



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

REOLOGÍA Y TEXTURA DE MATERIALES
BIOLÓGICOS.

PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS Y
TEXTURALES DE ASES COMERCIALES.
ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA
Y PRUEBA DE RELAJACIÓN.

TRABAJO DE SEMINARIO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A :
ZAIRA BERENICE GUADARRAMA ÁLVAREZ

ASESORA:
M. EN C. MARÍA EUGENIA RAMÍREZ ORTÍZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉX.

2003



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES



U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN



Departamento de
Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Reología y textura de materiales biológicos.

Propiedades viscoelásticas y texturales de ates comerciales.

Análisis de perfil de textura y prueba de relajación.

que presenta la pasante: Zaira Berenice Guadarrama Alvarez

con número de cuenta: 9311299-6 para obtener el título de :

Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de octubre de 2003

MODULO	PROFESOR	FIRMA
<u>1</u>	<u>I.B.O. Norma Beatriz Casas Alencáster</u>	
<u>2</u>	<u>Dr. Alberto Tecante Coronel</u>	
<u>3</u>	<u>M.en C. María Eugenia Ramírez Ortiz</u>	

Con todo mi amor y respeto dedico este trabajo a mis padres

A Dios, que me permite la vida

A mi mamá Yolanda, que con su propio desempeño como mujer y madre me inculcó la dedicación y la constancia, pero que sobre todo es mi mejor amiga.

A mi papá Genaro, que me ha enseñado a ver el mundo de forma real, sin olvidar lo hermoso que es vivir.

A mis amigos Claudia, Marissa, Iván y Ulises; que a lo largo de todo este tiempo me han ofrecido algo mejor que su amistad, su hermandad!

A todos mis maestros, que por vocación comparten el tesoro de sus conocimientos.

A todas aquellas personas con las que compartí momentos de gozo

Gracias!

No necesito más que un alto sueño, y un incesante fracaso, porque convertir un sueño en realidad requiere de grandes esfuerzos.

Jaime Sabines

RESUMEN

Se obtuvo el comportamiento reológico y textural de ate de sabor guayaba y membrillo a través de pruebas de relajación (R) y perfil de textura (PT), a diferentes porcentajes de deformación y compresión 10, 15 y 20%; la prueba de textura se realizó por quintuplicado, mientras que la de relajación fue por triplicado, a una temperatura ambiente de 24 a 26 °C. Ambas pruebas se realizaron en el texturómetro Lloyd modelo TA500, con celda de carga de 1 kg y como dispositivo una placa de aluminio de 4 cm de diámetro.

En la prueba Perfil de Textura el ate presentó comportamiento viscoelástico con un componente viscoso mayor que el elástico (descrito por la diferencia de la elasticidad recuperable retardada E_{RR} > elasticidad recuperable instantánea E_{RI}), fue dependiente de la deformación impuesta y mostró características elásticas, cohesivas y adhesivas.

En la prueba de Relajación el ate se comportó como viscoelástico, donde las características elásticas fueron las predominantes (el modulo "E" y constante de deformación "a"), no se trabajó en la zona de viscoelasticidad lineal, debido a la dependencia del material a la deformación impuesta y al tiempo de prueba; en los parámetros directos se observó el mismo comportamiento.

Finalmente se compararon las pruebas mediante una serie de gráficos y por medio de una regresión se observó que en algunos casos presentaban tendencias similares.

INTRODUCCIÓN

Por casi más de un siglo, se ha descrito al ate o jalea como un producto de confitería, bellamente coloreado, transparente, con textura suave, pero a la vez de fácil corte y tan firme que sus ángulos conservan su estructura inicial (Arthey y Ashurt.,1997). Estas propiedades físicas son las características de sistemas tipo gel, que molecularmente es una red tridimensional formada por dos componentes: los biopolímeros hidrófilos (en el ate, ácidos pécticos) y un disolvente (agua). Otra característica es el grado de hidratación de las moléculas, el cual se reduce mediante la adición de azúcar (Cheftel,1992).

Los ácidos pécticos, se encuentran en las paredes celulares de los tejidos de las frutas cítricas; químicamente, son polímeros lineales de ácido galacturónico que tiene grupos carboxílicos esterificados por radicales metílicos, éstos indican el grado de metilación de la pectina (Badui,1990). En el ate se utiliza pectina de alto metoxilo (HM, más de 50 % de radicales en su estructura), que produce geles más rígidos y sólidos en condiciones de pH = 2.8 a 3.4 (Southgate, 1992).

Una forma de caracterizar a los alimentos en la industria, es mediante su textura y su comportamiento reológico. Una definición de textura de alimentos es: "la forma en la cual están arreglados los componentes estructurales de un alimento en una estructura macroscópica y microscópica y la manifestación externa de esta estructura" (DeMan, 1976).

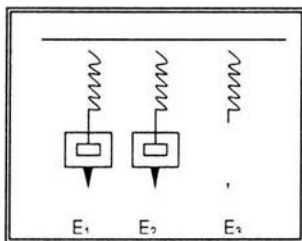
La forma más completa de caracterizar texturalmente un material es mediante la prueba de perfil de textura PT (Szczesniak y col.,1963) y la obtención de los parámetros a través del análisis de perfil de textura (APT). Los parámetros principales son: dureza, fractura, cohesividad, adhesividad, elasticidad, masticabilidad y gomosidad (Szczesniak,1963), hay otros sugeridos como: elasticidad recuperable instantánea (E_{RI}), elasticidad recuperable retardada (E_{RR}) y módulo de compresibilidad (Nussinovitch y col 1998). En estudios recientes Tang y col (1995),encontraron que en los geles, al mantener porcentajes de compresión menores al 20% en pruebas de PT, se obtiene un parámetro relacionado con la elasticidad del gel: el módulo elástico aparente (MEA, definido como la pendiente del segundo ciclo de compresión).

Por su parte, la Reología es una ciencia que se basa en principios físicos de flujo y deformación de la materia (Rao 1999), clasifica a los materiales en: sólidos elásticos (materiales que siguen la Ley de Hooke), fluidos viscosos (materiales que siguen la Ley de Newton) y viscoelásticos (materiales que presentan comportamiento parcialmente elástico y viscoso), debido a la respuesta observada durante la aplicación de un esfuerzo (σ), y el registro de la deformación (γ), o viceversa.

Para determinar el comportamiento reológico de los materiales viscoelásticos es necesario utilizar pruebas específicas, que se dividen en dos: estáticas y dinámicas. Dentro de los métodos estáticos está la prueba de relajación, la cual consiste en someter al material a una deformación constante registrando la fuerza necesaria para mantener la deformación, durante un lapso de tiempo. A través del gráfico de σ vs t (Peleg, 1979), se pueden obtener dos tipos de parámetros: los

directos, que se obtienen directamente del equipo, y los que se calculan con modelos matemáticos. Los parámetros directos que se pueden calcular son: fuerza inicial (F_i), que muestra la fuerza máxima obtenida al tiempo "cero" de aplicación de la deformación; fuerza asintótica (F_A), que es la fuerza de oposición del material cuando la fuerza se vuelve constante; tiempo de relajación (t_R), tiempo en donde se llega al 37% de fuerza máxima, tiempo de fuerza asintótica (t_{FA}), que es el tiempo al cual la fuerza se vuelve asintótica o constante en la prueba; y por último, el área total (AT), que es el área bajo la curva obtenida durante la prueba de relajación.

Las curvas de relajación pueden ajustarse al modelo matemático de Maxwell Generalizado (con tres elementos ,ecuación 1). Donde: $E_{(t)}$ es el módulo de Young; E_1, E_2, E_3 , son los módulos elásticos de los resortes en paralelo en [Pa], mientras que t_1 y t_2 [s] son los tiempos de relajación.



$$E_{(t)} = E_1 * e^{(-t/t_1)} + E_2 * e^{(-t/t_2)} + E_3 \quad (1)$$

Figura. 1 Modelo mecánico de Maxwell

Mecánicamente se representa mediante tres resortes conectados en paralelo, dos de ellos conectados a un amortiguador en serie, más un resorte solo, en donde el resorte representa la parte elástica y el amortiguador representa la parte viscosa (Figura 1).

Las limitantes de una prueba de relajación, son: el tiempo de prueba (tiempos muy largos), y el acceso a la zona de viscoelasticidad lineal (cuando sus propiedades son solamente dependientes del tiempo y no de la deformación impuesta), en algunos casos el acceso a esta zona se obtiene trabajando con bajos porcentajes de deformación. Si los datos se encuentran dentro de la zona lineal, los parámetros del modelo de Maxwell generalizado proporcionan información suficiente para determinar el comportamiento reológico del material.

En la mayoría de los geles es difícil acceder a la zona lineal, sin embargo se pueden ajustar a modelos empíricos. Un modelo empírico fue propuesto por Peleg (1979), donde las curvas de relajación son normalizadas con respecto al esfuerzo inicial:

$$E_0 t / [E_0 - E(t)] = k_1 + k_2 t \quad (2)$$

Donde E_0 es el valor inicial del módulo de relajación, mientras k_1 indica el tiempo característico de la prueba [s] y k_2 indica el nivel de relajación (adimensional); estos datos nos ayudan a encontrar los parámetros del módulo asintótico (E_A) [Pa], que indica el valor de proporcionalidad entre deformación y fuerza, cuando la fuerza empieza a ser constante durante la prueba.

$$E_A = E_0 (1 - 1/k_2) \quad (3)$$

otro modelo empírico es:

$$(E_0 - E(t)) / E_0 = abt / (1 + bt) \quad (4)$$

Empíricamente podemos conocer el comportamiento del material, con el valor de la constante de deformación "a" (adimensional), si $a = 0$ la muestra se comporta como un sólido, si $a = 1$ se comporta como un líquido, y si el valor de

$0 >$ a < 1 entonces se comporta como un material viscoelástico; y el valor de b muestra la velocidad del cambio de esfuerzo (s^{-1}) mientras se relaja la muestra (Fizman y col., 1986)

Generalmente una prueba de relajación requiere de un tiempo de prueba elevado que va de minutos, horas, hasta incluso días, sobre todo para materiales sólidos y con características viscoelásticas (Peleg y Pollak, 1981); este tiempo comparado con el de una prueba de Perfil de textura de duración de segundos a pocos minutos, y condiciones de prueba fácilmente repetibles, es mínimo. Aunque se sabe que las dos pruebas interpretan datos de manera diferente (reológica y textural, respectivamente), es de esperarse que algunos datos sean comparables, pues durante las pruebas se ejerce una deformación normal (deformación perpendicular al área) (Daget y Collyer, 1984).

En esta investigación se propuso conocer el comportamiento textural (perfil de textura) y reológico (relajación) del ate comercial de dos sabores, para determinar la relación existente entre sus parámetros, y elaborar un modelo de evaluación empírico que determine a través de pruebas texturales las propiedades viscoelásticas de materiales alimenticios con características semejantes al ate.

MATERIALES Y MÉTODOS

❖ Equipo

Durante esta investigación se trabajó en ambas pruebas con el "Texturómetro Lloyd" Modelo TA500 con celda de carga de 1 Kg (0.5N) y como dispositivo una

placa de aluminio de 4 cm de diámetro, bajo porcentajes de compresión o deformación de 10, 15 y 20%

❖ Preparación de la muestra

La muestra utilizada fue un ate comercial, marca "La Costeña" en presentación enlatada de 170 g de dos sabores guayaba y membrillo. En ambos casos la muestra fue de 3.5 cm de diámetro y 1.4 cm de altura, obtenidos mediante el corte de un cilindro de metal por toda el área de la lata, se trabajó con las muestras de apariencia homogénea y a temperatura ambiente 24 a 26 °C.

❖ Métodos

Perfil de textura

La Curva de PT se realizó en 6 etapas según Pons y Fizman 1996, con una velocidad de prueba de 100 mm /min, un tiempo de espera de 5 s entre 1° y 2° ciclos y una fuerza de contacto de 0.5 N; se efectuaron 5 repeticiones.

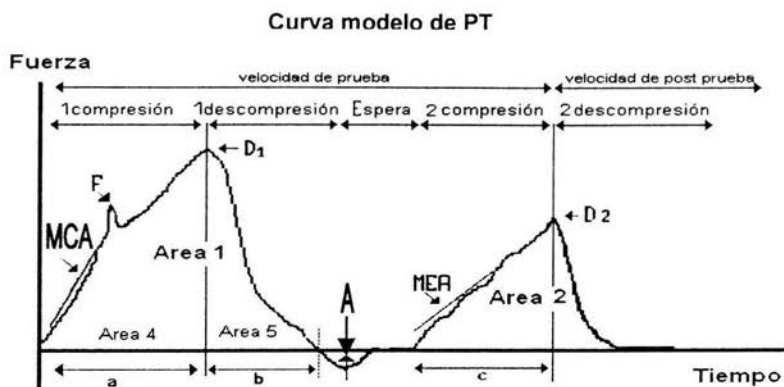


Figura 2: Curva modelo de APT.

Los parámetros se obtienen de la curva F vs t (figura 2) de la siguiente manera: dureza 1 y 2 (D_1 , D_2) miden la fuerza de resistencia máxima necesaria para deformar al

material durante el primer y segundo ciclo de compresión respectivamente; fracturabilidad (F) es la fuerza del primer pico significativo en la curva del primer ciclo de compresión; cohesividad (C) es la relación entre el área positiva del segundo ciclo sobre el área positiva del primer ciclo (área 2/área 4 + área 5); adhesividad (A) se mide como el área negativa (área 3) después del primer ciclo de compresión.

La elasticidad indica como un material recupera su estado inicial después de someterse a una deformación, se puede medir de dos formas: elasticidad recuperable instantánea (E_{RI}) es la relación de la distancia durante la descompresión sobre la distancia durante la compresión del primer ciclo (b/a), indica las propiedades elásticas del material; la elasticidad recuperable retardada (E_{RR}) es la relación de la distancia durante la compresión del segundo ciclo sobre la distancia durante la compresión en el primer ciclo (c/a), y es una consecuencia de las características viscosas del material; la masticabilidad (M) es el producto de los valores obtenidos de dureza, E_{RR} y cohesividad, se le considera la cuantificación de la fuerza requerida para masticar un área del material (Pons y Fizman, 1996).

Los módulos de Compresibilidad aparente y Elástico aparente son el cálculo de la pendiente inicial del primer y segundo ciclo de compresión respectivamente (MCA y MEA), en ambos se mide la elasticidad en forma de una constante proporcional (Bourne y Stanley 1981).

Relajación

Se realizó en compresión constante, a una velocidad de 2 mm/s, por triplicado y los parámetros que se obtuvieron directamente del programa del equipo fueron: fuerza inicial (N), fuerza final (N), fuerza asintótica (N), distancia inicial (mm), área total, tiempo relajación y tiempo de fuerza asintótica.

Los datos nativos de la prueba de relajación $F_{[N]}$ vs $t_{[min]}$ se utilizaron para calcular el módulo de relajación [E], mediante la corrección del esfuerzo y la deformación durante la prueba (Fizman y col.,1986); estos datos se utilizaron para obtener los parámetros reológicos mediante dos modelos: Maxwell generalizado (ecuación 1) basado en una serie de residuos sucesivos en el software de Curver expert V.I. obtenido por Pons y Fizman (1996), y por un modelo empírico propuesto por Peleg (1979) realizado en una hoja de cálculo en Excel.

❖ **Tratamiento de Datos**

Los datos de ambas pruebas fueron tratados estadísticamente por medio de un factorial 3^2 , el cual nos indicó cuales parámetros dependían de alguna de las variables experimentales.

❖ **Comparación de Pruebas**

Se realizaron dos tipos de comparaciones; primero se graficaron los parámetros reológicos y directos de relajación contra parámetros análisis de perfil de textura uno por uno en los tres porcentajes de compresión, de los cuales se obtuvieron 96 gráficos comparativos; en la segunda se elaboró una regresión múltiple en Excel de cada uno de los parámetros de relajación contra todos los parámetros de análisis de perfil de textura, para obtener todas las comparaciones posibles y obtener un modelo matemático de evaluación.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

PERFIL DE TEXTURA (PT)

El resultado gráfico obtenido en ambos sabores fue similar en forma, aunque no en cantidades. En las curvas F vs t de PT en la Figura 3 se observa el comportamiento del ate de guayaba, que independientemente del porcentaje de compresión el material muestra que los dos ciclos de compresión tuvieron una altura y área similares en cada uno de los porcentajes de compresión y que presentaron un área negativa después del primer ciclo de compresión; lo cual nos indica que el material tiene características elásticas (debido a la simetría ambos ciclos), cohesivas (por la similitud en las magnitudes de las áreas 1 y 2) y adhesividad (por presentar un área negativa entre el primer y segundo ciclos).

En los tres porcentajes, se observó en los valores de fuerza y área de los ciclos aumentaron conforme al porcentaje de compresión; sin embargo, no es una relación directamente proporcional.

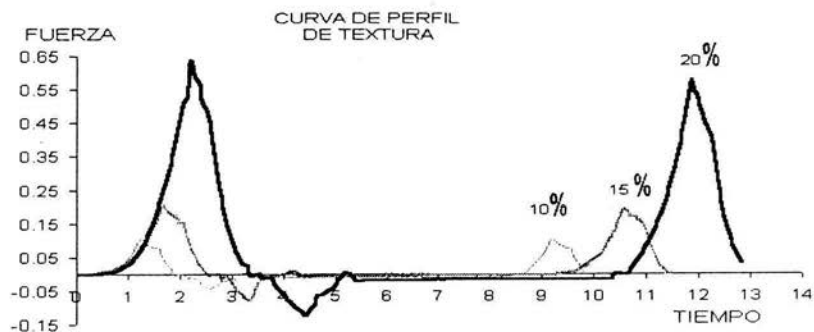


Figura 3: Gráfico de APT de ate de Guayaba con los tres porcentajes de compresión.

La elasticidad es uno de los parámetros del APT que se calcularon. En un estudio Pons y Fiszman (1996), indican, que en una muestra idealmente elástica o sólida los valores de E_{RI} y E_{RR} se igualarían a $1 \equiv E_{RI} \equiv E_{RR}$, pero si los componentes varían de forma: $E_{RR} > E_{RI}$, significa que existe una componente viscosa significativa en la muestra. En el APT se encontró que el comportamiento de elasticidades del ate fue de $E_{RR} > E_{RI}$ (Cuadro 1), por lo que se observa que existe una componente elástica y además una componente viscosa importante.

Cuadro 1. Parámetros de Elasticidad y Cohesividad a tres porcentajes de compresión

% de Compresión	Guayaba		Membrillo		Guayaba	Membrillo
	E_{RI}	E_{RR}	E_{RI}	E_{RR}	Cohesividad	
10	0.49	1.01	0.54	0.99	0.82	0.84
15	0.46	0.99	0.44	1.01	0.91	0.91
20	0.45	1.00	0.43	1.01	0.90	0.90

Los valores indicaron que físicamente con los valores de compresión utilizados la muestra no se deformó permanentemente, aunque su recuperación no fue instantánea.

Dentro de los parámetros característicos del ate se encuentra la cohesividad, cuyo valor máximo es 1, los valores obtenidos del ate fueron cercanos a 1 lo que confirma el carácter cohesivo del material, esto debido a los bajos porcentajes de compresión utilizados y a su característica viscoelástica.

Al realizar un análisis estadístico de tipo factorial a los parámetros de la prueba de PT, se observó que la variable sabor, no afectó el comportamiento

textural del ate, sin embargo, la variable porcentaje de compresión, sí tuvo importancia en algunos parámetros, ver Cuadro 2.

Cuadro 2. – Parámetros de perfil de textura que indican diferencia significativa con las variables de estudio, según el estadístico aplicado. $\alpha = 0.005$

Parámetro	% Compresión		Interacción	
	F	F crítica	F	F crítica
Dureza 1	53.2	3.9	11.4	3.9
Dureza 2	90.7	3.9	10.2	3.9
Masticabilidad	10.5	3.9	6.6	3.9
Módulo compresibilidad	----	----	22.4	3.9
Adhesividad	4.9	3.9	----	----
Módulo elástico aparente	4.0	3.9	5.7	3.9

- - - no presenta una diferencia significativa

En las Figuras 4 (a, b) se muestran para ambos sabores los gráficos polares de los parámetros que reportaron diferencias significativas en el tratamiento de datos debido al porcentaje de compresión impuesto.

Para un sólido elástico ideal el comportamiento de los parámetros de dureza 1 y 2 debe ser idéntico, pues su estructura no sería destruida y regresaría a su estado inicial instantáneamente. En los gráficos 4a y 4b se puede observar que los valores de dureza muestran sólo una pequeña diferencia entre ambos ciclos (dureza 1 y 2), lo que indicó que una pequeña parte de la estructura del ate fue destruida, y que se trabajó con un material con características más elásticas que viscosas. Además se observó que los datos de dureza varían ascendentemente con respecto al incremento de porcentaje de compresión.

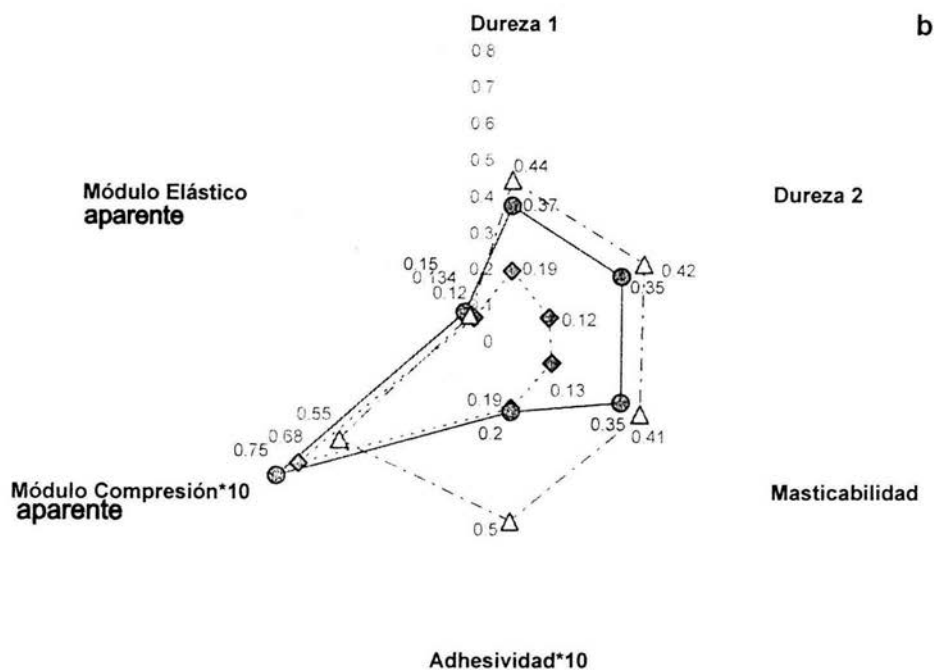
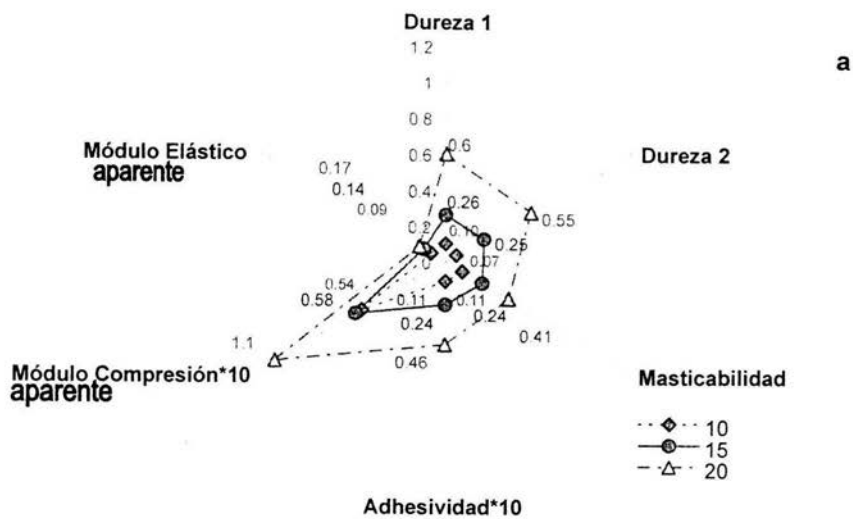


FIGURA 4 a y b: Gráficos polares de los parámetros de PT de guayaba (a) y membrillo(b). Los valores de los parámetros de Módulo de compresibilidad y adhesividad se encuentran elevados a la 10^1 en los gráficos para una mejor observación.

El valor de la masticabilidad depende del comportamiento de otros parámetros como lo son elasticidad, dureza y cohesividad, como los resultados de estos presentó un comportamiento ascendente conforme al porcentaje de compresión, lo mismo ocurrió con la masticabilidad que aumentó conforme a el porcentaje de compresión inducido.

La adhesividad presento valores que también aumentan conforme al porcentaje de compresión (ver gráficos 4a y 4b); debido a que al aplicar mayor % de compresión en la muestra, entra más en contacto con la superficie (placa y base del texturómetro), haciendo que para separarlos, el trabajo sea mayor.

Dentro de los parámetros elásticos, el módulo de compresibilidad, también conocido como la firmeza del material teóricamente debe ser medido antes del punto de fractura, pero como en el ate no se presentó fractura evidente, se tomó el valor de la pendiente predominante (cuando en la curva los valores empiezan a representar una línea recta) del primer ciclo (MCA).

Los valores del ate sabor guayaba muestran que el MCA aumentó cuando se aumentó el porcentaje de compresión, lo cual coincidió con el comportamiento mostrado en la dureza.

En el parámetro módulo de compresión del ate sabor de membrillo se observó que para 20% de compresión, presentó el menor valor de los tres, mientras que los otros dos aumentaron conforme al porcentaje impuesto; este evento

probablemente se debió a que se creó una pendiente menos inclinada al aplicarse una fuerza de oposición mayor. Lo mismo ocurre con el valor del parámetro de módulo elástico aparente, en donde el valor de 20% se encuentra en medio de los otros dos porcentajes.

Se compararon los valores de los MEA y MCA, donde se observó que el de MCA fue cuantitativamente mayor al de MEA, debido a que durante el primer ciclo de compresión se destruye parcialmente la estructura del material (parcialmente compactado, esto se comprobó con el resultado de la diferencia de las elasticidades ERR y ERI) dando como resultado que en la segunda compresión el material no opusiera mayor resistencia en el área parcialmente compactada y el valor de MEA fuera menor.

PRUEBA DE RELAJACIÓN

En la prueba de Relajación, se observó que el ate tuvo un comportamiento viscoelástico, a deformación constante. En las Figuras 5a y 5b se observó que hubo influencia del porcentaje de deformación y que, a mayor deformación impuesta mayor fuerza inicial, fuerza residual y tiempo para alcanzar valores de fuerza constante.

En ambos sabores del ate, no se alcanzó un valor constante de tiempo a pesar de que éste llegó a ser de 3 horas, sin embargo si se alcanzó el 37 % de la fuerza máxima de oposición, por lo que el análisis de las curvas fue posible

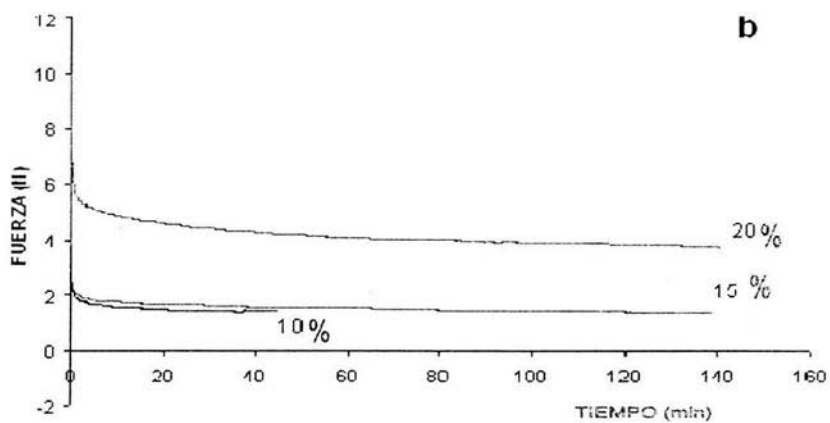
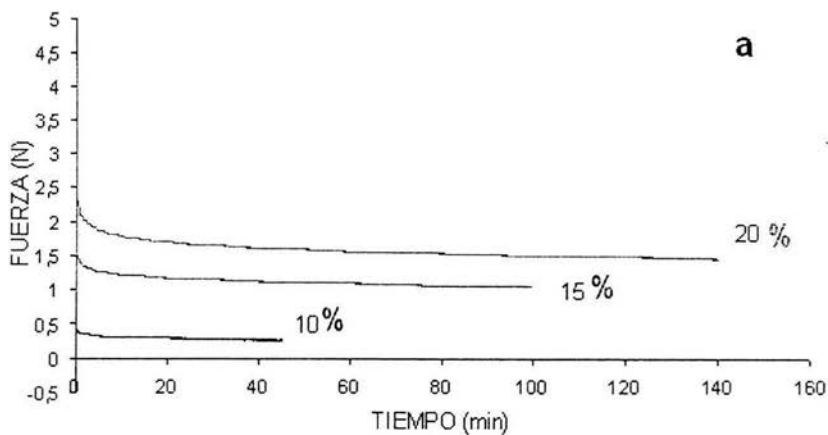


Figura 5.- Gráficos de relajación de los ates. a) sabor guayaba en 3 porcentajes de deformación. b) sabor de membrillo con 3 porcentajes de deformación.

◇ Análisis de datos directos de relajación.

Los parámetros directos fueron analizados por una evaluación estadística factorial 3^2 donde se puede observar en el cuadro 3 que los parámetros dependieron del sabor y del porcentaje de deformación.

Cuadro 3.- Parámetros Puntuales de Relajación que indican diferencia significativa según el estadístico aplicado. $\alpha = 0.05$

Parámetro	Sabor		% Deformación		Interacción	
	F	F crítica	F	F crítica	F	F crítica
Fuerza Inicial	8.1	5.9	126.3	5.2	238.9	5.2
Área Total	217.9	5.9	189.0	5.2	13.4	5.2
Tpo Fza Asintótica	6019.6	5.9	427.6	5.2	531.2	5.2
Fuerza Asintótica	153.9	5.9	12.7	5.2	12.6	5.2

El hecho de que los parámetros puntuales mostraran dependencia con el porcentaje de deformación, manifiesta que no se trabajó en condiciones lineales durante la prueba; es decir, no se pueden considerar para un análisis de tipo fundamental.

En los gráficos de la Figura 6 se representaron los valores de los parámetros puntuales obtenidos del programa del texturómetro. De estas figuras resalta que los datos de sabor membrillo presentaron magnitudes mayores al de sabor guayaba.

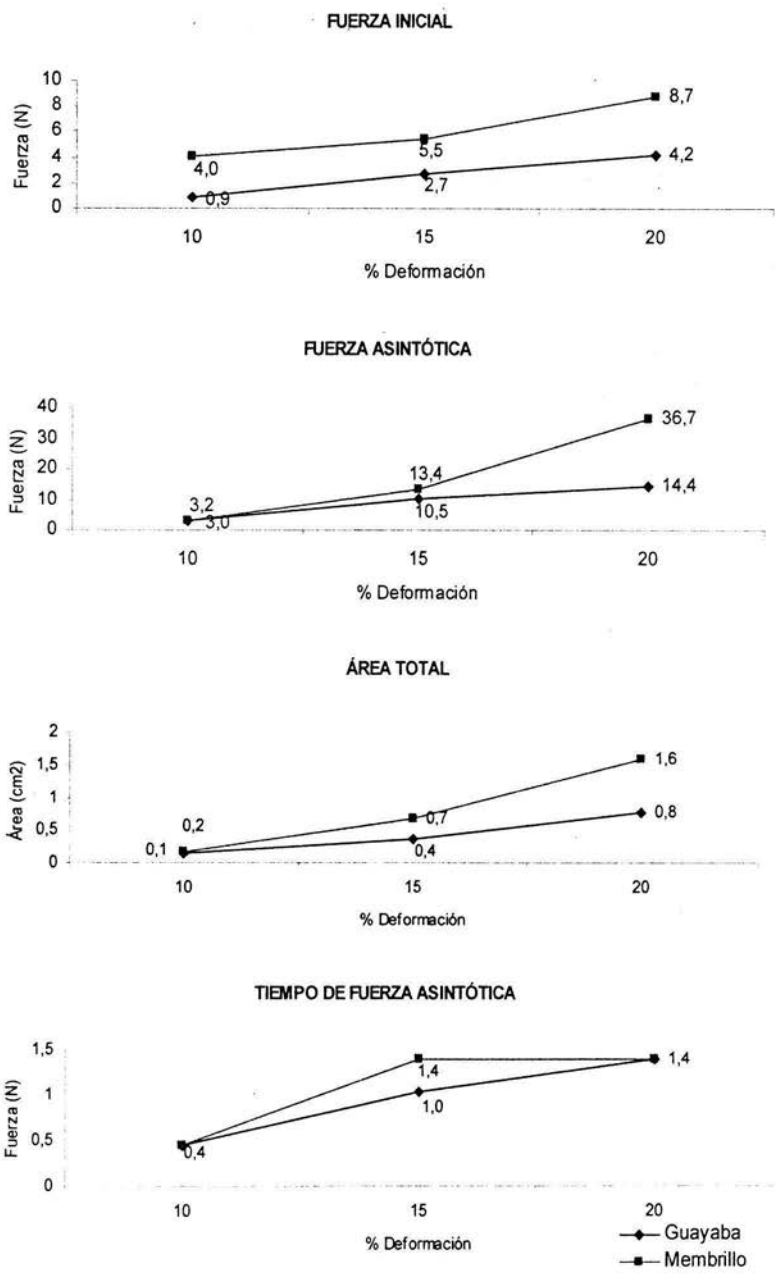


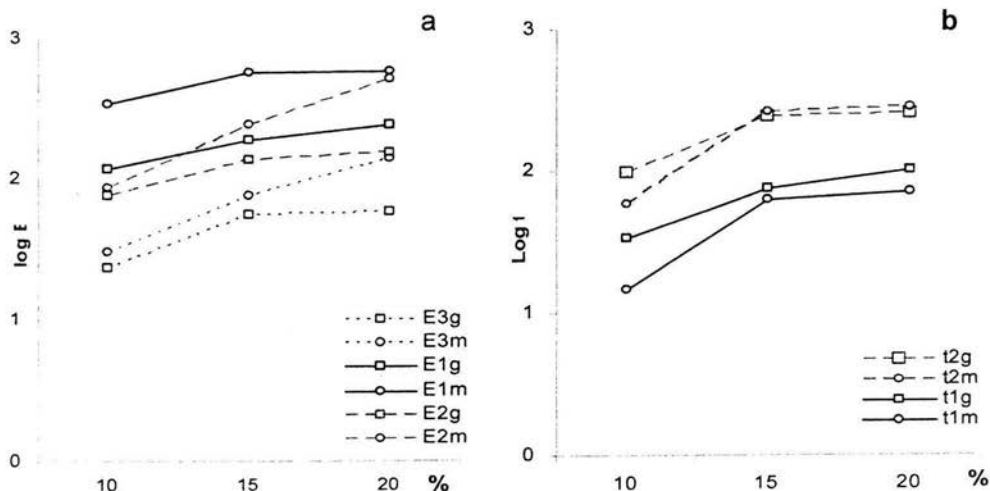
Figura 6.- Gráficos de los parámetros puntuales de la prueba de relajación para ate de guayaba y membrillo

En ellos se encontró, que los valores generalmente aumentaron conforme al porcentaje de compresión, aunque en el tiempo de fuerza asintótica el valor de 15% de relajación fue el mismo para los últimos dos porcentajes en el sabor de membrillo.

Al analizar los datos obtenidos, se observó que el ate de membrillo ofreció una mayor resistencia a ser deformado (debido tal vez a una estructura interna más fuerte) ya que para lograr el porcentaje de deformación requerido se necesitó de mayor fuerza, en comparación con el ate de guayaba.

◇ Análisis Reológico de Datos

Los datos obtenidos de la ecuación de Maxwell generalizado se ajustaron a un modelo con tres elementos; se reportaron 5 parámetros reológicos E_1 , E_2 , E_3 , t_1 y t_2 , ver figura 7a y 7b.



Figuras 7.- Gráficas comparativas de los valores de la ecuación de Maxwell

(a) comparación de los Módulos E en ambos sabores

(b) comparación de los parámetros tiempo t en ambos sabores

g = guayaba
m = membrillo

La relación de los elementos E con el porcentaje de deformación fue ascendente y dependiente de la deformación, donde la muestra de sabor membrillo fue la mayor, indicando que su estructura es más fuerte que la del ate de guayaba.

Los valores del parámetro E_1 fueron cuantitativamente los mayores sin embargo indicaron mayor distancia entre ambos sabores, en E_2 los valores muestran una tendencia similar en ambos en el porcentaje de 10, mientras que en los siguientes porcentajes los valores se separaron y en E_3 los valores se encuentran cercanos entre ellos, (ver figura 7a). El comportamiento de los valores de E, Fiszman (1986), lo atribuye a la estructura del sistema, ya que en E_1 los valores separados indican que existe una diferencia física entre ellos que pudo ser el sabor, mientras que en E_2 la diferencia disminuye mostrando tal vez la respuesta de la estructura básica del ate y los valores de E_3 pueden representar la respuesta de aspectos estructurales más internos como la movilidad de las moléculas de agua ocluidas en la red, la cual es la misma estructura en ambos sabores.

En el tiempo los valores mostraron respuesta ascendente con respecto a la deformación aplicada y dependencia a la misma; en ambos sabores los valores de t_2 fueron mayores que los de t_1 , esto indica que la primera parte de la estructura fue deformada rápidamente debido a que se deformó una pequeña porción del material, sin embargo deformar la estructura del ate necesitó de un mayor tiempo por lo que el valor de t_2 es mayor (ver figura 7b).

Los parámetros reológicos obtenidos en la ecuación de Maxwell, se utilizaron para obtener el módulo de Young $[E_{(t)}]$, durante todo el transcurso de la prueba, estos datos se muestran en el Cuadro 4, donde se observa que el de sabor membrillo presento un módulo de Young mayor que el ate de guayaba; teniendo diferencias hasta de 6 veces en magnitud, lo que podría indicar que la muestra de membrillo es más elástica ó más sólida.

Cuadro 4.- Intervalo de los valores promedio de módulo de Young (Pa), obtenido en los tres porcentajes de deformación y en los dos sabores de ate.

	Membrillo		GUAYABA	
	Intervalo	Promedio	Intervalo	Promedio
10	25,048.9 – 12,587.5	13,438.0	4,180.3 – 2,349.3	2,571.8
15	13,388.8 – 10,346.7	11,428.2	8,781.0 – 5,703.2	6,122.6
20	24,878.8 – 14,210.3	15,605.2	9,814.0 – 5,878.5	6,294.8

Sin embargo, se realizaron cálculos con un método empírico propuesto por Peleg, (1979) porque la prueba no alcanzó la zona lineal y el módulo de Young no es información suficiente para determinar el comportamiento reológico del ate. Los parámetros obtenidos se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5.- Valores empíricos del comportamiento del Ate de Guayaba y Membrillo en los tres diferentes porcentajes de deformación.

% Sabor	10		15		20	
	Guayaba	Membrillo	Guayaba	Membrillo	Guayaba	Membrillo
K_1 [s]	56.1	74.3	190.90	296.0	195.2	358.9
K_2	1.4	1.6	1.6	1.5	1.5	1.6
a	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6
b $[s^{-1}] \cdot 10^2$	2.4	2.0	8.0	5.0	7	4.0
E_A [Pa]	2,406.7	2,985.9	6,059.6	7,867.9	5,395.9	13,696.3
r^2	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999

Los valores de K_1 nos mostraron que el tiempo característico de la prueba aumentó cuando se incrementaron los porcentajes de deformación aplicados, comprobando que los tiempos de relajación se incrementan conforme aumentó la deformación en el material.

El valor de K_2 indica el nivel de relajación, si $K_2 = 1$, hay relajación completa del material, y cuando $K_2 > 1$ el material presenta mayor tendencia al comportamiento elástico. En el ate (en todas las condiciones estudiadas) el valor indicó una tendencia al comportamiento elástico, pero no tan elástico como otros materiales de grenetina a altas concentraciones, que presentan valores de $K_2 = 3$ (Sánchez Trujillo, 2002); lo cual indica que el ate tiene sólo una porción elástica, que no permite su relajación total.

Por otro lado, la media estadística, de $a = 0.65$, mostró un comportamiento viscoelástico; pues el valor se encuentra entre cero y uno, es importante mencionar que los valores de "a" mostraron independencia porque no hubo variación con respecto al porcentaje de deformación, ni al sabor.

Para "b", en los tres porcentajes de deformación, los valores de guayaba son mayores que los de membrillo. Esto indica que la muestra de membrillo presentó mayor resistencia a ser relajado y por ello la velocidad de cambio de esfuerzo fue menor que la de guayaba.

Este método empírico, permitió obtener el parámetro de módulo asintótico [Pa], los datos calculados mostraron que los valores aumentaron conforme a el porcentaje de deformación, este indica la proporcionalidad entre la deformación impuesta al material y la fuerza opuesta por el mismo, este parámetro confirma que el ate presentó un comportamiento elástico. Los valores de módulo asintótico son parecidos a los de módulo de Young final, (excepto en la muestra a 10% de deformación de membrillo) y oscilan entre los 2000 a 6000 en el sabor Guayaba y entre 2990 y 13000 (Pa) en el sabor Membrillo, debido a que las pruebas no se encontraron en la zona lineal los valores de la ecuación de Maxwell no representaron completamente el comportamiento del ate.

COMPARACION DE PRUEBAS

En la primera comparación de los datos se muestra la confrontación de los parámetros texturales contra los reológicos graficados uno contra otro, donde se encontraron siete formas generales de comportamiento (ver Figuras 8).

En las gráficas de las figuras (a) y (d), se comportaron de forma proporcional conforme al % ya sea ascendiendo o descendiendo respectivamente, esto mostró que pudo existir una relación lineal que asociara los dos valores de estas figuras con un coeficiente; en la figura (b) y (g) el comportamiento fue inverso, ya que mientras un parámetro aumentaba de valor, el otro disminuía; en la figura (c) el único dato fuera de control fue el de 15%, pues se comportó de manera independiente al porcentaje de deformación; y en las figuras (e) y (f) el

comportamiento fue ascendente conforme al %, sin embargo, fue complicado obtener una ecuación lineal que describiera en totalidad su comportamiento.

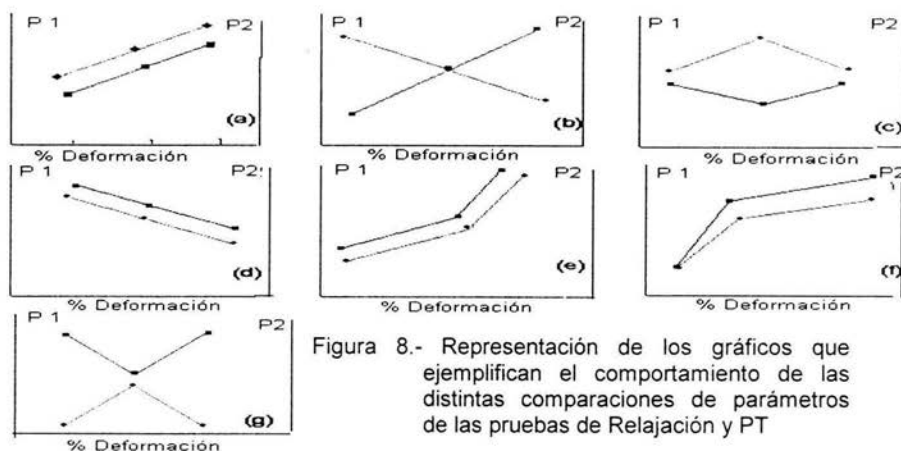


Figura 8.- Representación de los gráficos que ejemplifican el comportamiento de las distintas comparaciones de parámetros de las pruebas de Relajación y PT

En el Cuadro 6 se resume el comportamiento gráfico (descrito en la figura 8) de cada una de las comparaciones obtenidas de los parámetros de textura y reología para cada sabor de ate.

Cuadro 6.- Comportamiento de los gráficos comparativos de los parámetros de Textura y Relajación en ambos sabores

P. Reológico \ P. Textural	Fuerza Inicial		Fuerza Asintótica		Tiempo de Relajación		EA Modulo aparente		a constante de deformación		b vel de deformación	
	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M
Dureza 1 (D_1)	c	a	c	c	c	a	c	c	b	b	f	f
Dureza 2 (D_2)	c	a	c	c	a	c	c	a	b	b	f	f
Cohesividad (C)	b	a	b	c	b	c	c	c	a	c	a	a
Masticabilidad (M)	c	a	c	c	c	c	d	d	c	c	f	e
Adhesividad (A)	c	c	c	a	c	c	c	c	c	c	g	d
M. Elástico aparente (MEA)	a	c	b	f	g	a	f	g	c	c	c	c
M compresión aparente (MCA)	a	a	a	c	c	f	f	g	a	a	c	e

M = sabor Membrillo

G = sabor Guayaba

Posteriormente se realizaron las regresiones basadas en el comportamiento de los gráficos anteriores porque se supuso que podría existir un valor que los relacionara, se obtuvieron las regresiones de los parámetros reológicos contra los parámetros de PT que mostraron diferencia significativa. Se analizaron sólo las relaciones que bajo nuestro criterio podrían tener una relación con el comportamiento observado físicamente durante las dos pruebas. Los datos obtenidos de las regresiones se encuentran en el Cuadro 7, donde se da una ecuación general (5) para obtener cada parámetro de la prueba de relajación:

$$\text{Parámetro calculado de Relajación} = v \text{ int.} + [\text{coef} * v\text{PT}] \quad (5)$$

Donde:

V int. = valor de la intersección

coef = al coeficiente de la Cuadro 7

vPT = valor del parámetro textural al cual se refiere en el Cuadro 7

Los datos obtenidos indicaron que fue posible comparar datos reológicos con parámetros texturales basados en la observación de los gráficos de la figura 8, encontrando que existió una buena relación entre las dos pruebas estudiadas (con un r^2 superior a 0.8 en la mayoría de los casos)

Cuadro 7.- valores de la ecuación general obtenida para los parámetros seleccionados

Parámetro	Guayaba				Membrillo			
	PT	Coef	v Int.	r ²	PT	Coef	v Int.	r ²
Fuerza inicial	D ₁	6.27	0.65	0.961	D ₁	1.72	0.05	0.901
Tiempo Relajación	MEA	956.7	-43.7	0.903	D ₁	381	-37.3	0.971
Fuerza Asintótica	D ₂	0.25	0.03	0.929	A	7.33	-0.05	0.956
EA	MEA	39,366	-589	0.872	D ₂	31,268	-1,215.6	0.932
a	MEA	-0.04	0.67	0.816	MEA	2.1	0.36	0.981
b	MEA	-6.3	12.4	0.865	C	9.66	-4.55	0.954

PT = parámetro textural de referencia

Coef = al coeficiente obtenido de la ecuación

V Int. = valor de intersección obtenido de la ecuación

r² = valor de la regresión

De esta manera, si se cuenta con los datos de una prueba de PT, se puede definir en una forma más rápida, el comportamiento reológico aproximado de materiales con características similares a las del ate, siempre y cuando se trabaje bajo deformaciones iguales o menores a las utilizadas durante esta investigación. Es preciso decir que dentro de la experimentación faltó la comprobación de las ecuaciones obtenidas .

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indicaron que el ate presentó un comportamiento viscoelástico bajo las pruebas de perfil de textura y relajación por compresión, ambas a deformaciones menores al 20%, donde el ate de sabor membrillo presentó mayor resistencia en ambas pruebas que el ate de sabor guayaba .

Texturalmente, el ate mostró ser viscoelástico y con propiedades cohesivas, elásticas y adhesivas lo que indica un material con una estructura interna fuerte.

Reológicamente, el ate bajo las condiciones estudiadas mostró comportamiento viscoelástico con predominio de características elásticas que se ajustó al modelo de Maxwell generalizado con dos elementos y al modelo empírico de Peleg.

De los resultados de cada una de las pruebas fue posible observar que la de relajación fue más precisa en su análisis que la de perfil de textura, ya que permitió detectar diferencias significativas en los diferentes sabores; sin embargo ambas globalmente determinaron que los resultados fueron en el mismo sentido, un material viscoelástico.

Fue posible comparar los parámetros de las pruebas texturales con los parámetros reológicos, obteniendo ecuaciones que nos permitieron de forma más práctica obtener información reológica de materiales con características texturales similares al ate. Sin embargo, estas ecuaciones no fueron comprobadas por lo que se recomienda su comprobación en investigaciones siguientes.

Se sugiere que en posteriores trabajos se investigue otras dos formas de comparar los datos una PT con una prueba reológica, la primera con los datos de elasticidad con los parámetros reológicos K_1 y k_2 , y el segundo mediante la medición del "esfuerzo verdadero" y la "tensión verdadera", que representan un ajuste de la deformación real en el material, el resultado de la relación de ambos da el "módulo de deformabilidad" por compresión, el cual puede ser comparado con el valor G' de una prueba oscilatoria bajo compresiones de menores a 10%. (Pons y Fiszman, 1996).

BIBLIOGRAFÍA

- Arthey, D., y Ashurts, P.R., 1997. "Procesado de Frutas". Acribia. Zaragoza, España.
- Badui D.S., 1990. "Química de los Alimentos". México. Alambra Mexicana.
- Bourne, M.C. y Stanley C.H., 1981. "Effect of degree of compression on texture profile parameters". J. Texture Stud. **12**.
- Casas Alcanzáster, N. y Ramírez Ortiz M. E., 2001. "Módulo I, Propiedades Texturales". Reología y Textura de Materiales Biológicos. FES Cuautitlan, UNAM.
- Charley, H., 1988. "Preparación de Alimentos". Vol. IV LIMUSA, México.
- Daget, N., Collyer S., 1984. "Comparison between quantitative descriptive analysis and physical measurements of gel systems and evaluation of the sensorial method". J. Texture Stud. **15**.
- DeMan, J.M., P.W. Voisey, V.F. Rasper y D.W. Stanley., (eds) 1976. Rheology and texture in food quality. Avi Publishing Co. Westport, Conn.
- Fizman, S.M., Costell, E., Serra, P. y Duran, L., 1986. Relajación de sistemas viscoelásticos. Comparación de métodos de análisis de las curvas experimentales. Rev. Agroquím. Tecnol. Alimentaria **26** (1).
- Fizman, S.M., Pons, M. y Damásio, M.H., 1998. New parameters for instrumental texture profile análisis: instantaneos and retarded recoverable springiness. J. Texture Stud **29**.
- Nussinovitch, A., Steffens, M.S. y Chinachoti, P., 1992. Elastic properties of bread crumb. Cereal Chem.**69**.
- Peleg, M., 1979 "The Basics of Solid Foods Rheology". En: Rao, M.A. y J.F. Steffe (eds). Viscoelastic Properties of Foods. Elsevier Applied Science. Londres.
- Peleg, M. y Pollak, N., 1982. "The problem of equilibrium conditions in stress relaxation analyses of solid foods". J. Texture Stud. **13**.
- Pons, M., Fizman. S.M., 1996. "Instrumental texture profile analysis with particular reference to gelled system". J. of Texture Stud. **27**.

- Rao, M.A., 1999. Rheology of food gums and starch dispersions". En Rao, M. A. Rheology of fluid and semisolid foods, principles and applications". **23**
- Rao, V.N.M., 1992. Classification, description and measurement of viscoelastic properties of solid foods. En: Rao, M.A. y J.F. Steffe (eds). Viscoelastic properties of foods. Elsevier Applied Science. Londres.
- Sánchez Trujillo Lucía., 2002 " Propiedades reológicas (relajación y fluencia) de gelatinas comerciales (carragenina y grenetina). Trabajo de seminario "UNAM FES Cuautitlan.
- Southgate, D., 1992. AM "Conservas de Frutas y Hortalizas". Zaragoza, España. Acribia. pp. 59-79.
- Szczesniack, A.S., 1975. General food texture Profile revisited, ten years perspective. J. Texture Stud. **25**
- Szczesniack, A.S., M.A. Brandty H.H. Friedman., 1963. Development of standard rating sales for mechanical parameters of texture and correlation between objective and sensory methods of texture evaluation. J.Food Sci. **28**

GLOSARIO

A = Adhesividad [m²], parámetro de APT

a = Constante de deformación [adimensional]

ATP = Análisis de perfil de textura

b = velocidad de relajación [seg] parámetro de la ecuación empírica de Peleg

C = cohesividad [adimensional], parámetro de APT

D₁ = Dureza del primer ciclo de compresión [N], parámetro de APT

D₂ = Dureza del segundo ciclo de compresión [N], parámetro de APT

E = Módulo de deformación [adimensional]

E₁ = 1° módulo de la ecuación de Maxwell generalizado [Pa]

E₂ = 2° módulo de la ecuación de Maxwell generalizado [Pa]

E₃ = 3er módulo de la ecuación de Maxwell generalizado [Pa]

E_A = Módulo asintótico [Pa]

E_{RI} = Elasticidad recuperable instantánea [cm], parámetro de APT

E_{RR} = Elasticidad recuperable retardada [cm], parámetro de APT

K₁ = Tiempo característico de la prueba [seg] de la ecuación empírica de Peleg

K₂ = Nivel de relajación de la muestra [adimensional] de la ecuación empírica de Peleg

MCA = Módulo de compresibilidad aparente [adimensional], parámetro de APT

MEA = Módulo elástico aparente [adimensional], parámetro de APT

t₁ = Tiempo de relajación [seg] de la ecuación de Maxwell generalizado

t₂ = Tiempo de relajación [seg] de la ecuación de Maxwell generalizado