo condiciones alcalinas ("A")

TABLA 5. 1. 5 COSTOS PARA EL SISTEMA DE PRODUCCION DE HARINA DE MAIZ PRECOCIDA POR EXTRUSION, BAJO CONDICIONES ALCALINAS.

A. Compra de Equipo

Transportador vertical	6 900.00
Tanque de almacenamiento	15 525.00
Transportadores internos del sistema	20 700.00
Molino	66 700.00
Extrusor	103 500.00
Equipo de aplicación de agua	2 829.00
Motor eléctrico	195 500.00
Transportador de producto	13 800.00
Secador-Enfriador	165 600.00
Molino de producto	69 600.00
Equipo eléctrico	36 800.00
Equipo de empaque	8 050.00
T O T A L	705 904.00

B. Costos de Transporte

Embalajes	20 700.00
Fletes	75 900.00
Embarques	21 850.00
T O T A L	118 450.00

C. Costos de Instalación

Mano de obra	14 950.00
Suministros	9 200.00
T O T A L	24 150.00

D. Servicios

Edificio	437 000.00
Terreno	1 290 875.00
T O T A L	1 727 875.00

E. Imprevistos (20% de costos fijos) 345 575.00

Costos totales - Capital de trabajo

TABLA 5.1.6 COSTOS DE MANUFACTURA (HARINA DE MAIZ PRECO-CIDA BAJO CONDICIONES ALCALINAS)

A. Costos Directos de Producción

Materia prima (maíz y cal)	1 385.00
Materiales de empaque	750.00
Mano de obra	121.90
Electricidad	41.40
Mantenimiento	32.05
Gastos generales	5.75
Costos detransporte	70.00
Costos Directos Totales de Producción	2 406.10

B. Costos Directos de Manufactura

Gastos fijos por concepto de nómina	18.40
Costos de laboratorio	5.80
Costos Directos Totales de Manufactura	24.20

C. Costos Indirectos de Manufactura

Depreciación	47.80
Interés sobre préstamos de capital	139.00
Costos Indirectos Totales de Manufactura	186.80

COSTOS TOTALES DE MANUFACTURA	2 617.10
-------------------------------	----------

Los costos están expresados en pesos/hora.

SINTESIS DE LAS CONSIDERACIONES ECONOMICAS DEL SISTEMA DE PRODUCCION DE HARINA DE MAIZ PRECOCIDA POR EXTRUSION, BAJO CONDICIONES ALCALINAS.

I. Captial Requerido

Costos totales-Capital de Trabajo	1 615 389.10
Capital de trabajo	959 585.90
TOTAL	2 575 425.00

II. Costos de Manufactura (pesos/hora)

Costos Directos de Producción

Materia prima	1 385.00
Materiales de empaque	750.00
Mano de obra	121.90
Otros	140.20

Costos de Manufactura	211.00
-----------------------	--------

TOTAL	2 617.10
--------------	-----------------

Velocidad de producción (Kg/hora)	500
-----------------------------------	-----

Valor del producto (pesos/Kg)	5.20
-------------------------------	------

5.2. EVALUACION ECONOMICA A NIVEL RURAL

Para hacer extensivo a las áreas el uso del sistema de producción de harina de maíz precocida por extrusión, de propiedades similares a las de la harina de maíz nixtamalizado; se propone el empleo de equipos, tales como el extrusor Brady, que no requieren energía eléctrica para ser accionados. Los extrusores de este tipo pueden operar impulsados por un motor de combustión interna, resultando apropiado en estos casos el motor de un tractor.

Esta posibilidad permite procesar el grano, en la zona misma de cultivo, con la ventaja de eliminar el uso de plaguicidas y las pérdidas post-cosecha, además de reducir el espacio necesario para almacenamiento.

El Brady opera como un extrusor seco, así que no requiere adicionar agua o vapor al grano durante el proceso o si acaso, una cantidad muy pequeña. El calor para la cocción es suministrado a través de conversión de energía mecánica del motor. No requiere calentamiento adicional. Un motor de 100 HP es capaz de dar velocidades de producción hasta de 100 kg/hora.

A continuación se presenta una lista del equipo mínimo necesario para fabricar harina extruída, basada en el equipo LEC(Low-cost Extrusion Cookers) propuesto por Harper et al. , en 1977.

- 1 molino
- 1 tanque de almacenamiento
- 1 mezclador con controles de alimentación
- equipo de transporte para conectar los tanques al molino.
- 1 extrusor Brady, impulsado por motor de 100 HP
- 1 enfriador rotatorio.
- 1 molino de martillos
- 1 sistema de empaque (puede sustituirse por operación manual)

Los precios para el equipo de extrusión calculados en base a una cotización realizada por KOEHRING FARM DIVISION, para la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, fechada en agosto 18 de 1976 fueron los siguientes:

Unidad base Extrusor-cocedor Brady el cual deberá ser impulsado por una flecha	85 514.00
Armazón de montaje para la flecha y caja de engranes	56 166.00
Motor eléctrico de 1800 RPM, 220 volts, trifásico, 100 HP, a prueba de goteo, con reductor de voltaje y cubierta protectora térmica. Botón de arranque y amperímetro (para zonas donde se dispone de energía eléctrica)	70 850.00

Lote de partes de repuesto	29 227.70
T O T A L	241 747.70

Nota: Los precios se hayan expresados en pesós, aplicando un factor de cambio de 23 pesos/dólar.

El costo del molino será igual, o menor, al estimado para el sistema diseñado para operar en zonas urbanas; menor si se adquiere un molino de menor capacidad, lo cual es posible ya que el proceso será intermitente. Además, puede usarse el mismo molino tanto para molienda de materia prima como para molienda de producto.

El sistema propuesto antes también resulta operante en zonas donde no existe energía eléctrica, en cuyo caso el extrusor sería accionado por el motor de un tractor. Esta alternativa reduce además el costo de equipo.

El enfriamiento del producto puede realizarse a condiciones ambientales, si la humedad del aire es baja y no existen posibilidades de contaminación por microorganismos. La operación de empaque será totalmente manual.

Es factible construir modelos de extrusores en los que el molino sea una parte integral (Figura 21). Y que, además, puedan ser accionados manualmente mediante una manivela. Este tipo de equipo podría ser usado en el medio rural a escala familiar.

Viabilidad del proceso

El precio calculado por kilogramo de producto es susceptible de reducción, ya que para estimar costos de manufactura se hicieron consideraciones similares a las de Stone (1976, 1977) tales como:

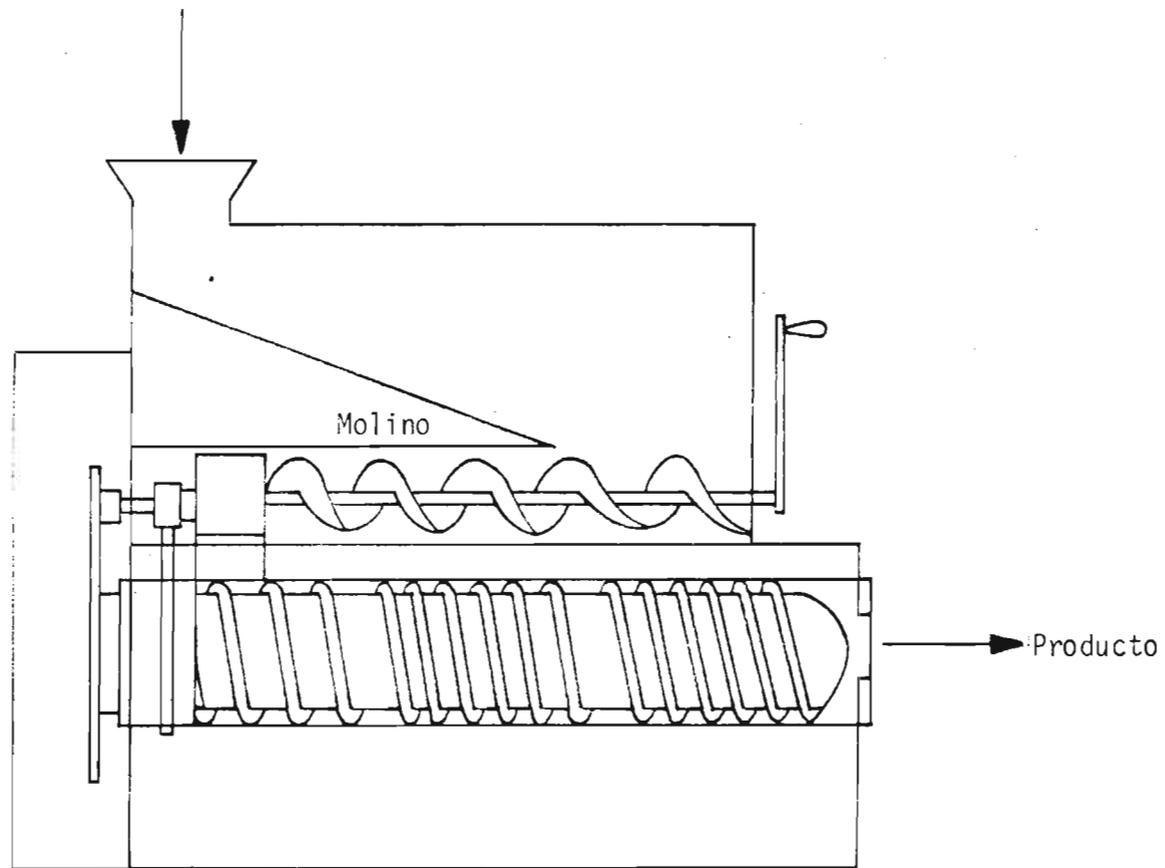


Figura 21. Diseño propuesto para un extrusor de bajo costo.

I. Materia prima

Cantidad comprada (% de producción)	120
-------------------------------------	-----

II. Empaque

Tipo de bolsa	papel-polietileno
Tamaño de bolsa	1 kg
Costo por bolsa (pesos)	1.20
Cajas de cartón	40 bolsas
Costo de la caja (pesos)	10.00

III. Mano de obra, electricidad, gastos generales y costos de transporte iguales que en el sistema de producción de harina precocida.

IV. Velocidad de Producción	500 kg/hora
-----------------------------	-------------

V. Mantenimiento	10% del valor de compra del equipo
------------------	------------------------------------

De donde puede verse que el costo estimado por concepto de empaque resulta alto y es factible sustituirlo por un empaque más barato pero que garantice la estabilidad del producto. Con ésto es posible obtener un producto de precio comparable al de la harina de maíz nixtamalizado distribuída por CONASUPO, cuyo precio de venta al consumidor es de 4.50 (cuatro pesos cin cuenta centavos).

A nivel rural es posible establecer un régimen intermitente de producción de harina precocida. Procesando sólo la cantidad destinada a la elaboración de tortillas.

El procesamiento del maíz es susceptible de realizarse como etapa inmediata posterior a la cosecha con la ventaja de eliminar así las pérdidas provo-

La eliminación de las pérdidas provocadas por plagas y roedores es atractiva, especialmente en el caso del maíz opaco porque puede contribuir al aumento del grado de aceptabilidad de estas variedades por parte de los agricultores.

NOMENCLATURA

α	constante de proporcionalidad
β	factor de tamaño y forma para la geometría del tornillo
C_p sól	calor específico del material seco
C_p líq	calor específico del agua
D	diámetro del barril
e	espesor de la hélice
ϕ	ángulo de la hélice
h	profundidad del canal
k	constante de la boquilla, en función de su geometría
K	constante para convertir KVA a energía calorífica
KVA	potencia requerida por el extrusor
λ	calor latente de vaporización
$M_{líq}$	flujo de humedad
$M_{sól}$	flujo de material seco
M_{fv}	masa de la fracción vaporizada
μ	viscosidad de la alimentación
n	número de canales paralelos del tornillo
N	velocidad del tornillo (revoluciones/tiempo)
ΔP	gradiente de presión
Q_a	flujo de arrastre
$Q_{boquilla}$	flujo de material a través de la boquilla
Q_{neto}	flujo neto

- Q_p flujo de presión
- T temperatura
- $\Delta T_{ev. inst.}$ caída de temperatura del producto extruído

APENDICE

MÉTODOS DE ANALISIS

Preparación de la muestra para determinar proteína total, lisina y triptofano.

- a) Tomar al azar 2 muestras de 15 granos.
- b) Remojar y eliminar el pericarpio con bisturí y pinzas. Dejar secar durante la noche.
- c) Triturar la muestra seca en molino (se usó molino con ciclón, cyclone sample mill modelo MS).
- d) Desengrasar la muestra durante 6 horas con hexano, se car al aire y pulverizarla.

I. PROTEINA TOTAL

El método empleado fué el micrométodo de Kjeldahl.

Fundamento:

Se basa en la oxidación de la materia orgánica, en la fijación del nitrógeno en forma de sal NH_4 (H_2SO_4) o $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y su desprendimiento en forma de NH_3 y/o NH_4OH , al agregársele NaOH , que va a ser fijado con el ácido bórico. Después su titulación con HCL 0.02N.

Reactivos:

H_2SO_4 Sp.gr. 1.84 libre de nitrógeno.

Mezcla catalizadora la cual se prepara de la siguiente manera:

99.9 g de K_2SO_4 , 4.1g de HgO y 0.8g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Solución de hidróxido de sodio - tiosulfato de sodio (50% y 5% respectivamente).

Solución al 4% de ácido bórico.

Solución indicadora. - Una parte de solución de rojo de metilo en etanol al 0.2% con 5 partes de verde de bromocresol en etanol al 0.2%.

Técnica:

Se pesan 30-40 mg de muestra y se colocan en un matraz de digestión. Añadir 1.0g de la mezcla catalizadora y 2 ml de ácido sulfúrico concentrado.

Digerir 40 minutos, enfriar y añadir la mínima cantidad de agua destilada para disolver los sólidos formados, enfriar. Transferir esta solución al aparato de destilación, lavando el matraz de 5 a 6 veces con 1 - 2 ml de agua destilada. Poner un matraz Erlenmeyer de 125 ml, con 6 ml de solución de ácido bórico y 3 gotas de solución indicadora, debajo del condensador; asegurando que la terminal de éste quede dentro de la solución.

Añadir al aparato de destilación 10 ml de solución de hidróxido de sodio-tiosulfato de sodio y empezar la destilación hasta obtener 50 ml de destilado.

Titular con el ácido clorhídrico hasta obtener la formación del color gris o la primera aparición del color violeta. Efectuar la determinación en un blanco, usando la misma cantidad de reactivos e igual proceso de digestión destilación y titulación.

Cálculos:

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{(\text{ml HCl en deter.} - \text{mol. blanco}) \times N \times 14.007 \times 100}{\text{mg Muestra}}$$

$$\% \text{ proteína} = \% \text{ de nitrógeno} \times 6.25$$

en donde

N = normalidad de HCl 0.02N

2. DETERMINACION DE LISINA

El método empleado para la determinación de lisina fué el de Tsai modificado por Villegas y Mertz.

Fundamento:

Se basa en una hidrólisis enzimática de las muestras con papaína y el bloqueo con cobre de los grupos alfa-amino de los aminoácidos libres, la formación del E-dinitropiridil-lisina (E-DNPyr-Lisina), al reaccionar el 2-cloro-3,5-dinitropiridina con el grupo epsilon amino de lisina. La absorción leída en 390 nm de el EDNPyr-Lisina.

Reactivos:

Solución enzimática de papaína merck (4 mg/ml) en buffer de fosfatos 0.03 M, pH 7.4.

Buffer de carbonatos 0.05M, pH 9.

Buffer de tetraborato de sodio 0.05M y pH 9.0

Suspensión de fosfato cúprico.

Solución A; 2.8g de $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en 100 ml de agua destilada.

Solución B; 13.6g de $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ en 200 ml de agua destilada.

Mezclar A en B con agitación, centrifugar, tirar el sobrenadante y el precipitado resuspenderlo 3 veces en 15 ml de buffer de tetraborato de sodio pH 9. centrifugar después de cada suspensión, después del tercer lavado resuspender el fosfato cúprico en 80 ml de buffer de tetraborato de sodio pH 9. El reactivo puede ser usado por una semana.

Solución de ácido clorhídrico 1.2N

Mezcla de aminoácidos: cada uno de los siguientes aminoácidos fué adquirido de Nutritional Biochemical Corporation.

Cistina	20 mg	Fenil alanina	40 mg
Metconina	20 mg	Valina	40 mg
Histidina	30 mg	Arginina	50 mg
Alanina	30 mg	Serina	50 mg
Isoleucina	30 mg	Acido aspártico	60 mg
Treonina	30 mg	Acido glutámico	300 mg
Tirosina	30 mg	Leucina	80 mg
Glicina	40 mg	Prolina	80 mg

Pesar 100 mg de la mezcla de aminoácidos y disolverla en 10 ml de buffer de carbonatos (Solución de aminoácidos).

Solución estandar de Lisina (L-Lisina HCl de NBC) 2500 mg/ml en solución de buffer de carbonatos.

Solución de 2-cloro-3,5-dinitro piridina (NBC): 30 mg de 2-cloro-3,5-dinitropiridina por ml de metanol.

Técnica:

Pesar 100 mg de muestra desengrasada y pulverizarla en un tubo de ensaye y adicionar 5 ml de solución enzimática de papaína. Asegurándose de que la muestra esté completamente mojada y agitar 2 veces durante la primera hora de incubación. preparar blanco con solución de papaína.

Incubar a 65°C durante 16 horas. Agitar y enfriar a temperatura ambiente y centrifugar.

Pipetear una alícuota de 1 ml del sobrenadante en un tubo de centrifuga y añadir 0.5 ml de solución buffer de carbonatos y 0.5 ml de suspensión de fosfato cúprico.

Agitar durante 5 minutos y centrifugar a 2.000 rpm.

Pipetear una alícuota de 1 ml del sobrenadante en un tubo de ensayo y añadir 0.1 ml de solución de 2-cloro-3,5-dinitripiridina.

Agitar vigorosamente.

Dejar los tubos durante dos horas a temperatura ambiente agitando cada 30 minutos.

Añadir 5 ml de HCl - 1.2 N. , a cada tubo y agitar.

Añadir 5 ml de acetato de etilo, tapar los tubos, mezclar invirtiendo los tubos 10 veces, extraer la fase superior con una jeringa que tenga adaptado un tubo de polietileno. Este paso debe repetirse 3 veces, transferir la fase acuosa a tubos de colorímetro calibrados.

Leer en el fotocolorímetro ("Spectronic 20") a una longitud de onda de 390 nm contra el blanco.

Cálculos:

$$\text{mg de Lys} = (D.O \times m) + b$$

$$\% \text{ Lys en muestra} = \text{mg Lys/mg muestra} \times 5 \times 100$$

$$\% \text{ Lys en proteína} = \% \text{ Lys en muestra} / \% \text{ proteína} \times 100$$

en donde: m (pendiente), b (ordenada al origen) son calculadas de las ecuaciones 1 y 2 de este apéndice.

Para el cálculo de las constantes m y b se preparó una curva estándar de la siguiente manera.

Curva Estándar:

De la solución estándar de Lisina que tiene 2500 mg/ml se toman 0, 1, 2, 3 y 4 ml y se lleva a un volumen final de 10 ml con buffer de carbonatos.

Tomar 1 ml de c/u de los tubos anteriores pasarlos a otro tubo, adicionar 4 ml de solución de papaína (450 mg en 45 ml de buffer de fosfatos).

Tomar 1 ml de solución de cada uno de los tubos anteriores y agregar .5 ml.

3. DETERMINACION DE TRIPTOFANO

El método utilizado fué el método de Opienska - Blauth modificado por Hernández y Bates.

Fundamento:

Se basa en una hidrólisis enzimática de las muestras con papaína y en la determinación colorimétrica de triptofano al reaccionar con FeCl_3 .

Reactivos:

270 mg de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ disueltos en 0.5 ml de agua destilada y diluida a 1 litro con ácido acético glacial (Reactivo A) Acido sulfúrico 30N. (reactivo B).

Mezclar los reactivos A y B (1:1 v/v), 1 a 2 horas antes de usarse (reactivo C).

Solución enzimática de papaína Merck (4 mg/ml) en buffer de acetatos de sodio 0.1N y pH 7.

Solución estándar de triptofano (0.1 mg/ml) en solución enzimática de papaína (4 mg/ml) en buffer de acetato de sodio 0.1 y pH 7.

Técnica:

Pesar entre 80 y 90 mg de muestra desengrasada y pulverizada en un tubo y añadir 3 ml de solución de papaína. Se tapan los tubos y se agitan (un tubo con solución de papaína únicamente es el blanco que se somete a todo el procedimiento).

Las muestras son incubadas a 65°C por 16 horas. Los hidrolizados se dejan a temperatura ambiente se centrifugan 5 minutos a 2,000 r.p.m.

Se pipetea 1 ml del hidrolizado a un tubo de ensayo que contiene 4 ml del reactivo C. Se agita vigorosamente y se incuba a 65°C durante 15 minutos para que desarrolle el calor. Dejar enfriar las soluciones coloreadas y transferirlas a tubos de colorímetro. Las lecturas se hacen en el fotocolorímetro (Bausch & Lomb spectronic 20) calibrado a una longitud de onda de 545 nm.

Cálculos:

$$\text{mg de try} = (D \cdot 0 \times m) + b$$

$$\% \text{ de try en muestra} = \frac{\text{mg try}}{\text{mg de muestra}} \times 3 \times 100$$

Para los cálculos anteriores se preparó una curva estándar de la siguiente manera:

Curva Estándar:

Se pesan 50 mg de D-L triptofano y se aforan a 500 ml con solución enzimática de papaína (4 mg/ml) en buffer de acetato de sodio .1N y pH7.

De esta solución, que tiene una concentración de 0.1 mg/ml, se toman 1 ml, 2ml, 2.5 ml, 3 ml hasta 4.5 ml y se llevan a un volumen final de 10 ml con buffer de acetato de sodio 0.1N y pH7. Las lecturas se realizan a 545 nm.

Con las lecturas se calculan m y b de la ecuación de la curva estándar donde:

$$y = mx + b$$

x = D.O. (densidades ópticas)

y = mg de triptofano

Y las constantes "b" (intersección en y) y "m" (pendiente de la recta se calculan por medio de las ecuaciones 1 y 2.

$$m = \frac{(\sum x y) - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (1)$$

$$b = \frac{\sum y - m(\sum x)}{n} \quad (2)$$

BIBLIOGRAFIA

1. Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F. y Griffin, Jr. E.L. (1969). "Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking". *Cereal Sci Today* 14 (1): 4-12.
2. Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F. y Griffin, Jr. E.L. (1969). "Roll and extrusion-cooking of grain sorghum grits". *Cereal Sci Today* 14 (11):372-376.
3. Bazúa, C.D. Guerra, R., y Rodríguez, A. (1977). "Optimización del proceso de nixtamalización para maíz normal y fitomejorado. Presentado en el II Congreso Nacional de Ingeniería Bioquímica, México, D.F., México, Noviembre 19-23.
4. Bernhardt, E.C. (1974). "Processing of Thermoplastic Materials". Pp. 154-302. Krieger Publishing Co. Huntington. N.Y.
5. Betanzos, E. (1975). "Producción, demanda y perspectivas del cultivo del maíz en México. " Informativo del Maíz (UNA, Perú). Número Extraordinario de Investigación. I :84-87.
6. Bookwalter, G.N., Kwolek, W.F., Boack, L.T. y Griffin, Jr. E.L. (1971). "Corn-meal soy flour blends: characteristics and food applications". *J. Food Sci* 36, 1026-1032.

7. Bookwalter, G.N., Warner, K., Brekke, O.L. y Griffin, Jr., E.L. (1974). "High-lysine corn fractions and their characteristics". J. Food Sci 39, 166-170.
- 8.- Brekke, O.K., Griffin, Jr., E.L. and Brooks, P. (1971). "Dry-Milling of Opaque - 2 (High-Lysine) Corn". Cereal Chem 48 (5):499-511.
9. Bressani, R., Paz, R. y Scrimshaw, N.S. (1958). "Chemical changes in corn during preparation of tortillas." J. Agric. Food. Chem. 6 (10):770-773.
10. Bressani, R. y Scrimshaw, N.S. "Effect of lime treatment on in vitro availability of essential aminoacids and solubility of protein fractions 115 in corn". J. Agric. Food Chem 6 (10): 774-778.
11. Buckle, T. Salazar de (1972). "El maíz opaco en la industria de alimentos". Tecnología (Colombia) IIT 77:33- .
12. Charbonniere, R. (1973). "Changes in various starches by cooking -extrusion processing. II Physical Structure of extruded products" Cereal Sci Today 18 (9): 286 (57)

13. Chávez, A. (1972). "El maíz en la nutrición de México" Memoria del Simposio sobre desarrollo y utilización de maíces de alto valor nutritivo. Pp. 9-11. Publ. Colegio de Postgraduados, ENA. Chapingo, Méx.
14. Christianson, D.D., Nielsen, H.C., Khoo, U., Wolf, M.J. y Wall, J.S. (1969). "Isolation and chemical composition of protein bodies and matrix proteins in corn endosperm" Cereal Chem. 46: 372-381.
15. Clark, H.E., Allen, P.E. Meyers, S.M., Tuckett, S.E. y Yamamura, Y. (1976). "Nitrogen balances of adults consuming opaque-2 maize protein". Am J Clin. Nutr. 20: 825-833.
16. Clark, H.E., Glover, D.V., Betz, J.L. and Bailey, L.R. (1977) "Nitrogen retention of young men who consume isonitrogenous diets containing normal, opaque - 2 or sugary 2-opaque 2 corn". H. Nutr. 107 (3): 404.
17. Conaim (1976). "La industria del maíz, 1973-76". Publicación de la Comisión Nacional de la Industria del Maíz para Consumo Humano.
18. Conway, H.F., Lancaster, E.B. and Bookwalter, G.N. (1968). "How extrusion-cooking varies product properties" Food Engineering Nov. 1968.

19. Conway, H.F. and Anderson, R.A. (1973). "Protein-fortified extruded food products". Cereal Sci. Today 18 (4): 94-97.
20. Crowley, P.R. (1975). "Evaluation of a Low - cost extrusion-Cooker for use in less developed countries". Comunicación Personal.
21. Dutra de Oliveira, J.E. and Pereira da Silva, L.J. (1971). "Nutritive value of opaque - 2 corn and its mixture with hybrid corn and wheat flour". J. Food Sci. 36:370.
22. Duvick, D.N. (1961). "Protein granules of maize endosperm cells". Cereal Chem. 38:374-385.
23. French, D. (1950). "Chemical properties of starch" En Chemistry and Industry of starch 2nd Ed. P. 191. Editado por R.W. Kerr. Academic Press Inc. Publishers. New York.
24. Gruthrie, H.A. (1971). "Introductory Nutrition". The C.V. Morby Co. Pag. 66.
25. Harper, J.M. and Harmann, D.V. (1973). "Research needs in extrusion cooking and forming". Trans. ASAE. 16 (5):941-943.
26. Harpstead, D.D. (1971). "High-Lysine Corn". Scientific American 225 (8):34-43.
27. Hernández, H. and Bates, L.S. (1969). "Modified Method for rapid try pto phan analysis of maize". Research Bull. No. 13 CIMMYT

28. Inglett, G.E. (1970). "Corn: culture, processing products". AVI Pub. Co. Westport, Conn. PP. 14-17, 96-97, 128-131, 266-171, 288-291, 296-301, 308-311.
29. Katz, S.H. Hediger, M.L. y Vallery, L.A. (1974). "Traditional maize processing techniques in the new world. "Science 184: 765-773.
30. Lambert, R.J., Alexander, D.E. and Dudley, J.W. (1969). "Relative performance of normal and modified protein (opaque-2) maize hybrids". Crop Science 9 (2): 242-243.
31. Lichtinger W.I. (1975) "La extrusión en alimentos". Tésos de la Facultad de Química. UNAM.
32. Lin, S.H.C. and Carter, C.M. (1975). "Effect of Extrusion-Cooking on the formation of free fatty acids in rice bran". Food Protein R&D Center Texas A& M University.
33. Lloyd, N.E. and Mertz, E.T. (1958). "Studies on corn proteins III. The glutelins of corn". Cereal Chem. 35: 156-168.
34. López París, L.C. (1972). "Observaciones sobre la susceptibilidad a hongos de almacenamiento en maíz opaco y normal" en Memoria del Simposio sobre desarrollo y utilización de maíces de alto valor nutritivo. Po. 135-138. Publ. Colegio de Postgraduados ENA. Chapingo, Méx.

35. Majmuder, S.K. (1972). "Vegetarianism: Fad, Faith, or Fact".
American Scientist 60: 175-179.
36. Mangelsdorf, P.C., Mc Neish, R.S. and Galinat, W.C. (1964).
Domestication of corn". Science 143: 538-545.
37. Matz, S.A. (1975)"Effect of the leaking on the nutrients" En "Nutritional
Evaluation of food processing" editado por Robert S. Harris y
Endel Karmas 2nd Ed. AVI. Pub. Co., Westport, Cun. P. 242.
38. Mercier, C. and Guilbot, A. (1973). "Changes in various starches
by cooking-extrusion processing: I Solubility and susceptibility
to bacterial amylase". Cereal Sci. Today 18 (9): 286(56).
39. Mercier, C. and Feillet, P. (1975). "Modification of carbohydrate
components by extrusion-cooking of cereal products". Cereal
Chem. 52: 283-297.
40. Mertz, E.T., Lloyd, N.E. and Bressani, R. (1958). "Studies on
corn proteins II. Electrophoretic Analysis of Germ and Endosperm
Extracts:. Cereal Chem. 35: 146-155.
41. Mertz, E.T., Bates, L.S. and Nelson, O.E. (1964) . "Mutant gene
that changes protein composition and increases Lysine content
in maize endosperm". Science 145: 279-280.

42. Mertz, E.T. Nelson, O.E., Bates, L.S., and Veron, O.A. (1966)
"Better protein quality in maize". *Advan. Chem Ser.* 57:228-
242.
43. Mertz, E.T. (1970)'. "Nutritive value of corn and its products".
In *Corn: culture, processing, products.* (Inglett, G.E. Ed.).
AVI Pub. Co. Westport, Conn. Pp. 350-359.
44. Mertz, E.T. (1974). "Genetic Improvement of Cereals". *Nutr.*
Rev. 32: 120-130
45. Misra, P.S. ?, Mertz, E.T. and Glover, D.V. (1975). "Studies on
corn proteins VIII. Free aminoacid content of opaque-2 double
mutants". *Cereal Chem.* 52 (6) :844-848.
46. Mottern, H.H., Buckle, T.S. de and Pardo, C. (1970). "Protein
enrichment of colobian corn cakes". *Cereal Sci, Today* 15 (4):
108-112.
47. De Muelenaere, H.J. H. and Buzzard, J.L. (1969). "Cooker-
extruders in service of world feeding". *Food Technol.* 23
(3): 345-351 (71-77).
48. Mustakas, G.C. and Griffin, Jr., E.L. (1964). "Production and
nutritional evaluation of extrusion-cooked full fat soybean flour".
J. Am. Oil Chemists Soc. 41 (9): 607-614.

49. Mustakas, G.C., Griffin, Jr., E.L. and Sohirs, V.E. (1966).
"Full fat soybean flours by continous extrusion cooking".
Advances in Chemistry Secies. "World Protein Resources"
No. 57.
50. Mustakas, G.C., Albrecht, W.J., Bookwalter, G.N., Me Ghee, J.E.,
Kwolek, W.F. and Griffin, Jr., E.L. (1970). "Extruder-processing
to improve nutritional quality, flavor and keeping of full-fat
soy flour". Food Technol. 24 (11):1290-1296 (102-108).
51. Nielsen H.C., Paulis, J.W. James, C. y Wall, J.S. (1970).
"Extration and structure studies on corn glutelin proteins.
Cereal Chem. 47: 501-512.
52. Osborne, T.B. and Mendel, L.B. (1914). "Nutritive properties of
proteins of the maize kernel ". J. Biol.Chem. 18: 1-16.
53. Páez, A.V., Helm, J.L. and Zuber, M.S. (1969). "Lysine content
of opaque - 2 maize kernels having different phenotypes". Grop
Science 9 (2): 251-253.
54. Paulis, J.W., James, C. and Wall, J.S. (1969). "Comparison of
glutelin proteins in normal and high-lysine corn endosperms".
J. Agric. Food Chem. 17 (6): 1301-1305.
55. Paulis, J.W. y Wall, J.S. (1969) "Albumins and globulins in extracts
of corn grain parts. "Cereal Chem. 46: 263-273.
56. Robutti, J.L., Hosney, R.C. and Deyoe, C.W. (1974). "Modified
opaque-2 corn endosperms I. Protein distribution and aminoacid

- composition ". Cereal Chem. 51: 163-
57. Robutti, J.L., Hosney, R.C. and Wassom, C.E. (1974). "Modified opaque-2 corn endosperms II. Structure viewed with a scanning electron microscope". Cereal Chem. 51: 173-179
58. Rossen, J.L. and Miller, R.C. (1973). "Food extrusion".
Food Technol. August 1973. P_p 46-54.
59. Sabiston A.R., ^{strommaes} and Kennedy, B.M. (1957) "Effect of baking on the nutritive value of proteins in wheat bread with and without supplements of noufat dry milk and of lysine" Cereal Chem. 34: 94-109.
60. Seib, P.A. (1975). "An introduction to food extrusion". Dept. of Grain Science and Ind. Kansas State University
Manhattan, Ks 66506.
61. Sanderude, K.G. (1971). "Continuous cooking of cereal grains and wheat flours by Short Time-High Temperature extrusion".
Presentado en el 73rd Annual Technical Conference and Trade Show. Kansas City U.S.A.
62. Smith, O.B. (1971). "Why use extrusion". Presented at the Symposium on Extrusion Cooking American Association of Cereal Chemists.
St. Louis Missouri. February 12, 1971.
63. Smith, O.B. (1974). "Extrusion-cooked snack in a fast growing market".
Cereal Sci. Today 19: 312-315, 343.

64. Smith, O.B. (1974). "Textures by extrusion processing". Presented in Short Course for Fabricated Food. American Chemical Society, Division of Agric. and Food Chem. Las Vegas, Nevada. March 28.
65. Smith, O.B. (1974). "Versatility of texturizing by extrusion cooking. Presented at the 67 th. Annual Meeting AIChE. Washington, D.C. December 2.
66. Smith, O.B. (1976). "Why extrusion cooking". Cereal Foods World 21 (1) 4 - 8.
67. Sodek, L. and Wilson, C.M. (1971). "Aminoacid composition of proteins isolated from normal, opaque-2 and floury-2 corn endosperm by a modified Osborne procedure". J. Agric. Food Chem 19 (6): 1144-1150.
68. Spadaro, J.J., Mottern, H.H. and Gallo, A.S. (1971). "Extrusion of rice with cottonseed and peanut flours". Cereal Sci. Today 16 (8): 238-240, 261.
69. Sterner, H. (1978). Comunicación personal.
70. Stone, M.L., Tribelhorn, R.E. and Harper, J.M. (1976). "Low-Cost extrusion cooker systems and costs". Presented at the First Int'l Congress on Engineering and Food. Boston, Mass. August 13-22.
71. Struinaes, A. and Kennedy, B.M. (1957). "Effect of baking on the nutritive value of proteins in rye bread with and without supplements of noufat dry mild and of lysine". Cereal Chem. 34 :196-200'
72. Tribelhorn, R.E., Stone, M.L. and Harper, J.M. (1976). "CSU Extrusion facility and related systems". Departament of Agricultural Engineering,

Colorado State University. Presented at the First Int'l Congress on Engineering and Food. Boston, Mass, August 13-22.

73. Tsen, C.C., Farrel, E.P., Hoover, W.J. and Crowley, P.R. (1975)
"Extruded soy products from whole and dehulled soybeans cooked at various temperatures for bread and cookie fortifications".
Cereal Foods World 20 (9):413-418.
74. Del Valle, F.R. (1972). "Producción industrial, distribución y mercado de harina para tortillas en México". En Memoria del Simposio sobre desarrollo y utilización de maíces de alto valor nutritivo. Pp. 157-182 . Publ. Colegio de Postgraduados, ENA, Chapingo, Méx.
75. Villegas, E. (1972). "Maíces de alta calidad nutricional". En Memoria del Simposio sobre desarrollo y utilización de maíces de alto valor nutritivo. . Pp. 13-19. Publ. Colegio de Postgraduados, ENA. Chapingo, Méx.
76. Villegas, E. and Mertz, E.T. (1971). "Chemical Screening methods for maize protein quality at CIMMYT. Research Bull. No. 20 CIMMYT.
77. Wall, J.S. James, C. y Donaldson, G.L. (1975). "Corn proteins: chemical and physical changes during drying of grain". Cereal Chem. 52 (6): 779-790.

78. Watson, S.A. and Yahl, K.R. (1967). "Comparison of the wet milling properties of opaque-2 high-lysine corn and normal corn". Cereal Chem. 44 : 488-.
79. Williams, M.A., Horn, R.E. and Rugala, R.P. (1976). "Direct extrusion of food products:. Presented at the AIChE National Meeting. Chicago, Ill. November 14-18.
80. Williams, M.A. (1977). "Direct extrusion of convenience foods". Cereal Foods World 22 (4): 152-154.
81. Wolf, M.J., Kheo, U. and Seckinger, . (1969). "Distritution and subcellular structure of endosperm protein in varieties of ordinary and high-lysine maize. Cereal Chem. 46: 253-
82. Wolf, M.J. Harris, C.C. and Donaldson, G.I. (1975). ", Corn endosperm: Protein distribution and aminoacid composition in amylo maize vs normal dent hybrid". Cereal Chem. 52 (6): 765-
83. Wolf, M.J. and Khoo, U. (1975). "Subcellular distribution and ensyme digestibility of endosperm proteins of amylo maize and normal corn". Cereal Chem 52. (6): 771-
84. Wu, Y.V. and Sex-on, K.R. (1976). "Protein concentrate from normal and high-lysine corns by alkaline-extraction: composition and propperties". J.Food Sci. 41 : 512-515.

85. Wu, Y.V. and Sexson, K.R. (1976). "Protein concentrate from normal and high-lysine corns by alkaline-extraction: preparation: J. Food Sci. 41 : 509-511.
86. Young, V.R., Ozalp, I., Cholakos, B.V. and Scrimshaw, N.S. (1971). "Protein value of Colombian opaque-2 corn for young adult men". J. Nutr. 101: 1475-1482
87. Young, V.R. and Scrimshaw, N.S. (1971) . "The Physiology of Starvation". Scientific American 225 (4):14-17.

INDICE DE TABLAS

	Pág.
1.1.1 Distribución de proteína en el germen y endospermo del maíz normal	5
1.1.2 Aminóácidos del germen y endospermo de maíz normal..	6
1.2.1 Aminoácidos en los endospermos de maíz opaco - 2 y normal	10
1.2.2 Composición del maíz opaco y de sus híbridos padres ...	13
1.2.3 Aminoácidos esenciales en el grano de maíz	15
1.2.4 Fracciones de proteína en el gluten de maíz opaco y normal	16
1.3.1 Diámetro medio de los cuerpos de zeína, proteína total y proteína soluble en alcohol de diferentes variedades de maíz	28
1.3.2 Composición de aminoácidos de las fracciones de proteína de las partículas subcelulares, y proteínas extraídas del endospermo del maíz	30
1.3.3 Cantidades relativas de las fracciones de proteína en endospermos de maíces normal y alta lisina	32
1.3.4 Comparación de aminoácidos de las zeínas extraídas con etanol al 70% y etanol-acetato, para maíces normal y opaco - 2	33
1.3.5 Análisis de aminoácidos de albúminas y globulinas del endospermo y germen	34
1.3.6 Análisis comparativo de aminoácidos de las glutelinas de maíz normal y opaco, separadas por varios métodos	36
1.3.7 Composición de aminoácidos de glutelinas preparadas por diferentes métodos	38
1.3.8 Composición de aminoácidos de las glutelinas de los endospermos de maíz normal, opaco-2, y harinoso 2 inato e híbrido	40

	Pág.
1.3.9 Composición de aminoácidos de las fracciones aminoácidos libres, albúmina y globulina de los endospermos de maíz innato R802 normal y opaco 2	42
1.3.10 Contenido de proteína en endospermos enteros y seccionados	43
1.3.11 Composición de aminoácidos de los endospermos de los fenotipos normal, opaco - 2, y modificado de las variedades V181 y Compuesto K	45
1.4.1 Calidad de diferentes tipos de proteína	49
1.4.2 Patrón de aminoácidos FAO comparado con el de maíz doble mutante	51
1.4.3 Calidad de proteína en mezclas de trigo y opaco	53
1.4.4 El maíz opaco - 2 como ingrediente en alimentos de consumo popular	54
2.9.1 Cuenta bacteriológica de una mezcla de cereales rica en proteína cocida en extrusores Sprout Waldron y Wenger	95
2.9.2 Porcentaje de destrucción de vitaminas durante la cocción por extrusión de una mezcla maíz/soya/cacahuete comparada con la destrucción que tiene lugar en un período de 2 minutos a ebullición	96
2.9.3 Efecto de la extrusión sobre la disponibilidad de lisina	96
2.9.4 Propiedades de las fracciones de maíz procesadas por extrusión	99
3.3.1 Formulaciones de los productos elaborados	113
4.1.1 Contenido de proteína, lisina y triptofano para granos crudos y procesados por extrusión bajo diferentes condiciones de temperatura y tiempo de residencia	117
4.1.2 Lisina disponible en productos elaborados a partir de harinas precocidas por extrusión	119
4.1.3 Resultados de la evaluación organoléptica de los productos elaborados	120

	Pág.
4.2.1 Proteína, lisina y triptofano en maíz crudo, harinas y tortillas	125
5.1.1 Costos para el sistema de fabricación de harina precocida	131
5.1.2 Costos de manufactura para el sistema de fabricación de harina precocida	132
5.1.3 Costos para el sistema de fabricación de harina de soya entera	136
5.1.4 Costos de manufactura para el sistema de fabricación de harina de soya entera	137
5.1.5 Costos para el sistema de producción de harina de maíz precocida por extrusión, bajo condiciones alcalinas	142
5.1.6 Costos de manufactura para harina de maíz precocida bajo condiciones alcalinas	143

INDICE DE FIGURAS

Fig.		Pág.
1	Proceso de nixtamalización y elaboración de tortillas	57
2	Comparación entre el proceso de extrusión y los procesos actuales de nixtamalización	66
3	Diagrama de bloques de una planta de extrusión típica para alimentos balanceados	69
4	Elementos de un extrusor de tornillo simple	73
5	Modelo ideal de diseño y operación de un extrusor de tornillo simple	75
6	Componentes del flujo de arrastre	78
7	Distribución de velocidad del material en la dirección longitudinal	78
8	Indices de solubilidad en agua y absorción de agua para harina de maíz cocida por extrusión	93
9	Contorno de respuesta para optimización de índice nutricional	103
10	Maíz normal (Compuesto Tlaxcala) y maíz opaco - 2 (Compuesto Bajío B-74 R)	104
11	Molino Super Line S para granos	105
12	Extrusor Brabender usado en la primera fase experimental ..	106
13	Extrusor Wenger X-5 para alimentos	108
14	Vista de la placa de soporte de un extrusor Wenger X-5	110
15	Masas obtenidas por extrusión con 1% y 0.2% de cal comparadas con masa de maíz nixtamalizado	122
16	Tortillas obtenidas de masas extruídas con 1% y 0.2% de cal comparadas con una tortilla de maíz nixtamalizado	123
17	Producto extruído al 0.2% de cal y tortilla elaborada a partir de él comparada con masas de maíz nixtamalizado y de harina de maíz nixtamalizado	126

Fig.		Pág.
18	Diagrama de flujo en una planta de harinas precocidas	130a
19	Diagrama de bloques para el sistema de fabricación de harina de soya entera	135
20	Sistema "A" de producción de harina de maíz precocida por extrusión, bajo condiciones alcalinas	141
21	Diseño propuesto para un extrusor de bajo costo	148

FOTOS: Cortesía de Carmen Durán de Bazúa