



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE HIDALGO**



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

Área Académica de Química

**CORRELACIÓN DE LAS ENTALPÍAS DE
GELATINIZACIÓN CON LOS ÍNDICES DE ABSORCIÓN DE
AGUA Y DE SÓLIDOS SOLUBLES EN AGUA DE GRANOS,
SÉMOLAS Y HARINAS DE MAÍZ NIXTAMALIZADO**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN

QUÍMICA EN ALIMENTOS

PRESENTA:

Gabriela Mariel Olguín Arteaga

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Eva María Santos López

Pachuca de Soto, Hidalgo; 2014

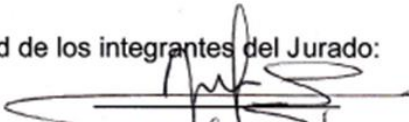
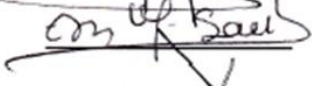


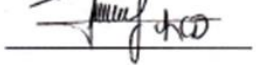
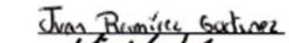



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
Licenciatura de Química en Alimentos

**M. en A. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO,
DIRECTOR DE CONTROL ESCOLAR
DE LA U.A.E.H.,
Presente:**

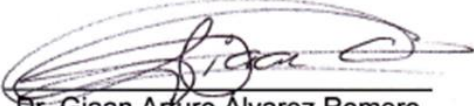
Por este conducto le comunico que el jurado asignado a la pasante de la Licenciatura en Química en Alimentos **Olgüin Arteaga Gabriela Mariel**, quien presenta el trabajo de tesis "**Correlación de las entalpías de gelatinización con los índices de absorción de agua y de sólidos solubles en agua de granos, sémolas y harinas de maíz nixtamalizado**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales, estos han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

Presidente	Dr. Roberto Ávila Pozos	
Primer vocal	Dra. Eva María Santos López	
Segundo vocal	Dr. Javier Castro Rosas	
Tercer vocal	Dra. Araceli Castañeda Ovando	
Secretario	Dra. Judith Jaimez Ordaz	
Primer suplente	M. en Q. Juan Ramírez Godínez	
Segundo suplente	Q. A. Andrés García Guerrero	

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
"Amor, Orden y Progreso"
Pachuca Hidalgo, 15 de mayo de 2014.


Dr. Gian Arturo Álvarez Romero
Coordinador Adjunto de la Licenciatura
en Química en Alimentos

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE HIDALGO



CENTRO DE INVESTIGACIONES
QUÍMICAS



Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería,
Carretera Pachuca - Tulancingo Km. 4.5, Ciudad del Conocimiento,
Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
Tel. +52 771 7172000 ext. 2518
cgomez@uaeh.edu.mx

En la razón sólo entraran las dudas que tengan llave. No te rindas, por favor no cedas, aunque el frío queme, aunque el miedo muerda, aunque el sol se esconda, y se calle el viento, aún hay fuego en tu alma, aún hay vida en tus sueños. Porque la vida es tuya y tuyo también el deseo, porque cada día es un comienzo nuevo, porque esta es la hora y el mejor momento.

Mario Benedetti



Esta investigación fue apoyada por el Programa de Estímulos a la Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica del CONACYT, convocatoria 2012, en la modalidad INNOVATEC, Proyecto número 178916, de la Empresa FRITOS TOTIS, S.A. de C.V.



El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de microbiología de alimentos II, de Química en Alimentos, del Área Académica de Química en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, bajo la dirección de la Dra. Eva María Santos López.

Parte de los resultados se presentaron en el 5to Congreso Internacional, "Sobre Inocuidad, Calidad y Funcionalidad de los Alimentos en la Industria y Servicios de Alimentación" Hacia una Cultura de Calidad en el Consumo de Alimentos "CUCCAL" Mazatlán, Sinaloa, México, obteniendo primer lugar en la Categoría Trabajos Libres del Congreso.

Agradecimientos

Dios, gracias por ser mi gran guía.

Elena Arteaga Neri, gracias desde el momento que decidiste ser madre, con la firme idea de protegerme y darme todo lo que necesitara a lo largo de mi vida. Cada acto tuyo me demuestra cuán importante soy para ti, siempre poniéndome en primer lugar. Por enseñarme a ser fuerte, independiente, y la persona que hoy soy.

Por cada conversación nocturna, contándote que locura (totalmente necesaria) había hecho en el día, por aceptar mi forma de pensar aun no compartiendo muchas de mis opiniones. Por celebrar este logro conmigo y estando segura que nos faltan muchos por compartir.

Alfredo Anotá Antely, gracias por enseñarme el verdadero valor del compromiso, y que si cada paso que das en tu vida lo haces con el corazón, todo se disfruta más. Por ser mi guía, mi confidente, aquella persona que está ahí siempre que lo necesito, ya sea para decirme "todo estará bien" y hacerme sonreír o simplemente recibir un fuerte regaño. Gracias papá por estar conmigo en este proyecto.

Adri, por acompañarme en los momentos de trabajo (la mayoría de las veces obligada), ya que por el simple gusto de trabajar bajo presión, solían ser en la noche.

A todos mis amigos que de alguna manera contribuyeron para que yo realizara este trabajo. En especial a ti **Anel**, a través de los años sólo sucede algo, el cariño y apoyo entre nosotras es más grande.

A mi querido grupo de amigos universitarios: **Joel** mi amigo incondicional, compañero en fiestas, tareas, momentos difíciles, raros, fascinantes y sobre todo muchas travesuras. Tu amistad es uno de los regalos más grandes en mi vida y sé que seguiremos juntos por mucho tiempo. **Julieta**, gracias por ser una "amilla" excelente, mi cómplice, estar con

Gaby aventurera y principalmente, por ser una hermana perfecta♥. **Isauro**, gracias por mostrarme lo fuerte que puedo ser🙌☺, un tanto molesto pero te quiero, además mi amigo el guapo y él que me dice Maribel. **Marysol**, como tú lo dijiste, gracias por ser mi compañera de tesis, de servicio, de nuestro primer viaje✈, pero sobre todo por ser una buena amiga y compartir frabullosos momentos con la banda del carrisol. **Beto**, por perder mi bata, (aún no superado) te quiero. **Diana**, gracias por los consejos y apoyo en cada ocasión que lo necesite. **Karina**, juntas desde los primeros semestres, gracias por tu amistad y los buenos momentos. **Irving**, mi amigo él de los abrazos bonitos, por las fiestas, las desveladas y las clases zombie en la mañana. A tod@s gracias por hacer de la universidad una etapa increíble de mi vida.

Dra. Eva. Doy gracias por formar parte de su equipo, por compartirme sus conocimientos, por el apoyo que me brindo para realizar este proyecto que a pesar de todas las distracciones y momentos extraños; hoy estoy presentando. Por tu amistad, por cada plática que tenía contigo, donde me hacías tener confianza en mí y sentir que estaba haciendo lo correcto.

Dra. Judith. Por ser una excelente tutora en algunos semestres, brindarme su confianza, darme buenos consejos y apoyarme académicamente siempre que lo necesite.

Dra. Araceli. Gracias por siempre ayudarme y dar respuesta a todas mis dudas.

A cada uno de los **sinodales** por dedicar parte de su tiempo en la lectura de este trabajo, sus opiniones fueron precisas para la presentación de este proyecto.

Elena y Alfredo ♥♥♥

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
1. RESUMEN	1
2. ANTECEDENTES	2
2.1 Maíz: origen y clasificación.....	2
2.2 Estructura del grano de maíz.....	4
2.3 Composición química del grano de maíz.....	7
2.3.1 Almidón.....	7
2.3.2 Proteínas.....	11
2.3.3 Fibra.....	12
2.4 Industria del maíz.....	12
2.5 Cambios del maíz durante los diferentes procesos de molienda.....	15
2.6 Análisis térmico.....	20
3. JUSTIFICACIÓN	22
4. OBJETIVOS	23
4.1 Objetivo general.....	23
4.2 Objetivos específicos.....	23
5. MATERIAL Y MÉTODOS	24
5.1 Materiales.....	24
5.2 Pre-tratamiento.....	25
5.3 Caracterización de harinas.....	25
5.3.1 Determinación de humedad en harinas.....	25
5.3.2 Determinación del índice de absorción de agua (WAI) e índice de sólidos solubles en agua (WSI).....	25
5.3.3 Determinación de entalpías y temperaturas pico de gelatinización.....	26
5.4 Análisis estadístico.....	27
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28

6.1 Granos enteros.....	28
6.2 Sémolas y granillos	30
6.3 Harinas de maíz nixtamalizado.....	33
6.4 Análisis global de resultados obtenidos para todas las muestras	37
6.5 Correlación entre entalpía, WAI, WSI y predicción de la entalpía a partir de WAI y WSI	43
7. CONCLUSIONES	48
8. REFERENCIAS	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de las partes del grano de maíz.	7
Tabla 2. Codificación de muestras de granos enteros, sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado	24
Tabla 3. Valores de T_p , ΔH , WAI y WSI en lotes de granos enteros de maíz.	29
Tabla 4. Valores de T_p , ΔH , WAI y WSI en lotes de sémolas y granillos de maíz.	31
Tabla 5. Valores de T_p , ΔH , WAI y WSI en lotes de harinas de maíz nixtamalizado.....	33
Tabla 6. Valores de T_p , ΔH , WAI y WSI en lotes de granos, sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado.	37
Tabla 7. Coeficientes de correlación entre ΔH , WAI y WSI.	44
Tabla 8. Parámetros de la regresión lineal múltiple de predicción para la entalpía a partir del WAI y WSI.....	46
Tabla 9. Valores de entalpía de predicción obtenidos por el modelo y por el calorímetro diferencial de barrido	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Especie cultivada del maíz <i>Zea mays</i> L.	2
Figura 2. Estructura del grano de maíz.	4
Figura 3. Micrografía electrónica de barrido del endospermo de maíz: (a) endospermo harinoso con abundantes espacios intracelulares, (b) endospermo vítreo con escasos espacios intracelulares.	6
Figura 4. Estructura de la amilosa.....	9
Figura 5. Estructura primaria de la amilopectina.	9
Figura 6. Micrografías de luz polarizada de muestras de almidón de maíz a 25°C: (a) sin tratamiento (b) nixtamalizado.....	11
Figura 7. Micrografía electrónica de barrido del endospermo de maíz: (a) endospermo harinoso gelatinizado y (b) endospermo vítreo gelatinizado.....	16
Figura 8. Etapas del proceso de gelatinización en gránulos de almidón de maíz.....	17
Figura 9. Representación esquemática de un termograma obtenido por DSC mostrando un endoterma correspondiente a una transición en primer orden como la fusión.....	21
Figura 10. Termogramas de muestras de maíz (A) grano entero, (B) sémola, (C) granillo y (D) harina de maíz nixamalizado, calculado por análisis DSC en muestras al 50 % de humedad.....	28
Figura 11. Relación entre entalpía de gelatinización y absorción de agua en muestras de granos enteros, sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado.	42
Figura 12. Relación entre entalpía de gelatinización y sólidos solubles en agua en muestras de granos enteros, sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado.....	43
Figura 13. Relación entre la entalpía de gelatinización, índices de absorción de agua e índices de sólidos solubles en agua.....	45



Resumen

*“La enseñanza que deja huella no es la que se hace de
cabeza a cabeza, sino de corazón a corazón”*

Howard G. Hendricks

1. RESUMEN

En la industria de las botanas se ha encontrado de forma empírica que se obtienen productos con grandes y numerosas ampollas, cuando el almidón esta muy gelatinizado a causa de procesos de molienda, lo que genera textura y apariencia indeseable de los productos. En el presente estudio se midió la entalpía de gelatinización por calorimetría diferencial de barrido de muestras de granos enteros, sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado y se correlacionó con los índices de absorción de agua y de sólidos solubles en agua para elaborar un modelo de predicción de entalpía. Los índices de absorción de agua y de sólidos solubles se midieron de acuerdo con el método empleado por Anderson *et al.* (1969). Los resultados indican que mientras más intenso es el proceso de molienda más bajos son los valores de entalpía de gelatinización, 8.41 ± 1.21 J/g para granos enteros, 8.05 ± 1.22 J/g para sémolas, 5.33 ± 1.87 J/g para granillos y finalmente, las harinas nixtamalizadas presentaron valores entre 2.35 y 3.28 J/g. Se concluyó que mientras más bajos son los valores de entalpía de gelatinización, mayor es el índice de absorción de agua (WAI) e índice de sólidos solubles en agua (WSI). Se establecieron correlaciones entre el WAI, WSI y la entalpía de gelatinización, siendo factible el modelo de predicción de entalpía para sémolas, granillos y harinas, no así para el caso de granos.



Antecedentes

*“Solamente aquel que contribuye al futuro tiene derecho a
juzgar el pasado”*

Friedrich Nietzsche

2. ANTECEDENTES

2.1 Maíz: origen y clasificación

El maíz ha sido un importante cultivo y principal alimento de muchos países en el mundo (Osorio *et al.*, 2011). Es una planta de la familia gramínea que se caracteriza por producir un grano cubierto perteneciente a la clase de las angiospermas (Figura 1). La palabra maíz es de origen indio-caribeño, su significado es “Lo que sustenta la vida” y su nombre científico es *Zea mays* L. siendo la única especie cultivada de este género (Mondragón, 2004; Contreras, 2009).



Figura 1. Especie cultivada del maíz *Zea mays* L. (News Oaxaca, 2014)

Hoy no hay duda del origen americano del maíz, surgió aproximadamente entre los años 8000 y 600 a. C. en Mesoamérica. Desde finales del siglo XIX se postularon varias hipótesis para explicar cómo se originó el maíz. Sin embargo, cada una de ellas fue desacreditada hacia finales de los años 80's cuando la

teoría del origen del maíz con base en la evolución progresiva del teocintle ganó el acuerdo entre la comunidad científica (Acosta, 2009; Kato *et al.*, 2009).

El género *Zea* pertenece a la Familia *Poaceae* (que comprende más de 600 géneros); incluye cinco especies de México y Centroamérica: *Zea diploperennis*, *Zea perennis*, *Zea luxurians*, *Zea nicaraguensis* y *Zea mays* L., esta última es la especie a la que corresponde el maíz y se agrupa en cuatro subespecies: *Zea mays* L. *ssp. huehuetenangensis*, *mexicana*, *parviglumis* y *mays* (Kato *et al.*, 2009).

La primera clasificación artificial del maíz la hizo Sturtevant en 1899, basándose en la textura o estructura del endospermo, considerando siete grupos (tunicado, reventón, cristalino, amiláceo, dentado, ceroso y dulce).

El maíz tunicado es uno de los tipos más primitivos y se identifica por presentar cada grano envuelto en su propia bráctea (hoja pequeña que nace del pedúnculo de las flores) y no tiene valor comercial. El maíz reventón se caracteriza por tener granos pequeños con endospermo cristalino, es capaz de explotar cuando se somete a calor y se utiliza para elaborar palomitas. El maíz cristalino presenta granos con endospermo vítreo y translúcido, por el contrario, el maíz amiláceo tiene granos con endospermo harinoso, suave y de gran tamaño. Por otra parte, el maíz dentado tiene granos con endospermo formado por almidón vítreo, tanto en su exterior como interior y están cubiertos en la parte superior con almidón harinoso que a la madurez origina una depresión central superior, esto se debe a una mayor hidratación y da origen a la forma característica de diente (Kawaljit *et al.*, 2004; Singh *et al.*, 2009). El maíz dulce es un grano completamente arrugado cuando está maduro y posee un gen recesivo en el cromosoma 4, el cual impide la conversión de algunos azúcares solubles en

almidón, tiene por tanto un mayor contenido de estos azúcares, finalmente, el maíz ceroso se diferencia por la estructura del almidón el cual está constituido por 100% de amilopectina, lo que origina un almidón de característica gomosa parecido al de la yuca. En el maíz normal, la molécula de almidón está compuesta por 75% de amilopectina y 25% de amilosa (Acosta, 2009; Ram *et al.*, 2012).

2.2 Estructura del grano de maíz

El grano de maíz maduro o la carióspside se divide en tres partes fundamentales: pericarpio o cascarilla, endospermo y germen (Figura 2). La proporción de cada una de ellas varía con respecto a la variedad de maíz, debido a que existen diferencias genéticas, ambientales y en la cantidad de nutrientes, lo que origina propiedades físicas y químicas específicas (Singh *et al.*, 2009), pero en general el pericarpio constituye el 7-10%, el endospermo el 82-85% y el germen el 3-10% del peso total del grano (Contreras, 2009; Serna, 2009).

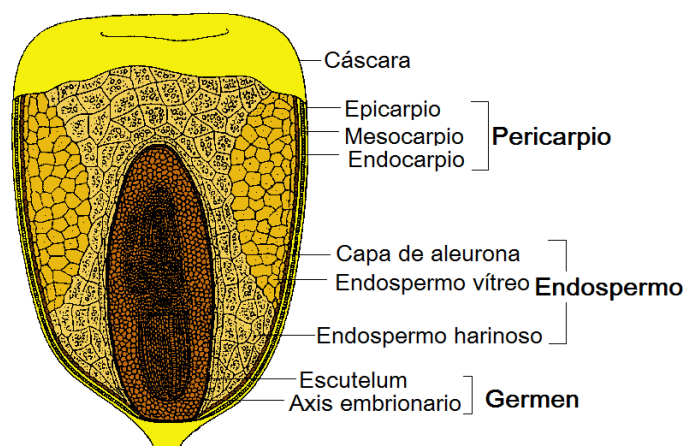


Figura 2. Estructura del grano de maíz (Mondragón, 2004).

a) El pericarpio es la capa exterior que cubre a la semilla y al mismo tiempo está compuesto de varias subcapas (epicarpio, mesocarpio y endocarpio), también cuenta con una cutícula externa de naturaleza cerosa que le sirve de protección, en la cual las funciones primordiales son: proteger el grano contra agentes bióticos (insectos y microorganismos), impedir la pérdida de humedad y distribuir agua y nutrientes durante la germinación. Igualmente, está caracterizado por tener un alto contenido de fibra (hemicelulosa 67% y celulosa 23%), cenizas y un contenido mínimo de almidón (Mondragón, 2004).

b) El endospermo es el componente principal del grano de maíz. Esta constituido por almidón (82-83%) y proteínas (8%) (Kawaljit *et al.*, 2004). Se forma de células en las que se encuentran gránulos de almidón embebidos en una matriz de proteína donde se distinguen dos zonas de endospermo: vítreo y harinoso (Osorio *et al.*, 2011). El endospermo harinoso se encuentra en la parte más céntrica del grano y rodea al germen con unidades de almidón esféricas de gran tamaño, presenta interacciones débiles con cuerpos proteicos y abundantes espacios intracelulares, permitiendo que el agua se difunda rápidamente durante el calentamiento; mientras tanto, en el endospermo vítreo, la pared celular es delgada, los gránulos de almidón son de forma poligonal con espacios intracelulares escasos y separados por una matriz de proteína más gruesa que sirve como pegamento para mantener la estructura de la célula (Figura 3), este tipo de endospermo tiene de 1.5 a 2% más proteína y es más difícil de romper (Singh *et al.*, 2009; Osorio *et al.*, 2011). Los cuerpos proteicos que conforman el 8% del endospermo son glutelinas y prolaminas, esta última representa entre el 35 y 40% de la proteína total del grano. Finalmente, la capa externa del endospermo, la aleurona está constituida por aceite y proteína, juega un papel muy importante

durante la germinación y puede ser azul o roja e impartir dicha coloración al grano maduro (Ortega *et al.*, 1986; Serna, 2009).

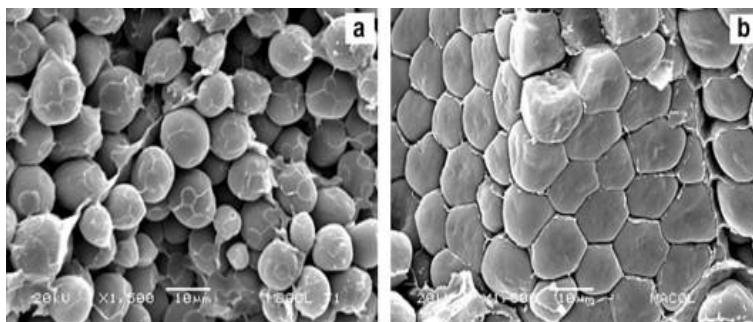


Figura 3. Micrografía electrónica de barrido del endospermo de maíz: (a) endospermo harinoso con abundantes espacios intracelulares, (b) endospermo vítreo con escasos espacios intracelulares (Pineda *et al.*, 2012).

La proporción del tipo de endospermo determina la dureza y densidad del grano. En consecuencia, afecta al procesamiento de alimentos durante la molienda seca, húmeda y el tiempo de cocción durante la nixtamalización (Kawaljit *et al.*, 2004; Osorio *et al.*, 2011).

c) El germen se encuentra adherido al endospermo y sirve como almacén de nutrientes y hormonas importantes en la etapa de germinación, se identifica por un bajo contenido de almidón, presencia importante de azúcares solubles alrededor del 10% (fructosa-glucosa), alto contenido en aceite (33%), de este porcentaje el 43.5% corresponde al ácido linoleico, el 36.6% al ácido oleico, 15.95% al ácido palmítico y el porcentaje restante corresponde a los ácidos esteárico, linolénico, araquídico y mirístico. El contenido de proteínas en el germen es abundante (cerca del 26% del total de proteínas en el grano) y se integra por fracciones de albúminas y globulinas, además de ser la materia prima más

importante en la industria extractora y refinado de aceite (Mondragón, 2004; Serna, 2009).

2.3 Composición química del grano de maíz

La composición química del maíz ha sido ampliamente estudiada. Como se mencionó anteriormente, las partes principales del grano difieren considerablemente en su composición, como se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química de las partes del grano de maíz.

Componentes	Pericarpio	Endospermo	Germen	Total
Proteínas	3.7	8	18.4	9.91
Lípidos	1	0.8	33.2	4.76
Fibra	86.7	2.7	8.8	2.66
Cenizas	0.8	0.3	10.5	1.42
Almidón	7.3	87.6	8.3	71.5
Azúcares	0.34	0.62	10.8	2.58

Expresado como % en base seca. (FAOa, 2014, tomada de Watson 1987).

2.3.1 Almidón

El almidón es el polisacárido más profuso del grano de maíz, por lo tanto, influye de manera notable en la funcionalidad como ingrediente de numerosos productos, ya sea en la industria de alimentos, textil, papelera, farmacéutica, entre otras, además de ser biodegradable, provenir de fuentes renovables y ser relativamente barato (Quiang *et al.*, 2012). Este se almacena en gránulos dentro del endospermo con diferentes tamaños, formas y composición (De la Rosa, 2009). El almidón es relativamente denso e insoluble en agua fría, y su capacidad espesante se logra, sólo cuando en el proceso de hidratación interviene el efecto

del calor. Las propiedades específicas del almidón afectan características de textura, volumen, consistencia, humedad y vida útil de los alimentos, además de ser una excelente fuente de energía ya que se digiere totalmente en el sistema digestivo humano y proporciona el 70-80% de las calorías consumidas en la dieta (Osorio *et al.*, 2011; Quintanar *et al.*, 2011).

Estructuralmente el almidón está definido por una mezcla de polisacáridos: amilosa y amilopectina, los cuales forman círculos concéntricos dentro del gránulo (Kuakpetoon y Wang, 2007). A pesar de que estas dos moléculas tienen básicamente la misma estructura, poseen diferentes tipos de enlace, lo que provoca un arreglo espacial en forma helicoidal para el caso de la amilosa y de doble hélice para la amilopectina (Mondragón *et al.*, 2004).

La amilosa es un polímero (Figura 4) formado por cadenas lineales de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α (1-4). Sin embargo, se ha demostrado que existen algunas ramificaciones las cuales están unidas a la cadena lineal por enlaces α (1-6), alrededor de cada 180 - 320 unidades. Dichas ramificaciones se encuentran de manera espaciada lo que permite que este polímero se comporte de manera lineal. La masa molar de la amilosa es de aproximadamente 1×10^5 a 1×10^6 Da con un promedio de 500-6000 unidades de D-glucosa. Los enlaces glucosídicos en la configuración α , confieren a la amilosa una estructura helicoidal, en la que cada vuelta de la hélice consta de seis unidades de glucosa. Los grupos hidroxilo se posicionan en el exterior de la hélice, mientras que el interior contiene átomos de hidrógeno y es por tanto lipofílico, lo cual permite a la amilosa formar complejos con las cadenas de ácidos grasos de los glicéridos presentes. La mayoría de los almidones contienen alrededor de 25% de amilosa (Fennema, 2000; Singh *et al.*, 2003; Mondragón, 2004; Mondragón *et al.*, 2004).

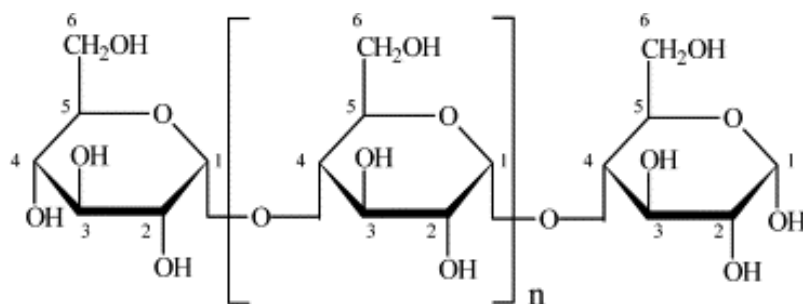


Figura 4. Estructura de la amilosa (Herrero *et al.*, 2004).

La amilopectina es una molécula muy grande, está formada por cadenas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α (1-4) y presenta enlaces α (1-6) en los puntos de ramificación (Figura 5). La masa molar de la amilopectina varía entre 1×10^6 a 1×10^8 Da y consiste en una cadena principal que contiene el único extremo reductor, la cual tiene numerosas ramas a las que se unen, por su parte, varias cadenas (Singh *et al.*, 2003). Las ramas de la molécula de amilopectina forman racimos, y constituyen el 75% de los almidones comunes (Fennema, 2000).

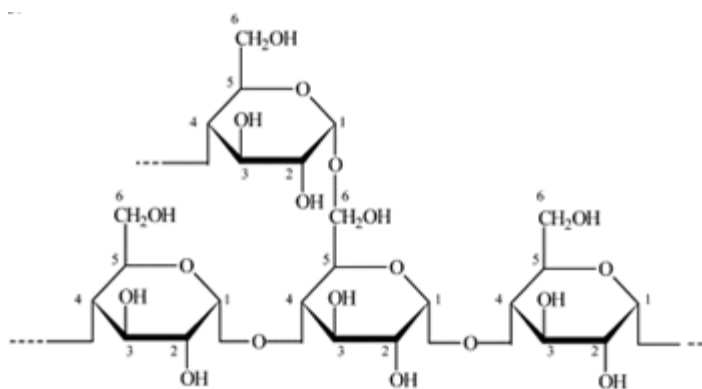


Figura 5. Estructura primaria de la amilopectina (Herrero *et al.*, 2004).

Dentro de los gránulos, el almidón tiene un arreglo semicristalino, debido al ordenamiento y longitud de las cadenas de amilopectina, esta cristalinidad varían del 15 a 45 % (Quiang *et al.*, 2012). El arreglo estructural concéntrico dentro del gránulo origina dos regiones principales que se alternan, la región cristalina formada por cadenas de racimos de amilopectina y la región amorfa formada por puntos ramificados de amilopectina y amilosa (Santos y Gomes, 2014). Las cantidades de estos polímeros y su organización dentro de la estructura granular del almidón le confieren propiedades fisicoquímicas, funcionales y a su vez una aplicación tecnológica específica (Bello *et al.*, 2002).

Los almidones con mayor porcentaje de amilosa requieren de menor energía para desorganizar su estructura en comparación con aquellos que presentan mayores contenidos de amilopectina (Kuakpetoon y Wang, 2007; Schimer *et al.* 2013).

Los gránulos de almidón, cuando son observados bajo luz polarizada muestran una cruz (Figura 6) este fenómeno es conocido como birrefringencia, el cual indica que existe un alto grado de orientación molecular dentro del gránulo, este fenómeno se pierde al someter a calentamiento el grano de maíz (De la Rosa, 2009).

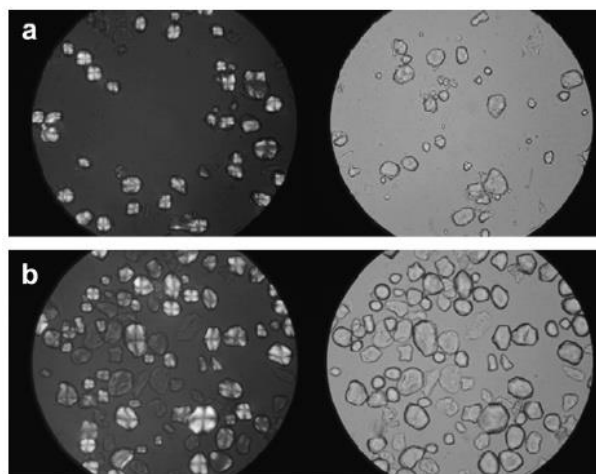


Figura 6. Micrografías de luz polarizada de muestras de almidón de maíz a 25°C: (a) sin tratamiento (b) nixtamalizado (Méndez *et al.*, 2008).

2.3.2 Proteínas

Las proteínas son moléculas complejas constituidas por carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y en ocasiones azufre, hierro, cobre, fósforo y zinc. Están formadas por aminoácidos unidos entre sí mediante enlaces peptídicos. Después del almidón, las proteínas son el segundo componente químico más importante en el grano y se halla en todos sus tejidos, sin embargo, la calidad de la proteína del maíz es pobre, debido a que es deficiente en aminoácidos esenciales, lisina y triptófano (Milán *et al.*, 2004). Las proteínas, según Landry (1970), se clasifican de acuerdo a su solubilidad. En hidrosolubles se encuentran las albúminas y en soluciones iónicas a las globulinas, que se localizan principalmente en el germen. Aproximadamente el 80 % de las proteínas son de reserva, estas proteínas de almacén llamadas prolaminas se forman durante la maduración del grano encontrándose encerradas en los cuerpos proteicos del endospermo, son insolubles en agua pero solubles en alcohol, esta fracción proteica para el caso del maíz adquiere el nombre de zeína y tiene un contenido

nutricional bajo, debido a la ausencia de aminoácidos esenciales, y abundantes en aminoácidos no esenciales como prolina, glicina, ácido glutámico y aspártico. La fracción que corresponde a las glutelinas son las proteínas estructurales localizadas en el endospermo y están asociadas con las prolaminas (Serna, 2009). La presencia de éstas proteínas se ha correlacionado con la dureza del endospermo ya que las proteínas dentro del gránulo están unidas covalentemente a la estructura de amilosa-amilopectina, mientras que las proteínas superficiales se encuentran asociadas débilmente al exterior de los gránulos (Mondragón, 2004; Voet, 2004).

2.3.3 Fibra

La fibra se encuentra principalmente en el pericarpio, se clasifica en soluble e insoluble. La fracción insoluble está formada básicamente por celulosa, compuesta por polímeros lineales de glucosa unidos por enlaces β (1-4) y hemicelulosa que es un polímero ramificado de diversos azúcares (xilosa, arabinosa, galactosa, ácido glucónico y glucosa). La fibra soluble se conforma por β - glucanos y pentosas (arabinosa y xilosa) que tienen la capacidad de ligar agua. El contenido de fibra en los granos sin cáscara será evidentemente menor que en los granos enteros (Serna, 2009; Cornejo *et al.*, 2013).

2.4 Industria del maíz

En la actualidad, el maíz es el segundo cultivo con mayor producción en el mundo. En cuanto a rendimiento tiene el mayor valor de grano por hectárea. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO_b, 2014) reporta una

superficie sembrada de 7, 372,218.19 ha con una producción obtenida de 22, 069,254.42 ton y un rendimiento de 3.19 ton/ha. Este grano es de gran importancia económica para la elaboración de productos nixtamalizados (tortillas y botanas), así como materia prima de un gran número de productos industriales. El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2013) estima que existen más de 800 productos derivados del maíz y también se utiliza como alimento para animales.

La industria molinera del maíz tiene como objetivo producir endospermo quebrado, sémolas y harinas de diferentes granulometrías ya que el maíz se consume hervido, tostado o sometido a diferentes procesos (Quintanar *et al.*, 2009). Cabe destacar que actualmente uno de los productos industriales que tiene mayor relevancia, es la harina de maíz nixtamalizado que suple el 45% del mercado nacional. La facilidad de elaboración de productos a base de esta harina ha hecho que su consumo vaya en aumento (Cornejo *et al.*, 2013).

Entre los diversos tratamientos que se realizan al grano de maíz se incluyen, molienda seca, molienda en húmedo y nixtamalización.

La molienda seca se basa en la separación física de las partes anatómicas del grano de maíz. El germen se separa para retirar la porción susceptible a enranciamiento (Singh *et al.*, 2009) y posteriormente, se somete a una molienda y tamizado de diferentes tamaños. Los productos obtenidos tras la desgerminación son: trozos de endospermo grueso (grits), ideales en la transformación de cereales para desayuno, en segundo lugar se encuentran las sémolas (de menor tamaño que los grits) destinadas a la industria cervecera y de botanas. Finalmente, las harinas (de diferente granulometría y menor tamaño que las sémolas), se emplean para diferentes productos donde sobresale la industria de pastas y galletas. El pericarpio comúnmente llamado salvado es importante en la elaboración de

productos de panificación para fabricar alimentos ricos en fibra y en la alimentación animal (Contreras, 2009; Ustarroz, 2010).

La operación de molienda húmeda es más compleja ya que uno de los usos más importantes del maíz es como materia prima para la obtención de almidón, el objetivo de la industria es conseguir el máximo rendimiento de gránulos sin dañar. Este tipo de molienda extrae los componentes químicos del grano de una manera más efectiva y se obtienen subproductos de mayor valor agregado. A diferencia de la molienda seca donde sólo se separan las partes anatómicas, la molienda húmeda consiste en suavizar la estructura del grano por medio de remojo (48-50°C/30-48h) en una solución de dióxido de azufre al 2%, luego se retira el agua y los granos ablandados pasan a molinos para una reducción de tamaño que le permita liberar al germen de manera íntegra. El germen es destinado a la industria extractora de aceites y las partes restantes de endospermo se tamizan para eliminar los restos de pericarpio, enseguida se somete a una reducción más fina para la liberación de los gránulos de almidón. Si es conveniente el almidón puede ser convertido en jarabes de maíz, maicenas, bioplásticos o etanol, dependiendo de las necesidades de la industria (Serna, 2009; Ustarroz, 2010).

Dentro de la molienda húmeda, la nixtamalización se considera como una adaptación del proceso tradicional, el cual fue desarrollado por los aztecas y mayas. La palabra proviene de los vocablos náhuatl *nextli*, o cenizas de cal, y *tamalli* que significa masa de maíz cocido. El proceso de nixtamalización logra que el maíz adquiera una consistencia suave que permite convertirlo con facilidad en una masa uniforme (Sefa *et al.*, 2004; Pappa y Palacios, 2010).

Este proceso ha sido estudiado durante mucho tiempo pero se introdujo de manera industrializada, por primera vez en México, en la década de 1950 (Sikora *et al.*, 2010). La nixtamalización consiste en la cocción del maíz con un tratamiento alcalino (0.6 a 1.2 % hidróxido de calcio del peso de maíz), durante un período de 50-70 min, entonces el grano se deja remojar en el licor de la cocción (nejayote) por un tiempo de 12-14 h. Enseguida se realiza un drenado y lavado para remover el exceso de calcio y materia seca pérdida. El contenido de calcio de granos de maíz aumenta notablemente dependiendo del tiempo de remojo (Quintanar *et al.*, 2009; Pappa y Palacios, 2010).

El nixtamal obtenido ésta listo para la molienda húmeda y obtener una masa, ésta puede ser utilizada para la preparación de tortillas o deshidratarla para producir harina de maíz nixtamalizado con diferentes granulometrías. Igualmente, esta harina se prehidrata y se utiliza para elaborar tortillas, una amplia gama de botanas y cereales para desayuno (Bello *et al.*, 2002; Sefa *et al.*, 2004).

2.5 Cambios del maíz durante los diferentes procesos de molienda

La molienda rompe la estructura del grano, dispersando los componentes celulares y los polímeros de almidón por lo que se generan cambios estructurales y químicos que afectan las propiedades funcionales de los productos (Sikora *et al.*, 2010; Quintanar *et al.*, 2011).

Dentro de estos cambios, destaca la gelatinización de los gránulos de almidón. Los gránulos de almidón no dañados son insolubles en agua fría, pero pueden absorber agua de manera reversible (Fennema, 2000). La baja solubilidad que presentan es debida a su estructura cristalina. Sin embargo, cuando se

calientan, los gránulos de almidón pueden absorber agua y sufren el proceso denominado gelatinización (Figura 7). En dicho proceso se rompe el orden de las moléculas en el gránulo, ocasionando hinchamiento irreversible granular, pérdida de estructura, pérdida de birrefringencia y solubilización del almidón (Chen *et al.*, 2011).

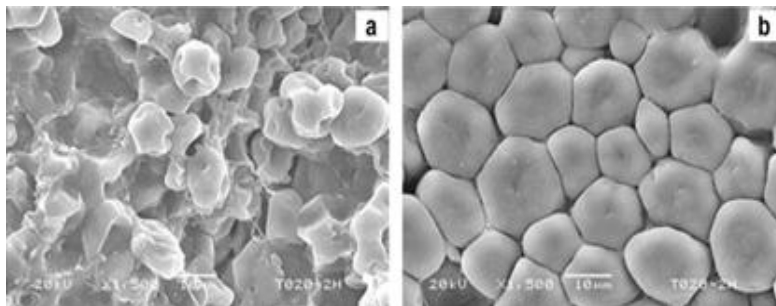


Figura 7. Micrografía electrónica de barrido del endospermo de maíz: (a) endospermo harinoso gelatinizado y (b) endospermo vítreo gelatinizado (Pineda *et al.*, 2012).

La gelatinización total se produce en un intervalo amplio de temperatura (62-84 °C). La gelatinización del almidón a partir de nixtamal se da en el intervalo de temperatura de 70.3-80.3 °C (Quintanar *et al.*, 2010), siendo los gránulos más grandes los que gelatinizan primero y comprendiendo tres etapas principales:

a) Difusión del agua dentro del gránulo; cuando empieza absorber agua, los puentes de hidrógeno de la región amorfa se rompen permitiendo que el agua se asocie con los grupos hidroxilo libres.

b) Fusión de la región amorfa; es la transición donde las cadenas de amilosa se difunden en medio acuoso y tienen una mayor movilidad dentro del gránulo, en este punto el hinchamiento es reversible.

c) Desintegración de las zonas cristalinas, cuando el calentamiento es continuo, el hinchamiento es irreversible debido a la disociación de las dobles

hélices de la amilopectina (Figura 8). La dispersión completa no es alcanzada con excepción, quizá de existir condiciones de alta temperatura, exceso de agua y fuerzas de cizalla. Tras el enfriamiento de una pasta de almidón de maíz se tiene un gel rígido, firme y viscoelástico (Sikora *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 2011).

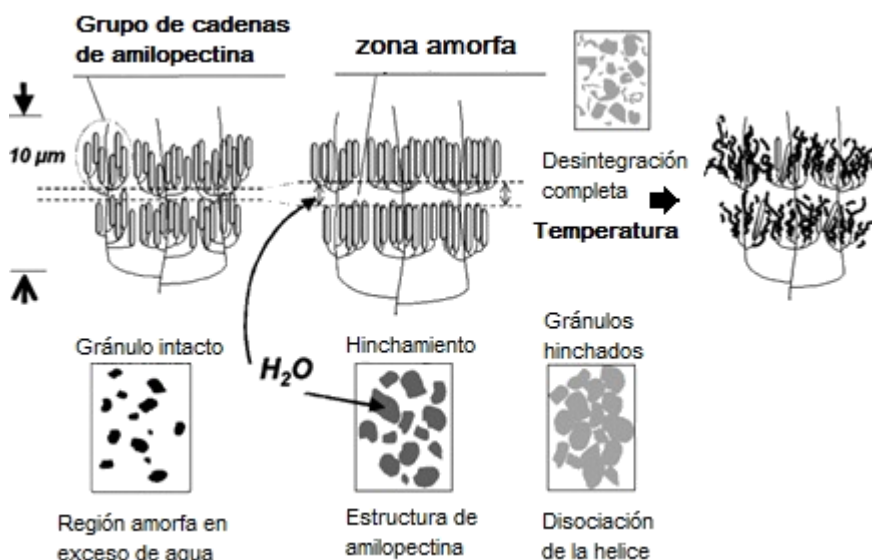


Figura 8. Etapas del proceso de gelatinización en gránulos de almidón de maíz (Knorr *et al.*, 2006).

La gelatinización del almidón es un proceso endotérmico que corresponde a la desintegración de la molécula de almidón, que se encuentra en una conformación con dobles hélices y pasa a una conformación amorfa. La temperatura de gelatinización y la energía necesaria para que haya este cambio (entalpía), pueden ser determinadas por calorimetría diferencial de barrido, DSC por sus siglas en inglés (Chen *et al.*, 2011).

La nixtamalización, al incluir molienda en húmedo, favorece el aumento del contenido de amilosa al separarse de la estructura de la amilopectina; mientras que, en la molienda en seco se observa una proporción significativamente mayor de cadenas largas de amilopectina (Singh *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2011).

Otro cambio importante ocurrido durante la nixtamalización, es su efecto sobre las proteínas. Estas son moléculas dinámicas con tendencia a numerosos cambios conformacionales; las proteínas de maíz, que se encuentran alrededor del gránulo de almidón en una matriz amorfa, se modifican durante este proceso, de tal manera que la amilosa, la amilopectina y las proteínas hidratadas forman un sistema que altera notablemente las propiedades viscoelásticas (Quintanar *et al.*, 2009).

Según Ortega *et al.* (1986), Vivas *et al.* (1987) y Rojas-Molina *et al.* (2008), las concentraciones de proteínas después de la nixtamalización son más bajas (albúminas, globulinas y zeínas), se puede inferir que la reducción en la concentración de proteína se debe a los cambios de solubilidad. En las zeínas la solubilidad se disminuye en un 58% durante el proceso de nixtamalización mientras que las glutelinas y el residuo insoluble muestran un comportamiento opuesto mediante el aumento de su concentración, como consecuencia de fenómenos de polimerización (Quintanar *et al.*, 2010).

También se han asociado los valores de índice de absorción de agua (WAI) y el índice de sólidos solubles en agua (WSI) a cambios importantes ocurridos en el maíz después de la etapa de molienda, afectando directamente la funcionalidad como materia prima de diversos productos (Milán *et al.*, 2004).

Al solubilizarse algunas proteínas y cadenas de amilosa procedentes del almidón, se observa un aumento en el contenido de sólidos solubles (mayor WSI) y en la capacidad de absorber agua (mayor WAI) (Milán *et al.*, 2004). Así pues, largos períodos de secado favorecen la rotura de las cadenas largas de amilosa y generación de cadenas más cortas (dextrinas) que retienen un mayor número de moléculas de agua (mayor WAI) lo que puede dar lugar a masas pegajosas. También una mayor absorción de agua propicia un aumento en la absorción de

aceite, incrementa el número y tamaño de ampollas (burbujas de aire) en botanas fritas, siendo indeseable en este tipo de productos. Tanto los valores de WAI como WSI están en función de factores como pH, contenido de proteína, grado de gelatinización y tamaño de partícula (Milán *et al.*, 2004; Fernández *et al.*, 2011).

Las partículas más gruesas, ideales en la fabricación de botanas, dan como resultado una menor viscosidad ya que los niveles de absorción de agua son menores, por el contrario para la elaboración de tortillas se requieren harinas de tamaño de partícula fina para desarrollar flexibilidad y cohesión en la masa. Sin embargo, no sólo es el tamaño de partícula un parámetro importante en la cohesión, plasticidad y suavidad de la harina de maíz; su funcionalidad depende de los cambios fisicoquímicos internos que tienen lugar durante el tiempo de remojo en el almidón (Milán *et al.*, 2004; Fernández *et al.*, 2011; Cornejo *et al.*, 2013).

Por último, otro cambio en el maíz se genera en el pericarpio, una de las más importantes fuentes de fibra dietética requerida para la digestión humana; durante el proceso de molienda seca se pierde al ser retirado en la reducción de tamaño de partícula (Gutiérrez *et al.*, 2010). Mientras que en el proceso de nixtamalización, el pericarpio sufre cambios físicos y químicos; la pérdida de la fracción soluble, eliminación parcial de hemicelulosa, además de promover la eliminación de la capa delgada de cera, permitiendo así la entrada simultánea de calcio y agua al interior del grano. El papel de la cal es importante, ya que permite la absorción de agua más rápido y la distribución a través de los componentes del grano y modifica así las capas externas, de modo que la fracción de pericarpio se vuelve gomosa y pegajosa (Gutiérrez *et al.*, 2010; Quintanar *et al.*, 2011).

2.6 Análisis térmico

Los métodos calorimétricos se han aplicado de manera extensa en el estudio de la estructura y las transiciones de fase del almidón. El propósito de los instrumentos térmicos diferenciales, es registrar la diferencia entre el cambio de entalpía que ocurre en una muestra y un material inerte de referencia cuando ambos se calientan. En el DSC, la muestra y la referencia son calentadas y enfriadas a la misma velocidad, es decir, la energía absorbida dentro de cada una está sujeta a un programa de temperatura controlada, por lo que se pueden medir directamente los cambios de flujo de calor asociados con transiciones de primer (punto de fusión) y segundo orden (cristalización).

Las transiciones de fusión son utilizadas para monitorear cambios como desnaturalización de proteínas, gelatinización de almidón y fusión de cristales de grasa. Las transiciones de cristalización son de utilidad para caracterizar gránulos de almidón (Singh *et al.*, 2003).

Los datos obtenidos de las transiciones se registran en un termograma (Figura 9) que relaciona el flujo calórico, con una función de temperatura cuando se presenta la gelatinización del almidón, en ese momento el equipo suministra más calor a la referencia para equilibrar el sistema. El pico endotérmico se relaciona con la temperatura promedio a la cual se lleva a cabo la gelatinización, este parámetro se conoce como temperatura pico de gelatinización (T_p) o de gelatinización (T_g). El área dentro de la curva, es la medida de la entalpía de transición (ΔH), es decir, el calor necesario para llevar a cabo la gelatinización del almidón (Navarrete, 1998; Tovar, 2008; Rouzaud, 2012; Quiang *et al.*, 2014).

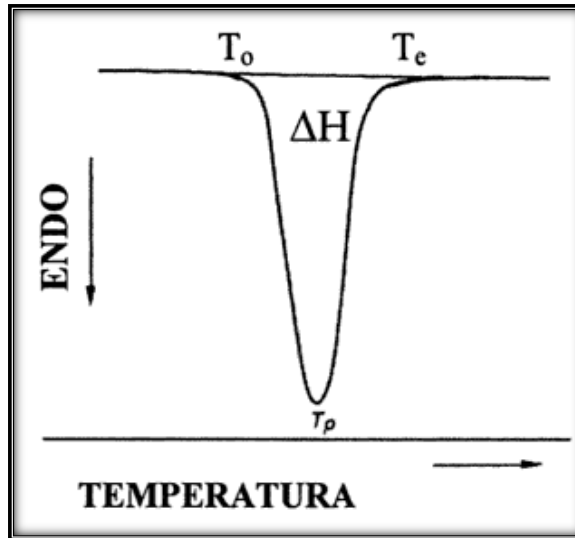


Figura 9. Representación esquemática de un termograma obtenido por DSC mostrando un endoterma correspondiente a una transición en primer orden como la fusión

T_o = temperatura de inicio de transición

T_p = temperatura del pico

T_e = temperatura final de la transición



Justificación

*No tengo talentos especiales, pero sí soy profundamente
curioso.*

Albert Einstein

3. JUSTIFICACIÓN

Los granos de maíz, al ser ricos en almidón, son afectados en los diferentes procesos de molienda a los que son sujetos para la transformación en diversos subproductos, principalmente sémolas y harinas de maíz nixtamalizado. Estos son ingredientes base en la industria de botanas y uno de los principales problemas, ya que se ha encontrado de forma empírica que, mientras mayor es el tiempo de molienda, temperatura y tiempos de cocción, se genera una mayor gelatinización del almidón, provocando en las harinas y sémolas un aumento en la absorción de agua al elaborar el producto y un aumento en el número y tamaño de las ampollas que se forman después del freído.

La calidad de la materia prima en la industria de botanas está en función del color, granulometría, absorción de agua, grado de gelatinización del almidón y absorción de aceite; una mayor absorción de agua y menor granulometría es ideal para la textura de las tortillas mientras que las harinas para elaborar botanas necesitan una granulometría más gruesa y un menor cocimiento (menor absorción de agua) para que no se formen ampollas y absorban menor cantidad de aceite.

La obtención del valor de entalpía es sumamente fácil de calcular por medio de la calorimetría diferencial de barrido; no obstante, tiene la desventaja de un mayor costo económico y en tiempo al realizarla. La existencia de una correlación de valores de entalpía con índices de absorción de agua e índices de sólidos, así como una ecuación para la posible predicción de este valor, tendría un importante impacto en la industria de botanas, ayudando a determinar la calidad de las materias primas utilizadas.



Objetivos

“Las grandes mentes tienen objetivos, las demás deseos”

Irving Washington

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Determinar mediante análisis estadístico la correlación entre entalpías de gelatinización, índices de absorción de agua y sólidos solubles en agua para establecer una ecuación que permita predecir valores de entalpía en granos enteros, sémolas y harinas de maíz nixtamalizado.

4.2 Objetivos específicos

- ❖ Determinar valores de entalpía, índice de absorción de agua e índice de sólidos solubles en agua en muestras de granos enteros, sémolas y harinas de maíz nixtamalizado mediante el uso de técnicas establecidas por normas internacionales.
- ❖ Analizar estadísticamente la correlación entre las variables estudiadas. Y establecer un modelo estadístico que permita predecir un valor de entalpía a partir de valores de WAI y WSI.
- ❖ Validar el modelo desarrollado para muestras reales de la industria botanera.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO

Material y Métodos

“Sí buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo”

Albert Einstein

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1 Material

Se analizaron 5 lotes diferentes de granos de maíz, 11 lotes de sémolas, 12 lotes de granillos y 38 lotes de harinas de maíz nixtamalizado divididos en 5 grupos, siendo muestras proporcionadas por la empresa FRITOS TOTIS, S.A. de C.V. durante los años 2011- 2013. En todos los casos se trató de maíz tipo dentado.

Las muestras fueron codificadas de la siguiente forma: granos de maíz entero (M1-M5), sémolas (S1-S11), granillos (G1-G12), y harinas de maíz nixtamalizado divididos en 5 grupos (HR0, HR1, HTS, HTM, HTT), tal y como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Codificación de muestras de granos enteros, sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado

Tipo de muestra	Número de muestras	Codificación
Grano de maíz entero	5	M
Sémolas	11	S
Granillo	12	G
Harina regular 0	8	HR0
Harina regular 1	8	HR1
Harina taco shell	12	HTS
Harina tamale	7	HTM
Harina top-top	3	HTT

5.2 Pre-tratamiento

De cada una de las muestras se tomaron aproximadamente 30 g y se redujo el tamaño de partícula con un molino para café (Hamilton Beach) y tamiz FIC. malla número 100, con diámetro de 150 μm .

5.3 Caracterización de harinas

5.3.1 Determinación de humedad en harinas

Esta prueba se basa en cuantificar la pérdida de agua de la muestra de harina. El método utilizado fue el 925.10 de la AOAC (1995). Para la medición se usaron charolas de aluminio a peso constante. Se pesaron 2 g aproximadamente de muestra molida, la cual se colocó en una estufa con recirculación de aire a $130^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 1 h. Transcurrido este tiempo las charolas se enfriaron a temperatura ambiente en un desecador hasta peso constante y posteriormente fueron pesadas. Todos los análisis se realizaron por triplicado y el porcentaje de humedad se calculó por diferencia de peso.

5.3.2 Determinación del índice de absorción de agua (WAI) e índice de sólidos solubles en agua (WSI)

Para la determinación del índice de absorción de agua (WAI) e índice de sólidos solubles en agua (WSI) se siguió la técnica descrita por Anderson *et al.* (1969). Este análisis permite cuantificar el porcentaje de agua incorporada a la harina y el porcentaje de sólidos solubles disueltos en agua. Se tomaron por triplicado, muestras de harina de 5 g las cuales se colocaron en tubos para

centrífuga de 30 mL previamente pesados. Se adicionaron 30 mL de agua destilada y se homogenizaron las muestras. Los tubos permanecieron en reposo durante 30 min. Transcurrido ese tiempo los tubos se centrifugaron (centrífuga HERMLE, Alemania) a 3000 rpm durante 15 min. El sobrenadante se vertió cuidadosamente en charolas de aluminio a peso constante para evaporar el agua en la estufa a 130°C durante 24 h.

El parámetro de WAI se calculó como el porcentaje de agua absorbida tras la centrifugación respecto al peso inicial de la muestra. El parámetro WSI se calculó como el porcentaje de sólidos presentes en el sobrenadante respecto al peso inicial. Ambos parámetros se calcularon sobre extracto seco.

5.3.3 Determinación de entalpías y temperaturas pico de gelatinización

La medición de la entalpía y temperatura pico de gelatinización se realizó empleando el método para masa de maíz nixtamalizado descrito por Quintanar *et al.* (2011). Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido (DSC, 822e/400, Mettler-Toledo, Columbus, OH). Se calibró con Indio y los datos fueron analizados utilizando el software STARe. Aproximadamente 1 g de muestra seca se mezcló con agua desionizada para obtener una mezcla con 50% de contenido de humedad y se equilibró a temperatura ambiente durante 1 h, para asegurar una hidratación completa.

Se realizó un barrido de temperatura de 25 a 120°C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, empleando 7 mg de muestra hidratada en celdas de aluminio herméticamente selladas. Todas las mediciones se llevaron a cabo por triplicado.

5.4 Análisis estadístico

Para analizar los resultados obtenidos se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) con el paquete estadístico Statgraphics Plus versión 4.0, con el fin de determinar si existían diferencias entre cada una de las muestras. Para identificar las muestras significativamente diferentes se realizó una comparación de medias mediante la prueba Tukey HSD ($P < 0.05$). Las medias muestrales se analizaron de acuerdo al teorema central del límite (Miller, 2002). Posteriormente, se corroboró la correlación existente entre las variables y se determinó la ecuación del modelo de regresión lineal múltiple.



Resultados y Discusión

Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa.

Mahatma Gandhi

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron un total de 66 muestras determinándose por triplicado WAI, WSI y propiedades térmicas (T_p y ΔH). En la Figura 10 se aprecian los termogramas de muestras representativas de grano entero, sémola, granillo y harina de maíz nixtamalizado.

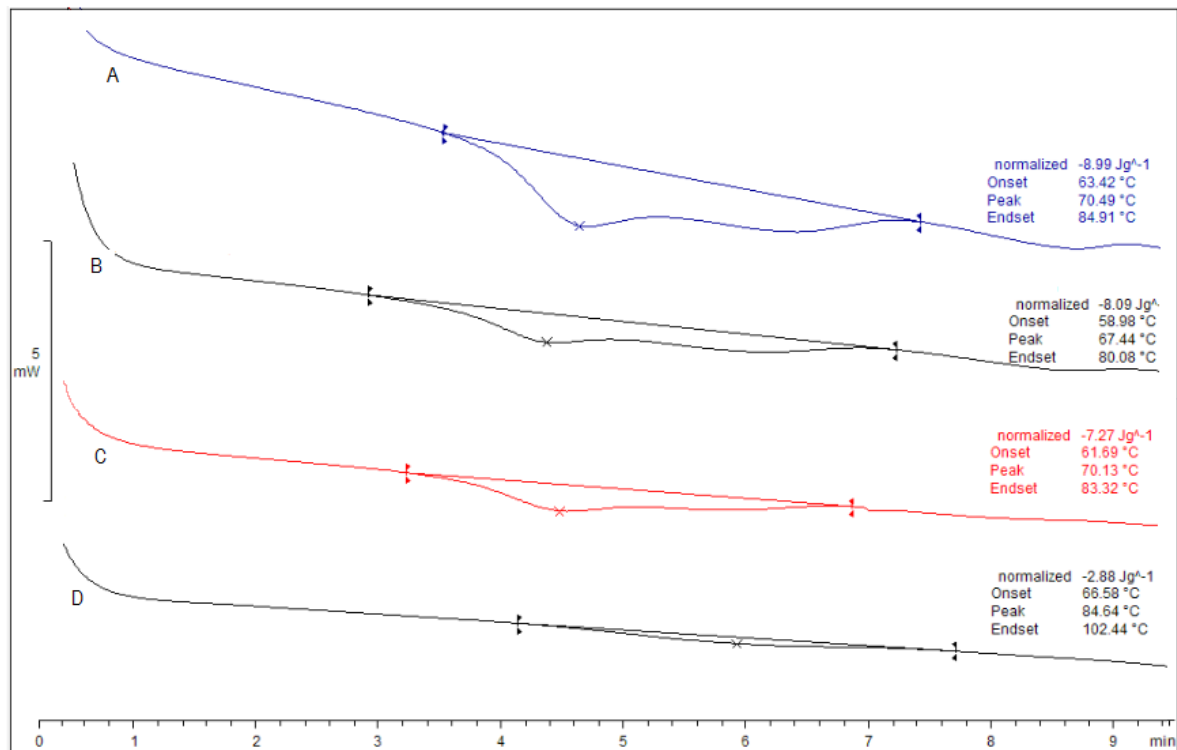


Figura 10. Termogramas de muestras de maíz (A) grano entero, (B) sémola, (C) granillo y (D) harina de maíz nixtamalizado, calculado por análisis DSC en muestras al 50 % de humedad.

6.1 Granos enteros

En la tabla 3 se muestran los valores obtenidos de entalpía, WAI y WSI en los análisis realizados a granos enteros de maíz.

Tabla 3. Valores de T_p , ΔH , WAI y WSI en lotes de granos enteros de maíz.

Granos enteros	T_p (°C)	ΔH (J/g)	WAI %	WSI %
M 1	75.97 (2.33) ^b	8.51 (0.13) ^b	1.07(0.001) ^{ab}	6.38 (0.13) ^c
M 2	74.73 (1.13) ^b	9.61 (0.72) ^b	1.06 (0.03) ^a	4.89 (0.04) ^b
M 3	75.94 (0.91) ^b	9.63 (0.61) ^b	1.11 (0.01) ^{bc}	4.31 (0.12) ^a
M 4	69.81 (0.43) ^a	7.25 (0.25) ^a	1.13 (0.01) ^c	5.07 (0.27) ^b
M 5	70.88 (0.35) ^a	7.07 (0.31) ^a	1.13 (0.02) ^c	6.09 (0.12) ^c
Media (DE), N=15	73.46 (2.90)	8.41 (1.20)	1.10 (0.04)	5.35 (0.81)

^{a-c}: medias en la misma columna con diferente letra son significativamente diferentes ($P < 0.05$). Valores promedio de tres repeticiones (desviación estándar).

Se distinguen diferencias significativas entre las muestras en ΔH y T_p , se encontró que presentan valores entre 7.07-9.63 J/g y 69.81-75.97 °C respectivamente. Valores altos de entalpía de gelatinización se asocian con una mayor proporción de cadenas de amilopectina haciendo evidente el orden cristalino existente en la muestra, y confirmando que el gránulo no presenta daño en su estructura o que es mínimo. Aun siendo los granos de la misma variedad, las diferencias encontradas pueden atribuirse a que se trata de cultivos diferentes así como el proceso de obtención y almacenamiento; ya que, algunos tratamientos de secado suelen utilizar aire caliente entre 62 y 84°C, favoreciendo el inicio del proceso de gelatinización y causando una disminución en la entalpía.

En la tabla 3 se observan los valores promedio aquí obtenidos los cuales son 73.46 ± 2.90 °C y 8.41 ± 1.20 J/g, siendo próximos a los reportados por varios autores. Chen *et al.* (2011) mencionan que la temperatura pico de gelatinización y la entalpía de maíz entero y sin ningún tratamiento es de 71.2 °C y 8.1 J/g, respectivamente. Singh *et al.* (2003) reporta entalpías de 12.1 J/g para maíz blanco y en variedades pigmentadas entre 9.7-13.7 J/g mientras que Schirmer *et*

a.l. (2013) encontró valores de 71.1 °C y 10.97 J/g, lo que podría considerarse como típico de los almidones normales.

En el índice de absorción de agua se observan valores entre 1.06 - 1.13 % que se consideran bajos y está asociado con el grado de deterioro en el almidón. Los granos enteros presentan una baja absorción puesto que el grano de maíz no ha sido sujeto a algún tratamiento térmico que afecte en gran medida su estructura.

Con respecto al índice de sólidos solubles, los componentes del grano que intervienen en los valores obtenidos, son el germen, ya que tiene proteínas en él como son las albúminas que son solubles. Por otra parte, el grano conserva el pericarpio que también aporta material en cuanto al WSI, ya que la fracción de fibra soluble puede estar contribuyendo a que el contenido de sólidos solubles oscile entre 4.31 - 6.38 %.

6.2 Sémolas y granillos

En la tabla 4 se hallan los resultados que corresponden a granillos y sémolas.

En cada grupo (sémolas y granillos) se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las distintas muestras. El origen y diferentes condiciones de procesado y almacenamiento de las muestras pueden ser factores importantes para explicar las diferencias entre cada uno de los lotes.

Tabla 4. Valores de Tp, ΔH, WAI y WSI en lotes de sémolas y granillos de maíz.

Sémola y granillo	Tp (°C)	ΔH (J/g)	(WAI) %	(WSI) %
S1	70.83 (0.52) ^b	8.50(0.25) ^{ec}	1.24 (0.02) ^{ab}	1.97 (0.03) ^c
S2	75.1 (0.00) ^{cd}	6.44 (0.52) ^{ab}	1.25 (0.02) ^{abc}	2.52 (0.06) ^e
S3	75.07 (01.07) ^{cd}	9.22(0.27) ^e	2.15 (0.10) ^e	2.17 (0.15) ^d
S4	73.61 (0.85) ^c	9.58 (0.50) ^e	1.29 (0.04) ^{abc}	2.07 (0.06) ^{cd}
S5	74.29 (0.22) ^{cd}	9.58(0.38) ^e	1.33 (0.01) ^{abcd}	1.49 (0.003) ^a
S6	74.25 (0.37) ^{cd}	7.66 (0.06) ^{bcd}	1.45 (0.02) ^d	2.12 (0.06) ^d
S7	75.03 (0.80) ^{cd}	7.06(0.70) ^{bcd}	1.32 (0.04) ^{abcd}	2.65 (0.09) ^f
S8	76.20 (0.97) ^d	6.02 (0.28) ^a	1.37 (0.08) ^{cd}	2.77 (0.14) ^f
S9	75.42 (0.53) ^{cd}	7.78(0.48) ^{abe}	1.34 (0.04) ^{bcd}	1.41 (0.02) ^a
S10	67.67 (1.20) ^a	8.33 (0.76) ^{bcd}	1.20 (0.02) ^a	1.82 (0.05) ^b
S11	71.02 (0.67) ^b	8.45(0.56) ^{ec}	1.22 (0.01) ^{ab}	2.06 (0.04) ^{cd}
Media (DE), N=33	73.50 (2.57)	8.05 (1.22)	1.38 (0.26)	2.10 (0.43)
G 1	73.39 (0.63) ^{abc}	7.98 (0.31) ^g	2.22 (0.05) ^{fg}	1.58 (0.08) ^a
G 2	74.23 (1.25) ^{abc}	8.60 (0.20) ^g	2.16 (0.04) ^f	2.10 (0.13) ^{bc}
G 3	74.01 (0.65) ^{abc}	7.13 (0.31) ^f	2.27 (0.07) ^g	1.99 (0.11) ^b
G 4	67.83 (0.86) ^a	6.69 (0.36) ^{ef}	1.28 (0.01) ^a	1.69 (0.03) ^a
G 5	68.98 (0.49) ^{ab}	6.29 (0.18) ^e	1.28 (0.005) ^a	1.54 (0.04) ^a
G 6	79.11 (3.86) ^c	2.94 (0.15) ^a	1.98 (0.01) ^{de}	2.25 (0.12) ^{cd}
G 7	75.78 (0.82) ^{bc}	3.19 (0.14) ^{ab}	1.87 (0.02) ^c	2.23 (0.03) ^{cd}
G 8	78.58 (1.19) ^c	4.59 (0.20) ^d	1.71 (0.03) ^b	2.48 (0.02) ^e
G 9	79.30 (1.18) ^c	4.11 (0.11) ^{cd}	1.89 (0.02) ^{cd}	2.55 (0.02) ^{ef}
G 10	76.92 (7.89) ^c	3.66 (0.05) ^{bc}	1.97 (0.02) ^{de}	2.72 (0.03) ^f
G 11	80.64 (1.23) ^c	4.50 (0.22) ^d	2.04 (0.04) ^e	2.51 (0.04) ^{ef}
G 12	76.78 (0.55) ^{bc}	4.26 (0.34) ^{cd}	1.86 (0.004) ^c	2.35 (0.03) ^{de}
Media DE), N=36	75.46 (4.47)	5.33 (1.87)	1.87 (0.31)	2.17 (0.39)

^{a-g}, medias en la misma columna de cada grupo, con diferente letra son significativamente diferentes (P<0.05). Valores promedio de tres repeticiones (desviación estándar).

Narpinder *et al.* (2009) y Dhital *et al.* (2010) analizaron los gránulos de almidón procedentes de maíz sometido a diferentes tiempos de molienda y por tanto con diferentes granulometrías y reportaron que al aumentar el tiempo de molienda, los gránulos pasaban de una superficie lisa y forma poliédrica a una superficie rugosa, llegando a desprenderse fragmentos del gránulo. Estos autores obtuvieron valores de ΔH entre 4.38 y 7.44 J/g. Es evidente que el factor más importante para que los granillos tengan un valor de entalpía menor que las sémolas, es el tiempo de molienda al que fueron sujetos. Para conseguir un tamaño de partícula menor con respecto a las sémolas, los granillos son tratados durante un tiempo más largo o aplicando mayor fuerza de cizalla y por esta razón el almidón se encuentra más dañado, indicando una etapa más avanzada en el proceso de gelatinización.

Una mayor molienda de los granillos, en principio, implicaría que estos tengan mayores defectos y posiblemente el almidón más gelatinizado que en el caso de las sémolas. Este efecto se confirma en los análisis realizados en granillos, pues estos presentan un valor promedio de ΔH de 5.33 ± 1.87 J/g, significativamente menor al obtenido para las sémolas (8.05 ± 1.22 J/g).

Por otro lado, en este tipo de muestras el germen y el pericarpio han sido retirados, por lo que son los componentes del endospermo (principalmente almidón y algunas proteínas solubles en agua), los que afectan en mayor medida a los valores de absorción de agua y sólidos solubles. El valor de WAI en las sémolas (1.38 ± 0.26 %) fue menor al obtenido en granillos (1.87 ± 0.31 %). Esto es de esperarse ya que cuanto más dañado se encuentre el gránulo de almidón, lo que ocurre en los granillos, mayor absorción de agua tendrá. De igual manera al tener una reducción de tamaño mayor en el granillo, quedan expuestas un mayor

número de proteínas (prolaminas y glutelinas) permitiendo tener una mayor entrada de agua en el gránulo.

Respecto al valor de WSI, ambos grupos de muestras presentaron valores similares, en sémolas se encuentra un valor promedio de $2.10 \pm 0.43\%$ mientras que en granillos fue de $2.17 \pm 0.39\%$. Este valor se considera bajo ya que se ha retirado el germen, que es el componente del grano que más aporta a dicho valor.

6.3 Harinas de maíz nixtamalizado

En la tabla 5 se aprecian los resultados obtenidos de WAI, WSI y entalpía de gelatinización en muestras de harina de maíz nixtamalizado.

Tabla 5. Valores de T_p , ΔH , WAI y WSI en lotes de harinas de maíz nixtamalizado.

Harinas de maíz nixtamalizado	T_p (°C)	ΔH (J/g)	(WAI) %	(WSI) %
HR0 1	79.42 (1.29) ^{ab}	3.66(0.22) ^d	2.10(0.02) ^c	3.19 (0.12) ^a
HR0 2	81.42 (1.82) ^{ab}	3.06(0.08) ^c	1.87(0.02) ^{ab}	4.38(0.34) ^b
HR0 3	78.58 (0.36) ^a	2.50(0.27) ^{ab}	1.76(0.02) ^a	6.37 (0.22) ^e
HR0 4	80.04 (1.58) ^{ab}	2.31(0.06) ^{ab}	2.09 (0.06) ^c	4.53 (0.13) ^{bc}
HR0 5	79.34 (0.28) ^a	2.15(0.18) ^a	2.14(0.04) ^c	4.65(0.26) ^{bc}
HR0 6	80.91 (0.24) ^{ab}	2.83(0.19) ^{bc}	1.86 (0.04) ^{ab}	5.44(0.04) ^d
HR0 7	82.34 (0.83) ^b	2.73(0.22) ^{bc}	1.90 (0.07) ^b	6.89 (0.59) ^e
HR0 8	78.98 (0.69) ^a	3.26(0.27) ^{cd}	1.90(0.01) ^b	5.29 (0.06) ^{cd}
Media (DE), N=24	80.13 (1.53)	2.81 (0.50)	1.95(0.14)	5.09(1.14)
HR1 1	80.52 (2.53) ^{ab}	1.98 (0.07) ^{ab}	2.04 (0.03) ^c	4.88(0.32) ^{bc}
HR1 2	79.73 (0.66) ^{ab}	2.34(0.19) ^{bc}	2.00(0.02) ^{bc}	4.35 (0.25) ^{ab}
HR1 3	79.19 (2.42) ^{ab}	1.85 (0.08) ^a	2.04 (0.11) ^c	5.06(0.27) ^c
HR1 4	77.82 (0.92) ^a	2.73(0.17) ^c	1.92(0.01) ^{bc}	4.18 (0.22) ^a
HR1 5	81.06 (0.42) ^{abc}	2.21(0.17) ^{ab}	1.95 (0.04) ^{bc}	4.93 (0.17) ^{bc}

Continuación

HR1 6	80.93 (1.10) ^{abc}	2.37(0.07) ^{bc}	1.96(0.02) ^{bc}	5.16(0.04) ^c
HR1 7	84.76 (0.54) ^c	2.13(0.11) ^{ab}	1.86 (0.02) ^{ab}	5.44 (0.22) ^c
HR1 8	81.97 (0.39) ^{bc}	3.23(0.18) ^d	1.77 (0.07) ^a	5.40(0.20) ^c
Media (DE), N=24	80.75 (2.28)	2.35 (0.44)	1.94 (0.09)	4.92 (0.46)
HTS 1	80.85 (1.60) ^{ab}	4.79 (0.34) ^g	2.12 (0.07) ^{cd}	4.73(0.08) ^b
HTS 2	81.07 (0.78) ^{ab}	4.16 (0.37) ^f	2.08(0.03) ^c	5.17(0.09) ^{cde}
HTS 3	79.98 (3.34) ^a	2.42 (0.16) ^a	1.96 (0.05) ^b	5.04(0.05) ^{cd}
HTS 4	80.35 (0.91) ^a	2.98(0.15) ^c	2.10 (0.01) ^c	5.41 (0.32) ^{ef}
HTS 5	81.22 (0.40) ^{ab}	2.73(0.17) ^{ab}	2.09 (0.04) ^c	5.97 (0.25) ^h
HTS 6	82.61 (0.33) ^{ab}	2.80 (0.19) ^{bc}	2.18 (0.05) ^{de}	5.76(0.24) ^{gh}
HTS 7	82.00 (0.16) ^{ab}	3.04(0.11) ^{cd}	1.96(0.03) ^b	5.97(0.43) ^{gh}
HTS 8	81.94 (0.63) ^{ab}	3.31(0.08) ^{de}	2.09(0.01) ^c	5.59(0.19) ^{fg}
HTS 9	82.13 (0.58) ^{ab}	2.64 (0.17) ^{ab}	2.26 (0.03) ^e	5.54 (0.17) ^{fg}
HTS 10	80.13 (0.64) ^a	3.41(0.15) ^e	2.22(0.04) ^e	4.98(0.16) ^{bc}
HTS 11	81.79 (2.06) ^{ab}	4.34 (0.15) ^f	1.79 (0.11) ^a	2.97 (0.08) ^a
HTS 12	84.75 (1.67) ^b	2.73(0.22) ^{bc}	2.08(0.02) ^c	4.64(0.05) ^b
Media (DE), N=36	81.57 (1.72)	3.28(0.76)	2.08 (0.13)	5.15(0.82)
HTM 1	80.88 (0.42) ^a	2.64(0.18) ^{ab}	1.96(0.04) ^{de}	4.23(0.15) ^a
HTM 2	81.16 (0.44) ^a	2.84(0.26) ^{ab}	1.82(0.08) ^{bc}	5.27 (0.43) ^{bc}
HTM 3	80.88 (1.94) ^a	2.39(0.08) ^a	1.99(0.08) ^e	4.58(0.27) ^{ab}
HTM 4	81.27 (0.50) ^a	2.43(0.21) ^a	1.83(0.04) ^{cd}	5.02(0.20) ^b
HTM 5	81.66 (0.66) ^a	3.40(0.08) ^c	1.68(0.01) ^{ab}	5.97(0.31) ^c
HTM 6	81.93 (0.24) ^a	3.59(0.08) ^c	1.61(0.02) ^a	5.29 (0.24) ^{bc}
HTM 7	82.18 (0.24) ^a	3.12(0.22) ^{bc}	1.66 (0.04) ^a	5.11(0.12) ^b
Media (DE), N=21	81.42 (0.85)	2.92 (0.47)	1.79(0.15)	5.07 (0.55)
HTT 1	81.08 (0.10) ^a	2.58 (0.02) ^a	2.38 (0.03) ^b	4.91(0.27) ^a
HTT 2	80.36 (0.49) ^a	2.70 (0.12) ^a	1.95(0.02) ^a	4.57 (0.19) ^a
HTT 3	82.13 (0.57) ^b	2.64(0.11) ^a	2.01(0.04) ^a	5.90 (0.37) ^b
Media (DE), N=9	81.19 (0.85)	2.64 (0.09)	2.11(0.20)	5.13 (0.65)

^{a-h}, medias en la misma columna con diferente letra son significativamente diferentes (P<0.05), las letras corresponden a cada grupo de harina.

Valores promedio de tres repeticiones (desviación estándar).

La nixtamalización es un tratamiento más agresivo comparado con la molienda en seco, y conlleva cambios más drásticos en la estructura del grano de maíz. Cuanto menor es el valor de la entalpía de una muestra, menor cantidad de almidón queda sin gelatinizar. Valores bajos de entalpía indicarían que el gránulo de almidón está más dañando y ha perdido su estructura original lo que le permite absorber mayor cantidad de agua (mayor WAI). También se favorece la dispersión de la amilosa y la formación de dextrinas que son solubles en agua, aumentando el número de sólidos solubles y por tanto, el valor de WSI.

En los análisis se identificaron valores similares de entalpía en HR0, HR1, HTS, HTM y HTT, de 2.81 ± 0.50 , 2.35 ± 0.44 , 3.28 ± 0.76 , 2.92 ± 0.47 y 2.64 ± 0.09 J/g respectivamente. Sin embargo, dentro de cada grupo se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) para cada parámetro de T_p , ΔH , WAI y WSI.

Quintanar *et al.* (2011) mencionan un rango amplio con respecto a valores de entalpía en harinas de maíz nixtamalizado que van desde 3.2 a 7.3 J/g. Los resultados obtenidos en estos análisis son más bajos. Esto podría relacionarse directamente con el tiempo y la temperatura de nixtamalización o los tiempos de secado para deshidratar la harina, que pudieron haber sido mayores, causando un mayor deterioro en el gránulo de almidón y por tanto, un menor valor de entalpía.

Por otra parte, el pericarpio es la estructura más importante del grano en la nixtamalización, puesto que regula la entrada de calcio y la difusión de agua en las estructuras del interior. Después del tratamiento de nixtamalización se elimina la película delgada de cera, lo que facilita la entrada del agua en el núcleo aumentando así los valores de WAI y WSI. Durante el tratamiento de secado tras la nixtamalización para obtener la harina se rompen aún más las cadenas de almidón, lo que genera cadenas cortas (dextrinas) que retienen un mayor número

de moléculas de agua, dando lugar a masas pegajosas que son difíciles de manejar durante la elaboración de botanas.

Esto se corrobora con los resultados que se obtuvieron en el análisis, en los que, las harinas de maíz nixtamalizado tuvieron valores de WAI entre 1.61 y 2.38% y de WSI entre 2.97 y 6.89%. Los valores obtenidos son comparables con los reportados en harinas de maíz nixtamalizado por Flores *et al.* (2002), que indican valores de WAI entre 2.1 - 3.7% y WSI de 4.38 – 7% mientras que Bressani *et al.* (2001) reporta un valor de WAI mas alto (3.71%) con respecto a los obtenidos en este trabajo y un valor de WSI similar (5.74%).

6.4 Análisis global de resultados obtenidos para todas las muestras

La tabla 6 muestra una comparativa de los resultados obtenidos para los 8 tipos de muestras.

Tabla 6. Valores de T_p , ΔH , WAI y WSI en lotes de granos, sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado.

Lotes	Tipo de muestra	T_p (°C)	ΔH (J/g)	(WAI) %	(WSI) %
5	M1-M5	73.46 (2.90) ^a	8.41 (1.20) ^d	1.10 (0.04) ^a	5.35 (0.81) ^b
11	S1-S11	73.50 (2.57) ^a	8.05 (1.22) ^d	1.38 (0.26) ^b	2.10 (0.43) ^a
12	G1-G12	75.46 (4.47) ^a	5.33 (1.87) ^c	1.87 (0.31) ^c	2.17 (0.39) ^a
8	HR0 1-8	80.13 (1.53) ^b	2.81 (0.50) ^{ab}	1.95 (0.14) ^{cd}	5.09 (1.14) ^b
8	HR1 1-8	80.75 (2.28) ^b	2.35 (0.44) ^a	1.94 (0.09) ^{cd}	4.92 (0.46) ^b
12	HTS 1-12	81.57 (1.72) ^b	3.28 (0.76) ^b	2.08 (0.13) ^d	5.15 (0.82) ^b
7	HTM 1-7	81.42 (0.85) ^b	2.92 (0.47) ^{ab}	1.79 (0.15) ^c	5.07 (0.55) ^b
3	HTT 1-3	81.19 (0.85) ^b	2.64 (0.09) ^{ab}	2.11 (0.20) ^d	5.13 (0.65) ^b

a-d, medias en la misma columna con diferente letra son significativamente diferentes ($P < 0.05$)
Valores promedio de tres repeticiones (desviación estándar).

Se observa que las harinas de maíz nixtamalizado presentan valores de T_p significativamente más altos, con un promedio de $81.03 \pm 1.72^\circ\text{C}$ comparados con los obtenidos en granos enteros, sémolas y granillos (73.46 ± 2.90 , 73.50 ± 2.57 y $75.46 \pm 4.47^\circ\text{C}$ respectivamente). Esto se debe a una resistencia térmica causada por componentes que se encuentran disueltos (amilosa principalmente) lo que permite una capacidad de hinchamiento mayor y que se genere un tiempo de transición más largo y temperaturas pico más altas (Schirmer *et al.*, 2013).

Otro factor que podría haber influido en los resultados obtenidos es por tratamientos previos que hayan sufrido los granos. De acuerdo a Malumba *et al.*

(2010) la temperatura alta de secado en el grano entero, previo a la molienda en húmedo, afecta directamente a la temperatura pico de gelatinización y de forma inversa a la entalpía. Temperaturas altas de secado tienen un efecto negativo en la separación de la estructura de almidón y las proteínas del endospermo (zeínas y glutelinas) durante la molienda en húmedo. Aquellas proteínas que no se separan del almidón limitan la entrada de agua y la reducción de las interacciones entre el agua y los componentes del almidón y generan una resistencia térmica que desplaza la temperatura pico.

En cuanto a la entalpía, las muestras de granos enteros y sémolas no presentan diferencias significativas, esto se debe principalmente a que la reducción de tamaño en las sémolas fue mínima, por lo que presentan características similares en cuanto al grado de gelatinización comparado con los granos, 8.41 ± 1.20 y 8.05 ± 1.22 J/g respectivamente. En el caso de granillos, si se observaron diferencias significativas en la entalpía con respecto a los valores presentados por los granos enteros y sémolas ya que la reducción de tamaño fue mayor y la degradación de la estructura del almidón por tanto fue mayor, presentando un valor de entalpía promedio de 5.33 ± 1.87 J/g.

Finalmente, las harinas de maíz nixtamalizado tienen valores de entalpía significativamente más bajos, comparados con los anteriores, presentando valores promedio entre 2.35 y 3.28 J/g. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Malumba *et al.* (2010) quienes encontraron que el bajo contenido de humedad es un factor limitante en la gelatinización del almidón; este hecho puede explicar los valores elevados de entalpía en granos, sémolas y granillos a diferencia de aquellas muestras que además de suministrarle un aumento en la temperatura por la molienda, tuvieron un tratamiento en húmedo.

Así, aquellas muestras que fueron sometidas a un proceso de nixtamalización presentaron valores de entalpía bajos. Quintanar *et al.* (2009) y Contreras *et al.* (2014) explican que esta mayor gelatinización en las harinas es por la difusión de agua presente en el grano de maíz. Ya que al inicio de la nixtamalización el espesor del pericarpio impide sustancialmente la entrada de agua, pero durante el proceso de calentamiento la solución alcalina solubiliza el pericarpio, se produce un ablandamiento y permite así la difusión de los iones calcio hasta conseguir un equilibrio en los gránulos, así se hinchan más fácilmente, pierden su estructura cristalina, y es más sencillo que se lleve a cabo la gelatinización.

En cuanto al valor de absorción de agua, los granos, sémolas y granillos presentaron diferencias significativas (1.10 ± 0.04 , 1.38 ± 0.26 y 1.87 ± 0.31 % respectivamente). Estos resultados concuerdan con lo esperado, ya que se considera que cuanto más agresivo es el tratamiento (en este caso granillo > sémola > grano) y menor el tamaño de partícula (granillo < sémola < grano) mayor es el daño en el almidón, y por tanto, la absorción de agua se incrementará.

Las harinas de maíz nixtamalizado mostraron diferencias significativas con los granos enteros y sémolas, con valores de WAI que van desde 1.79 ± 0.15 hasta 2.11 ± 0.20 %. Estos valores son superiores a los de granos y sémolas. Lo anterior se puede atribuir que en las harinas de maíz nixtamalizado, los iones calcio interactúan con parte de la matriz proteica, liberando el almidón, lo que contribuye a una mayor absorción de agua. Además, con la difusión de agua y calcio, en el interior del gránulo se genera un incremento en las propiedades de viscosidad con respecto a los granos enteros y sémolas.

De acuerdo al tamaño de partícula, se esperaría que en el caso de las harinas de maíz nixtamalizado los valores de WAI fueran mucho mayores que para el granillo. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos no se encontró diferencia significativa entre el WAI de harinas HR0, HR1, HTM y granillos. En las harinas de maíz nixtamalizado el WAI se relaciona más con la temperatura y tiempo de nixtamalización del maíz que con el tamaño de partícula. Cornejo *et al.* (2013) y Hasjim *et al.* (2013) indican que el tamaño de partícula no influye totalmente en el WAI en muestras sometidas a un tratamiento en húmedo, ya que en sus estudios comprobaron que la absorción de agua está más ligada con la degradación de la estructura cristalina del almidón. Según dichos autores, en la nixtamalización, al penetrar más fácilmente el agua por la degradación del pericarpio, se pueden encontrar partículas de tamaño pequeño con un menor grado de daño en el almidón y por tanto, menor capacidad de absorber agua, propiciando que los valores de WAI no sean tan altos como cabría esperarse debido al tamaño de partícula.

De igual forma se esperaría que los granillos tuvieran una absorción de agua menor con respecto a las harinas de maíz nixtamalizado, sin embargo, al ser comparados con tres grupos de harina HR0, HR1 y HTM presentan valores similares (1.87 ± 0.31 % para granillos y 1.79 ± 0.15 , 1.94 ± 0.09 y 1.95 ± 0.14 % para las harinas), mientras que al comparar los granillos con HTS y HTT si existen diferencias significativas 2.08 ± 0.13 y 2.11 ± 0.20 %.

En las diferencias significativas observadas para los grupos de harinas HTT y HTS, se puede atribuir a la adición de algún ingrediente, ya que para contrarrestar los compuestos perdidos en el agua de remojo del nixtamal, se

añaden algunos fragmentos de salvado para que adquirieran una textura gruesa, ideal en algunas botanas nixtamalizadas y puede contribuir en el aumento del valor de WAI.

Finalmente, en el índice de sólidos solubles resaltan dos grupos homogéneos. Por un lado se encuentran sémolas y granillos (2.10 ± 0.43 y 2.17 ± 0.39 % respectivamente) y en otro grupo harinas de maíz nixtamalizado y granos enteros de maíz (valores entre 4.92 - 5.15 % y $5.35 \pm 0.81\%$). Los valores de WSI en granos (valores altos) se ven afectados directamente por los componentes del germen, que no ha sido retirado y por tanto incrementa la proporción de sustancias solubles (principalmente albúminas).

Las muestras de harinas de maíz nixtamalizado conservan el germen contribuyendo a que los valores de WSI sean más altos. Además las harinas de maíz nixtamalizado han sufrido una etapa de secado para su posible almacenamiento e hidratación posterior, generando una mayor degradación en la estructura del almidón y favoreciendo la formación de dextrinas que son solubles en agua y aumentando todavía más dicho valor.

En la figura 11, se presentan los resultados de entalpía y WAI. Se puede observar la tendencia que tienen las muestras. Por un lado, los granos enteros tienen absorción de agua baja y entalpía alta, las harinas de maíz nixtamalizado tienen absorción de agua elevada y una entalpía baja. En el caso de los granillos y sémolas presentaron valores intermedios. Sin embargo, hubo tres granillos y una sémola (S3, G1 – G3) que mostraron un comportamiento atípico, por lo que se eliminaron de análisis posteriores.

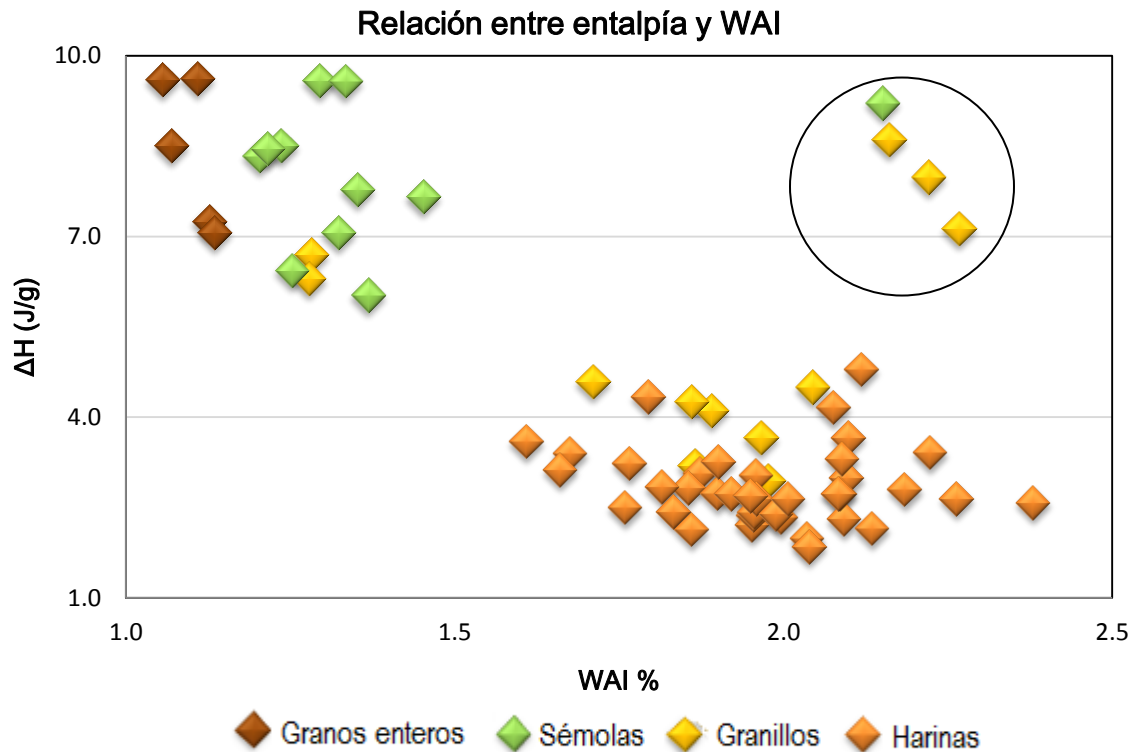


Figura 11. Relación entre entalpía de gelatinización y absorción de agua en muestras de granos enteros, sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado.

En la figura 12 se observa la relación entre WSI y la entalpía. Las muestras de harinas presentaron valores de entalpía bajo y valores de sólidos solubles altos. Las muestras con un valor de entalpía intermedio (granillos y sémolas) tienen un menor contenido de sólidos. Cabe resaltar que estas muestras no poseen germen, razón por la que su contenido de sólidos es más bajo. Los granos presentaron valores altos de entalpía y de acuerdo a lo observado previamente también presentaron valores altos de WSI por la presencia del germen (abundante contenido de proteínas solubles) y pericarpio (fibra soluble).

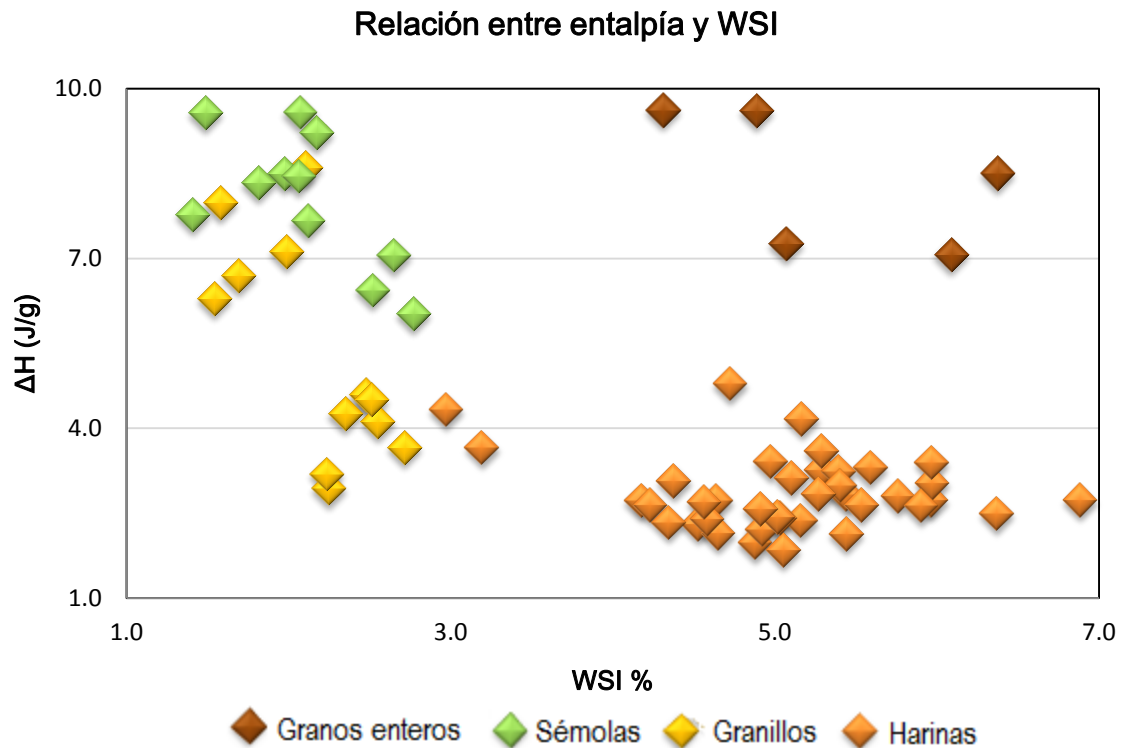


Figura 12. Relación entre entalpía de gelatinización y sólidos solubles en agua en muestras de granos enteros, sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado.

6.5 Correlación entre entalpía, WAI, WSI y predicción de la entalpía a partir de WAI y WSI

La determinación de la cantidad de almidón no gelatinizado en una muestra es de mucho interés para la elaboración de productos en la industria botanera. Sin embargo, no es fácil para las empresas disponer de un equipo de calorimetría diferencial de barrido, y contar con una persona que tenga la habilidad para manejarlo. Así pues la posibilidad de utilizar medidas más sencillas como WAI y WSI que se basan en pruebas gravimétricas permitiría a la industria botanera y proveedores de harinas poder verificar la calidad de las materias primas en cuanto a sus propiedades térmicas. Dada la alta relación observada en las (Figura 11 y

12), parece factible desarrollar un modelo matemático que permita estimar la entalpía a partir de valores de WAI y WSI.

Para la realización de la ecuación de predicción, se estudió previamente la correlación entre las variables ΔH , WAI y WSI. Se concluyó que los granos enteros no se ajustan a la tendencia ya que a pesar de tener un valor de entalpía alto, presentan valores de WSI altos. Esto se explica por la presencia del germen, que al tener albúminas (solubles en agua) afecta directamente al valor de WSI incrementándolo. De la misma manera, 3 lotes de granillos y 3 lotes de sémola fueron elaboradas a partir de mezclas y presentan diferencias en cuanto al comportamiento observado en el resto de los lotes, por lo que, al igual que los granos enteros son eliminados de la correlación de las variables. La tabla 7 muestra los coeficientes de correlación observados entre WAI, WSI y ΔH (54 datos) después de eliminar las muestras de granos (M1-M5) y las muestras de sémolas y granillos (S3-S5, G1-G3) que no se ajustaban a la tendencia.

Tabla 7. Coeficientes de correlación entre ΔH , WAI y WSI.

	ΔH	WAI	WSI
ΔH	1		
WAI	-0.8473	1	
WSI	-0.7628	0.6162	1
Correlación significativa (P<0.001) 54 datos analizados			

Se observa que el parámetro de WAI presentó una correlación más alta con la entalpía, con un coeficiente de correlación $r=0.8473$ ($P<0.001$) y la correlación entre entalpía y WSI fue $r=0.7628$. En la figura 13 se presenta el valor de entalpía frente a las variables independientes WAI y WSI.

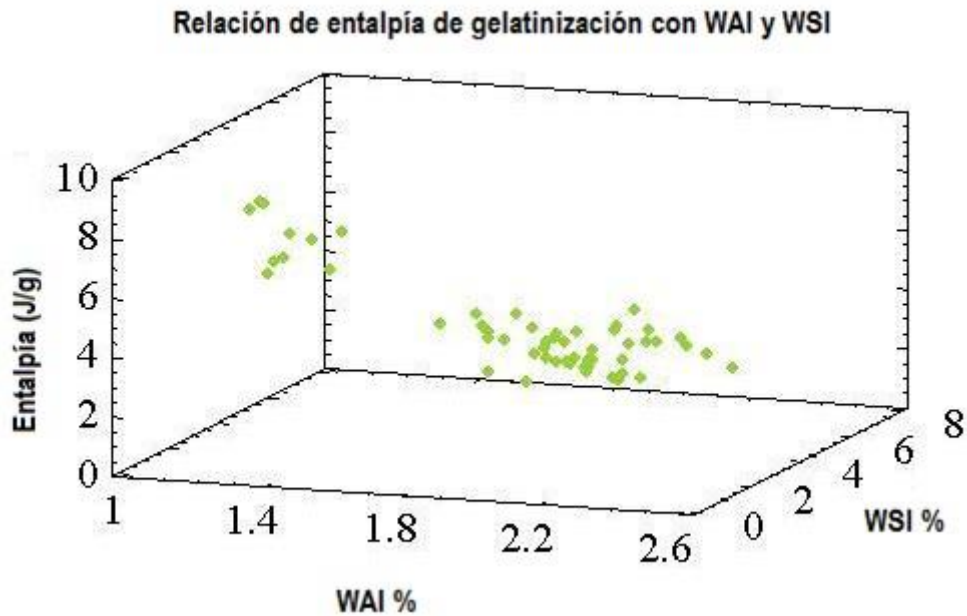


Figura 13. Relación entre la entalpía de gelatinización, índices de absorción de agua e índices de sólidos solubles en agua.

El análisis de regresión lineal múltiple se realizó según el siguiente modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Dónde:

Y= entalpía

β_0 =constante (J/g)

β_1, β_2 = coeficientes de regresión parciales (J/g)

X_1, X_2 = variables independientes que se incluyen en la regresión (WAI y WSI)

ε = error del modelo $\sim N(0, \sigma^2)$

La tabla 8 muestra de acuerdo al análisis de regresión lineal, los parámetros de ΔH , WAI y WSI, así como el valor de R^2 . El modelo cuenta con un nivel de significancia de ($P < 0.01$) y para que el modelo fuera totalmente consistente se asignaron las unidades (J/g) a los coeficientes del modelo.

Tabla 8. Parámetros de la regresión lineal múltiple de predicción para la entalpía a partir del WAI y WSI.

Entalpía	β_0 (J/g)	β_1 (J/g)	β_2 (J/g)	R^2	Sig.	DER	Error Absoluto
Y	12.7034	-3.76707	-0.47796	0.8040	***	0.8201	0.6917

Significación del modelo. *** ($P < 0.01$). DER: desviación estándar residual

Dando como resultado la siguiente ecuación:

$$Y = 12.7034 - 3.7670WAI - 0.4779WSI$$

Esta ecuación explica un 80.40 % de la variación de la entalpía con un error estándar de 0.8201, considerándolo un elevado valor predictivo.

Cuando las variables independientes son iguales a cero, el valor de entalpía está dado por la constante, la cual es de 12.7034, este valor es lógico ya que al no existir un porcentaje de absorción de agua y sólidos solubles se asocia a un gránulo de almidón intacto, donde los valores de entalpía oscilan entre 12.1 y 13.7 J/g (Singh *et al.*, 2003).

El coeficiente de la variable WAI se relaciona con el grado de daño presente en el almidón. A mayor daño del grano, el almidón (por tipo de molienda) y temperatura (alta) absorbe mayor cantidad de agua y tendrá menor entalpía de gelatinización pues parte del almidón ya ha sido gelatinizado.

El coeficiente de WSI se relaciona con el tiempo de secado y el tamaño de partícula. Así, cuanto mayor es el tiempo de secado de la harina y menor es el

tamaño de partícula en productos de molienda seca, mayor es la cantidad de dextrinas que se generan (valores más altos de WSI) y menor entalpía.

Por último, para validar el modelo de regresión lineal múltiple se analizaron 4 lotes de muestras de granillos, y a partir de mediciones de WAI y WSI se obtuvo el valor de entalpía de predicción así como los límites correspondientes a cada lote.

Tabla 9. Valores de entalpía de predicción obtenidos por el modelo y por el calorímetro diferencial de barrido

Muestra	WAI %	WSI %	Entalpía (predicción) J/g	LI predicción	LS predicción	LI Media	LS Media	Entalpía DSC J/g
1	1.8444	2.8014	4.4164	2.7332	6.0996	4.0669	4.7659	4.75
2	1.7312	2.7831	4.8516	3.1755	6.5277	4.5380	5.1652	4.61
3	1.7695	2.6388	4.7763	3.0944	6.4581	4.4332	5.1193	4.83
4	1.6620	2.6344	5.1833	3.5055	6.8612	4.8603	5.5064	5.50

LI= LÍMITE INFERIOR, LS= LÍMITE SUPERIOR

También se obtuvieron medidas de entalpía en el calorímetro diferencial de barrido, al comparar los resultados, se observó que los valores eran similares y que estos se encontraban dentro de los intervalos de confianza del 95%, lo que indica que el valor de la entalpía predicha, caerá en este intervalo, con una probabilidad de 0.95 (Tabla 9).



Conclusiones

*“Tal vez sea la propia simplicidad del asunto lo que nos
conduce al error”*

Edgar Allan Poe

7. CONCLUSIONES

- ❖ Los granos enteros presentaron valores de entalpía más altos en comparación con sémolas y granillos.
- ❖ El contenido de sustancias solubles y absorción de agua fue mayor en harinas de maíz nixtamalizado (molienda húmeda) que en las sémolas, granillos y granos enteros que tuvieron una molienda en seco.
- ❖ El tamaño de partícula afectó directamente a los valores de entalpía de gelatinización en muestras de molienda seca mientras que no fue determinante en la entalpía en muestras sometidas a molienda en húmedo.
- ❖ Existe una correlación entre la entalpía de gelatinización, índices de absorción de agua e índices de sólidos solubles en agua en las muestras analizadas, que permitió proponer un modelo de predicción de la entalpía de gelatinización, en especial para muestras de sémolas y granillos.
- ❖ El modelo fue validado satisfactoriamente con muestras reales de la empresa botanera.



Referencias

“Libros, caminos y días dan al hombre sabiduría”

Proverbio árabe

8. REFERENCIAS

- Acosta, R. (2009). El cultivo del maíz, su origen y clasificación. El maíz en Cuba. *Cultivos tropicales* 30(2), 113-120.
- Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., & Griffin, E. L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, 14, 4-12.
- AOAC. (1995). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists International* (16Th ed., Vol. II). (P. Cunniff, ed)
- Bello, L. A., Osorio, D. P., Agama, A. E., Núñez, S. C., y Paredes, L. O. (2002). Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado. *Agrociencia*, 36, 319-328.
- Bressani, R., Turcios, J.C., Reyes, L., y Mérida, R. (2001). Caracterización física y química de harinas industriales nixtamalizadas de maíz de consumo humano en América Central. *ALAN*, 51(3).
- Chen, P., Yu, L., Simon, G. P., Liu, X., Dean, K., & Chen, L. (2011). Internal structures and phase-transitions of starch granules during gelatinization. *Carbohydrate Polymers*, 83, 1975-1983.
- Contreras B. I. (2009) *Caracterización de haría de maíz instantánea obtenida por calentamiento óhmico* (Tesis para obtener el grado de Maestro en Tecnología Avanzada). Instituto Politécnico Nacional. México.
- Contreras, J. B., Gaytán, M. M., Figueroa, C. J., Avalos, Z. R., & Morales, S. E. (2014). Effect of steeping time and calcium hydroxide concentration on the water absorption and pasting profile of corn grits. *Journal of Food Engineering*, 122, 72-77.
- Cornejo, V. M., Gutiérrez, C. E., Rojas, M. I., Del Real, L. A., Zambrano, Z. M., Martínez, V. V., & Rodríguez, G. M. (2013). Physicochemical, morphological, and pasting properties of nixtamalized flours from quality protein maize and its particle distribution. *LWT-Food Science and Technology*, 53, 81-87.

- De la Rosa Millán J. (2009) Análisis fisicoquímico, estructural y molecular de almidones de diferentes variedades de maíz azul (Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos). Instituto Politécnico Nacional. México
- FAO_a. (2014, Febrero). *Composición química y valor nutritivo del maíz*. Recuperado de [http://www.fao.org/docrep/t0395s/T0395S03.htm#Capitulo 2 Composición química y valor nutritivo del maíz](http://www.fao.org/docrep/t0395s/T0395S03.htm#Capitulo%20Composici%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20y%20valor%20nutritivo%20del%20ma%C3%ADz)
- FAO_b. (2014, Febrero). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Recuperado de <http://faostat3.fao.org/faostatgateway/go/to/download/Q/QC/S>
- Fennema., O. R. (2000). *Química de los alimentos* (2da ed.). España: Acribia.
- Fernández, M. L., Acosta, A. A., Zelaya & Rodríguez, M. E. (2011). Effect of calcium content in the corn flour on RVA profiles. *Journal of Food Engineering*, 102, 100-103.
- Flores, F. R., Martínez, B. F., Salinas, M. Y., Chang, Y. K., Hernández, J. S., & Ríos, E. (2000). Physicochemical and rheological characteristics of commercial nixtamalised Mexican corn flours for tortillas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 657-664.
- Gutiérrez, E. Rojas, M. L., Arjona, J. L., Cornejo, M. A., Zepeda, Y., Velázquez, R., Ibarra, A. & Rodríguez, M. E. (2010). Microstructural changes in the maize kernel pericarp during cooking stage in nixtamalization process. *Journal of Cereal Science*, 51, 81-88.
- Hasjim, J., Li, E., & Dhital, S. (2013). Milling of rice grains: Effects of starch/flour structures on gelatinization and pasting properties. *Carbohydrate Polymers*, 92, 682-690.
- Herrero, J. M., Shchoenmakers, P. J., & Kok, W. T. (2004). *Journal of Chromatography*, 1053, 7-234.

- Kato, T., Mapes, C., Mera, L., Serratos, J. y Bye, R. (2009). *Origen y diversificación del maíz, una revisión analítica*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Kawaljit, S. S., Singh, N., & Kaur, M. (2004). Characteristics of the different corn types and their grain fractions: physicochemical, thermal, morphological, and rheological properties of starches. *Journal of Food Engineering*, 64, 119-127.
- Kawaljit, S. S., Singh, N., & Singh, M. N. (2007). Some properties of corn grains and their flours I: Physicochemical, functional and chapati-making properties of flours. *Food Chemistry*, 101, 938-946.
- Knorr, D., Heinz, V., & Buckow, R. (2006). Proteins and Proteomics. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*, 1764, 619-631.
- Kuakpetoon, D., & Wang, Y.J. (2007). Internal structure and physicochemical properties of corn starches as revealed by chemical surface gelatinization. *Carbohydrate Research*, 342, 2253-2263.
- Landry, J., & Moureaux, T. (1970). Hétérogénéité des glutelinas du grain de maïs: Extraction sélective et composition en acides aminés des trois fractions solées. *Bulletin de la Société de Chimie Biologique*, 52, 1021-1037.
- Malumba, P., Janas, S., Roiseux, O., Sinnaeve, G., Masimango, T., Sindic, M., Deroanne, C., & Béra, F. (2010). Comparative study of the effect of drying temperatures and heat-moisture treatment on the physicochemical and functional properties of corn starch. *Carbohydrate Polymers*, 79, 633-641.
- Méndez, G., García, F. J., Paredes, L. O., & Bello, P. L. A. (2008). Effect of nixtamalization on morphological and rheological characteristics of maize starch. *Journal of Cereal Science*, 48, 420-425.
- Milán, J., Gutiérrez, L., Cuevas, E., Garzo, J., & Reyes, C. (2004). Nixtamalized Flour from quality protein maize (*Zea mays* L). Optimization of alkaline processing. *Plant Foods for Human Nutrition*, 59, 35-44.

- Miller, J. N., & Miller, J. C. (2002). *Estadística y quimiometría para química analítica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Mondragón Chaparro M. (2004) Estudio comparativo de cambios estructurales y funcionales en almidones de maíz nixtamalizado (Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Tecnologías Avanzadas). Instituto Politécnico Nacional. México.
- Mondragón, M., Bello, L. A., Agama, E., Melo, A., Betancurt, D., & Peña, J. L. (2004). Effect of nixtamalization on the modification of the crystalline structure of maize starch. *Carbohydrate Polymers*, 55, 411-418.
- Narpinder, S., Richa, B., Rhythm, G., Mukti, G., & Jaghmohan, S. (2009). Physico-chemical, thermal and pasting properties of fractions obtained during three successive reduction milling of different corn types. *Food Chemistry*, 113, 71-77.
- Navarrete, N., Grau, A., Chiralt, A. y Fito, P. (1998). *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- News Oaxaca. (2014). *Aprovechan rasgos genéticos del maíz nacional*. Recuperado de <http://newsoaxaca.com/index.php/actualidad/16740-aprovechan-rasgos-geneticos-del-maiz-nacional>
- Ortega, E. I., Villegas, E., & Vasal, S. K. (1986). A comparative study of protein changes in normal and quality protein maize during tortilla making. *Cereal Chemistry*, 63(5), 446-451.
- Osorio, D. P., Agama, A. E., Bello, P. L., Islas, H. J., Gómez, M. N., & Paredes, L. O. (2011). Effect of endosperm type on texture and in vitro starch digestibility of maize tortillas. *LWT-Food Science and Technology*, 44, 611-615.
- Palacios, A. J., Vázquez, C., & Rodríguez, M. E. (2009). Physicochemical characterizing of industrial and traditional nixtamalized corn flours. *Journal of Food Engineering*, 93, 45-51.

- Pappa, R. M., & Palacios, P. (2010). Effect of Lime and Wood Ash on the Nixtamalization of Maize and Tortilla Chemical and Nutritional Characteristics. *Plants Foods Hum Nutr*, 65, 130-135. doi:10.1007/s11130-010-0162-8
- Pineda, G. P., Rosales, R. A., Rodríguez, G. M. E. (2012). Modeling calcium and water intake in threshed corn grain during thermo-alkaline. *Journal of Food Engineering*, 113(3), 434-441.
- Quia, W., Liua, H., Liua P., Dong, S., & Zhao, B. (2012). Morphological and physiological characteristics of corn (*Zea mays* L.) Roots from cultivars with different yield potentials. *European Journal of Agronomy*, 38, 54-63.
- Qiang Fu, Z., Wang, L., Li, D., & Adhikari, B. (2012). Effects of partial gelatinization on structure and thermal properties of corn starch after spray drying. *Carbohydrate Polymers*, 88, 1319-1325.
- Qiang Fu, Z., Wang, L., Zou, H., Li, D., & Adhikari, B. (2014). Studies on the starch–water interactions between partiallygelatinized corn starch and water during gelatinization. *Carbohydrate Polymers*, 101, 727-732.
- Quintanar, A., Jaramillo, M. E., Mora, R., Chel, L., & Solorza, J. (2009). Changes on the structure, consistency, physicochemical and viscoelastic. *Carbohydrate polymers*, 78, 908-916.
- Quintanar, G. A., Jaramillo, M. E., Solorza, J., Méndez, M. G. & Wang, Y. J. (2010). Effects of polymerization changes in maize proteins during nixtamalization on the thermal and viscoelastic properties of masa in model systems. *Journal of Cereal Science*, 52, 152-160.
- Quintanar, G. A., Jaramillo, M. E., Solorza, J., Méndez, M.G. & Wang, Y. J. (2011). Rheological and thermal properties of masa as related to changes in corn protein during nixtamalization. *Journal of Cereal Science*, 53, 139-147.
- Ram, R. V., Seshu, G., Jabeen, F., & Seshagiri, R. (2012). Speciality corn types with reference to quality protein Maize (*Zea mays* L.)-A review. *Journal of Agriculture, Enviroment and Biotechnology*, 5(4), 393-400.

- Rojas, M. I., Gutiérrez, E., Cortés, A. M. E., Falcón, A., Bressani, R., Rojas, A., Ibarra, C., Pons, H. J. L., Guzmán, M. S. H., Cornejo, V. A., & Rodríguez, M. E. (2008). Analysis of quality protein changes in nixtamalized QPM flours as a function of the steeping time. *Cereal Chemistry*, 85(3), 409-416.
- Santos, M.D., & Gomes, M.T.S.R. (2014). Starch viscoelastic properties studied with an acoustic wave sensor. *Carbohydrate Polymers*, 99, 68-73.
- Sefa, D. S., Cornelius, B., Sakyi, D. E., & Ohene, A. E. (2004). Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. *Food Chemistry*, 86, 317-324.
- Serna., S. R. (2009). *Química almacenamiento e industrialización de los cereales* (2da ed.). México: A.G.T.
- Schirmer, M., Höchstötter, A., Jekle, M., Arendt, E., & Becker, T. (2013). Physicochemical and morphological characterization of different starches with variable amylose/amylopectin ratio. *Food Hydrocolloids*, 32, 52-63.
- SIAP. (2013). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pecuaria. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA, Biblioteca Digital, Producción Anual. Dirección*. Recuperado de <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/oaxaca/Documents/2013/Autoconsumo%202013/Convocatoria%20PRODUCTORES%20AAAPP3HA13.pdf>
- Sikora, M., Kowalski, S., Krystyjan, M., Ziobro, R., Wrona, P., Curic, D., & LeBail, A. (2010). Starch gelatinization as measured by rheological properties of the dough. *Journal of Food Engineering*, 96, 505-509.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Singh, S. N., & Singh, B. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81, 219-231.
- Singh, N., Bedi, R., Garg, R., Garg, M., & Singh, J. (2009). Physico-chemical, thermal and pasting properties of fractions obtained during three successive reduction milling of different corn types. *Food Chemistry*, 113, 71-77.

- Tovar Benítez T. (2008) Caracterización morfológica y térmica de almidón de maíz (*Zea mays* L) obtenido por diferentes métodos de aislamiento (Tesis para obtener el grado de Licenciado en Química en Alimentos). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México
- Ustarroz, F., Saavedra, A., Erraquin, L., Bragachini, M., Casini, C., y Méndez, J. (2010). Maíz cadena de valor agregado, alternativas de transformación e industrialización. *PRECOP II INTA Hacia la industrialización del campo*, 54, 1-36.
- Usos de la calorimetría diferencial de barrido en el análisis de alimentos. (2012). In Rouzaud, O., G. A. González., R.M. Robles., P. Plascencia, M. Onofre., & A. Burgos (Eds.), *Nuevas tendencias en ciencia y tecnología de alimentos tópicos selectos* (pp. 237-264). México: Trillas
- Vivas, N. E., Waniska, R. D., & Rooney, L. W. (1987). Effect of tortilla production on protein in sorghum and maize. *Cereal Chemistry*, 64, 384.
- Voet, V. (2004). *Bioquímica* (3ra ed.). México: Médica Panamericana.