



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA**

**INFLUENCIA DE LA PASTA DE TEJOCOTE SOBRE LA FUNCIONALIDAD,
MICROESTRUCTURA Y FACTORES DE CALIDAD DEL YOGUR**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener

el grado de

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

Presenta:

Azucena Olvera Ortiz



APROBADA



Bajo la supervisión de: Landy Hernández Rodríguez, Doctora



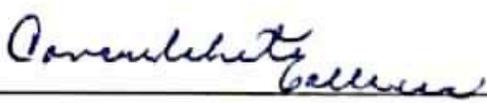
Chapingo, Estado de México, Noviembre de 2021

INFLUENCIA DE LA PASTA DE TEJOCOTE SOBRE LA FUNCIONALIDAD,
MICROESTRUCTURA Y FACTORES DE CALIDAD DEL YOGUR

Tesis realizada por **AZUCENA OLVERA ORTIZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

DIRECTOR: 
DRA. LANDY HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

CODIRECTOR: 
DRA. CONSUELO SILVIA OLIVIA LOBATO CALLEROS

ASESOR: 
DRA. OFELIA SANDOVAL CASTILLA

ASESOR: 
DR. ELEAZAR AGUIRRE MANDUJANO

CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE CUADROS..... | vi |
| LISTA DE FIGURAS..... | vii |
| DEDICATORIAS..... | ix |
| AGRADECIMIENTOS..... | x |
| DATOS BIOGRÁFICOS | xi |
| 1. INTRODUCCIÓN GENERAL..... | 1 |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1 Generalidades del fruto de tejocote (<i>Crataegus pubescens</i>)..... | 3 |
| 2.2 Composición del fruto de tejocote y potencial como ingrediente funcional | 4 |
| 2.2.1 Pulpa de tejocote..... | 5 |
| 2.2.2 Cáscara de tejocote..... | 6 |
| 2.2.3 Contenido de pectina en el fruto de tejocote | 6 |
| 2.2.4 Compuestos fenólicos de tejocote..... | 8 |
| 2.2.5 Potencial antioxidante del fruto de tejocote | 10 |
| 2.3 El yogur y su importancia | 13 |
| 2.4 Tipos de yogur | 15 |
| 2.5 Producción de yogur en México | 16 |
| 2.6 Factores de calidad en el yogur..... | 17 |
| 2.7 Mecanismos de estabilización del yogur | 19 |
| 2.8 Estabilizantes utilizados en yogur..... | 20 |
| 2.9 Microestructura en el yogur | 23 |
| 2.10 Uso de pastas de frutas en yogur | 25 |
| 2.11 Perspectivas en la producción del yogur | 26 |
| 2.12 Literatura citada | 28 |
| 3. INFLUENCIA DE LA PASTA DE TEJOCOTE SOBRE LA FUNCIONALIDAD, MICROESTRUCTURA Y FACTORES DE CALIDAD DEL YOGUR | 34 |
| 3.1 RESUMEN..... | 34 |
| 3.2 INTRODUCCIÓN..... | 36 |
| 3.3 MATERIALES Y MÉTODOS | 38 |

| | |
|---|----|
| 3.3.1 Ubicación del trabajo | 39 |
| 3.3.2 Materiales | 39 |
| 3.3.3 Obtención de la pasta de tejocote | 39 |
| 3.3.4 Caracterización de la pasta de tejocote..... | 40 |
| 3.3.5 Caracterización fisicoquímica | 40 |
| 3.3.6 Color de la pasta de tejocote | 41 |
| 3.3.7 Actividad antioxidante de la pasta de tejocote..... | 41 |
| 3.3.8 Elaboración del yogur enriquecido con pasta de tejocote | 42 |
| 3.3.9 Cinética de fermentación de los yogures..... | 44 |
| 3.3.10 Caracterización del yogur enriquecido con pasta de tejocote | 44 |
| 3.3.11 Caracterización fisicoquímica | 44 |
| 3.3.12 Color del yogur | 45 |
| 3.3.13 Análisis reológico..... | 45 |
| 3.3.14 Análisis de actividad antioxidante..... | 46 |
| 3.3.15 Análisis de microestructura | 46 |
| 3.3.16 Evaluación sensorial..... | 48 |
| 3.3.17 Análisis de datos | 48 |
| 3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 49 |
| 3.4.1 Caracterización fisicoquímica de la pasta de tejocote (PT) | 49 |
| 3.4.2 Cinética de acidificación | 53 |
| 3.4.3 Caracterización de las variantes de yogur enriquecido con pasta de tejocote | 55 |
| 3.4.4 Caracterización fisicoquímica del yogur | 55 |
| 3.4.5 Color del yogur | 58 |
| 3.4.6 Comportamiento reológico de los yogures | 62 |
| 3.4.6.1 Propiedades de flujo..... | 62 |
| 3.4.6.2 Propiedades viscoelásticas | 67 |
| 3.4.7 Análisis de microestructura de los yogures | 72 |
| 3.4.8 Análisis de actividad antioxidante | 77 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 3.4.9 Evaluación sensorial..... | 79 |
| 3.5 CONCLUSIONES | 83 |
| 3.6 AGRADECIMIENTOS..... | 83 |
| 3.7 LITERATURA CITADA | 84 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Composición del fruto de tejocote | 5 |
| Cuadro 2. Caracterización de pectina de tejocote | 8 |
| Cuadro 3. Caracterización fitoquímica de frutos de tejocote..... | 9 |
| Cuadro 4. Actividad antioxidante (DPPH) de extractos del fruto de tejocote | 12 |
| Cuadro 5. Clasificación de estabilizantes del yogur según su origen | 21 |
| Cuadro 6. Formulación de las variaciones de yogur | 43 |
| Cuadro 7. Características de la pasta de tejocote | 50 |
| Cuadro 8. Parámetros de cinética de acidificación de los yogures | 53 |
| Cuadro 9. Características fisicoquímicas de las variantes de yogur durante el almacenamiento en frío a 4° C..... | 55 |
| Cuadro 10. Evaluación de color del yogur | 59 |
| Cuadro 11. Valores medios de los parámetros del modelo de Ellis | 64 |
| Cuadro 12. Valores de los módulos de almacenamiento (G'), pérdida (G'') y factor de cedencia ($\tan\delta$) de los yogures en la región viscoelástica lineal..... | 68 |
| Cuadro 13. Valores de la prueba de aceptabilidad global de los yogures | 80 |
| Cuadro 14. Vectores propios | 82 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Efecto de diferentes concentraciones de extractos de tejocote sobre la inhibición del radical superóxido generado por el sistema xantina-xantina oxidasa. | 11 |
| Figura 2. Actividad inhibidora del radical DPPH de diferentes genotipos de tejocote. | 13 |
| Figura 3. Producción industrial por tipo de yogur. | 17 |
| Figura 4. Representación de microestructura del yogur batido durante su proceso de manufactura. | 24 |
| Figura 5. Representación de microestructura de los microgeles. | 24 |
| Figura 6. Diagrama de bloques de las diferentes etapas de investigación. | 38 |
| Figura 7. Curva de flujo de las variantes de yogur al día uno de almacenamiento. | 63 |
| Figura 8. Curva de flujo de las variantes de yogur al día veintiuno de almacenamiento. | 63 |
| Figura 9. Variación de módulo de almacenamiento (G' símbolos sólidos) y pérdida (G'' símbolos vacíos) de las variantes de yogur al día uno de almacenamiento como función del porcentaje de deformación. | 69 |
| Figura 10. Variación de módulo de almacenamiento (G' símbolos sólidos) y pérdida (G'' símbolos vacíos) de las variantes de yogur al día veintiuno de almacenamiento como función del porcentaje de deformación. | 70 |
| Figura 11. Variación de $\tan \delta$ al día uno (símbolos sólidos) y veintiuno (símbolos vacíos) de las variantes de yogur como función del porcentaje de deformación y tiempo de almacenamiento. | 71 |
| Figura 12. Micrografías de los yogures al día veintiuno de almacenamiento. | 73 |
| Figura 13. Superficie de microgeles. | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 14. Tamaño de microgeles | 75 |
| Figura 15. Índice de heterogeneidad de los yogures | 76 |
| Figura 16. Índice de circularidad | 76 |
| Figura 17. Incremento en el porcentaje de inhibición del radical DPPH de las variantes de yogur respecto del control durante el almacenamiento en frío a 4°C | 78 |
| Figura 18. Análisis de componentes principales de los yogures..... | 82 |

DEDICATORIAS

La verdadera sabiduría está en reconocer la propia ignorancia
Sócrates.

A la vida, las circunstancias y personas que me permitieron concluir esta etapa:
GRACIAS

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo, al Departamento de Ingeniería Agroindustrial y al Departamento de Preparatoria Agrícola por las facilidades brindadas para el desarrollo de esta investigación.

Al posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, por los conocimientos y apoyo brindado durante mi estancia.

Al Banco de Germoplasma de la Universidad Autónoma Chapingo, al Dr. Raúl Nieto e Ing. Javier Sánchez por su apoyo para la obtención de los frutos de tejocote utilizados en esta investigación.

A mi comité asesor por su apoyo en la planeación y desarrollo de esta investigación; la constante guía, acertados ajustes y plena dedicación para culminar este proyecto.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Azucena Olvera Ortiz

Fecha de nacimiento: 11 de agosto de 1995

Lugar de nacimiento: Apan, Hidalgo, México.

CURP: OEOA950811MHGLRZ08

Profesión: Ingeniero Agroindustrial

Cédula profesional: 11653431



Desarrollo académico:

Bachillerato: Preparatoria agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

Licenciatura: Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En los últimos años, la industria ha centrado sus esfuerzos en el desarrollo de nuevos productos o alimentos que no solo proporcionen los nutrientes necesarios para la alimentación humana, sino que también ayuden a prevenir enfermedades relacionadas con la nutrición como diabetes, obesidad, hipertensión y complicaciones cardiovasculares (Wang et al., 2019). Se ha evidenciado una correlación significativa entre la ingesta regular de fitoquímicos y la prevención de enfermedades relacionadas con el estilo de vida (Rodríguez-Jiménez et al., 2018).

El yogur es un producto lácteo fermentado con múltiples beneficios al ser una excelente fuente de proteínas, calcio, fósforo, riboflavina, tiamina, vitamina B12, ácido fólico, niacina, magnesio y zinc (Witschinski et al., 2018); sin embargo, aun cuando el yogur es un alimento con alta demanda dentro de la población, este no representa una fuente considerable de componentes bioactivos (Witschinski et al., 2018); por lo que se ha utilizado como un medio para incorporar compuestos de interés nutricional (Wang et al., 2019).

Las frutas se consideran una excelente fuente de antioxidantes, polifenoles y fibras prebióticas. La combinación de frutas o partes de estas en el yogur, le confieren un valor nutricional fisiológico adicional, el cual implica un efecto sinérgico sobre la salud del consumidor (Senadeera et al., 2018).

Los frutos de tejocote o sus extractos de pulpa podrían usarse como un nuevo ingrediente para la elaboración de alimentos funcionales, debido a que los principales compuestos fenólicos libres identificados en el extracto de fruto de tejocote son epicatequina, catequina, ácido clorogénico y procianidinas; la presencia de dichos compuestos biológicamente activos como los flavonoides presentes en el extracto de *Crataegus pubescens* tienen la capacidad de capturar radicales libres y presentar actividad antioxidante, demostrando el poder nutracéutico potencial de esta fruta (González-Jiménez et al., 2018). Aunado al

contenido de fenoles totales, el fruto de tejocote es fuente de pectina que se obtiene con un elevado rendimiento y calidad igual o superior a la pectina cítrica comercial (Cuevas-Bernardino et al., 2016). El contenido resulta de interés en la estabilización de productos lácteos fermentados como el yogur (Wusigale et al., 2020).

Finalmente, es preciso destacar que aun cuando se han reportado estudios donde se evalúa el efecto de la pectina de tejocote sobre la gelificación del yogur, no se han llevado a cabo investigaciones de manera sistemática donde se evalúe el efecto de la adición de pasta de tejocote (pulpa y cáscara del fruto) sobre las propiedades del yogur batido.

Con lo expuesto anteriormente se generó la siguiente hipótesis: La incorporación de pasta de tejocote en la elaboración de un yogur batido permitirá conformar un arreglo estructural en la red de proteína diferente al del yogur batido convencional, mejorando sus características mecánico-sensoriales en comparación a un yogur batido convencional.

Con base en lo anterior, el objetivo general de esta investigación fue determinar los cambios en las propiedades fisicoquímicas, reológicas, microestructurales, actividad antioxidante, atributos sensoriales y sinéresis de yogures batidos adicionados con 0.1 (Y0.1), 0.3 (Y0.3) y 0.5% p/p (Y0.5) de pasta de tejocote.

Para el cumplimiento del objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos: a) determinar las características (humedad, color, pH, acidez titulable, porcentaje de cenizas, proteínas, contenido de azúcares totales, contenido de polifenoles y capacidad antioxidante) de la pasta de tejocote, b) evaluar la influencia de la pasta sobre la cinética de fermentación en la elaboración de los yogures, c) determinar el pH, acidez titulable, sinéresis y actividad antioxidante de los yogures, d) estudiar la microestructura y propiedades mecánicas en los yogures, e) analizar las propiedades sensoriales de yogures batidos con adición de pasta de tejocote.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del fruto de tejocote (*Crataegus pubescens*)

El género *Crataegus* pertenece a la familia de las rosáceas; es un árbol perenne ampliamente extendido en el hemisferio norte, distribuido principalmente en Asia, Europa y América del Norte. El género *Crataegus* agrupa alrededor de 1200 especies reportadas en el mundo, de las cuales 95 de ellas se encuentran en el Continente Americano y de éstas, alrededor de 15 en México; donde, la especie nativa *Crataegus Pubescens* se conoce con el nombre de tejocote. El nombre tejocote, es el más extendido en México, es de origen náhuatl, de las raíces “*tetl*” piedra y “*xocotl*” agrio o ácido (Ornelas-Lim et al., 2021).

El fruto de tejocote es semejante a una pequeña manzana, presenta un sabor agridulce, aromático y de colores que van desde los tonos amarillos hasta los tonos rojos y anaranjados; de forma regular tiene cuatro semillas en su interior, pero puede llegar a tener hasta 6 (de 1 a 2 centímetros de diámetro) (SIAP, 2019).

Los frutos de tejocote se han empleado para el tratamiento de diversas enfermedades (hipertensión, enfermedades del corazón), hay algunos reportes de su uso en la medicina tradicional, donde los frutos se usan para combatir problemas cardíacos; en tanto que la raíz tiene efectos diuréticos y las flores y frutos contienen diversos compuestos con potencial antioxidante (Hernández et al., 2015). Los frutos de tejocote también se consumen frescos, en mermelada, compota o en decocciones para obtener bebidas calientes (Ornelas-Lim et al., 2021).

Debido a las características de rusticidad de la planta, se cultiva bajo condiciones extremas, de suelos compactos, pedregosos, limitada fertilidad y baja humedad; situación que le permite contribuir a la conversión del suelo reduciendo los problemas de erosión (Hernández et al., 2015).

Según datos del SIAP, 2020 la producción nacional de tejocote es de 5186.17 toneladas; el principal estado productor es Puebla con el 89%, algunos otros estados que aportan a la producción nacional son el Estado de México, Tlaxcala, Chiapas, Michoacán, Hidalgo y Morelos. Según datos de la Secretaría de Desarrollo Rural de Puebla (2019) existen 28 municipios productores de tejocote; en los que, gracias a sus 874 hectáreas de cultivo, generan 4 mil 986 toneladas anuales, lo que representa un total de ingresos por más de 17 millones de pesos. El 60% de toda la producción de este fruto en este estado se da en los municipios de Soltepec, Chiautzingo, Huejotzingo, Calpan y Tlahuapan.

Las especies *C. pubescens* y *C. mexicana* se cultivan comercialmente en Puebla; mientras que las especies *C. gracilior* y *C. mexicana* son las más abundantes en el centro y norte del país; *C. stipulosa* se encuentra principalmente en la parte sur del país (Cervantes-Paz et al., 2018).

En general, la producción de tejocote se basa en materiales criollos con la consecuente heterogeneidad en cuanto a rendimiento, tamaño y color de fruto. No obstante, en los últimos años y con base a una colecta de genotipos de tejocote de algunas regiones productoras de México, se ha establecido el banco de germoplasma *ex situ*, tendiente a la conservación del género y a la investigación, el cual se encuentra ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo y alberga más de 100 accesiones provenientes de los estados de México, Puebla, Chiapas y un genotipo de España (Hernández et al., 2015).

2.2 Composición del fruto de tejocote y potencial como ingrediente funcional

Los frutos maduros de tejocote se componen del 94.7% de parte comestible, este tejido tiene una acidez reportada de 2.46 mL de NaOH 0.1 N por gramo de tejido y un valor de pH de 3.0 (Linares-García et al., 2015).

En el Cuadro 1 se presenta la composición del fruto de tejocote, donde se puede apreciar que es un fruto rico en vitamina C, vitamina A, carotenos, sales minerales como calcio, fósforo, hierro y presenta un alto contenido de pectina; se

caracteriza por tener un alto contenido de agua, así como carbohidratos, teniendo como componentes minoritarios a las grasas y proteínas (FAO,2015).

Cuadro 1. Composición del fruto de tejocote

| Componente | % |
|-----------------------|-------|
| Agua | 74.7 |
| Proteínas | 0.8 |
| Grasas | 0.6 |
| Cenizas | 0.8 |
| Carbohidratos totales | 23.10 |
| Colesterol (mg) | 0.00 |
| Calcio (mg) | 94 |
| Vitamina C (mg) | 46 |
| Hierro (mg) | 1.6 |
| Vitamina A (µg) | 422 |
| Tiamina (µg) | 0.04 |
| Riboflavina (mg) | 0.06 |
| Niacina (mg) | 0.4 |

Fuente: FAO (2015).

2.2.1 Pulpa de tejocote

Nieto et al. (2009) reportaron que el contenido de pulpa y epidermis superó el 90% de la totalidad del fruto. La composición química de la pulpa de tejocote otorga la posibilidad de emplearla como una fuente de carotenos y otros compuestos de interés; sin embargo, la composición se ve afectada por factores como la variedad y estado de madurez.

La humedad reportada para la pulpa de tejocote se encuentre entre 72.35 y 76.74 % (Hernández et al., 2015); el contenido de compuestos fenólicos entre 8.1 y 22 mg g⁻¹ (Nieto et al., 2009). Hernández et al. (2015) reportaron una concentración de carbohidratos en un intervalo de 1.74 - 3.08 g/ 100 g, donde, la glucosa presenta la menor concentración, seguido de la fructosa y la sacarosa en mayor proporción (entre 38 y 89 %). El contenido de ácido málico encontrado fue de 0.05 y 0.17 g/100 g de pulpa. Los contenidos del extracto no nitrogenado que corresponden principalmente a los polisacáridos tales como pectinas, celulosa y hemicelulosa (20 - 24 %). Otro componente de relevancia reportado en la pulpa de tejocote son los carotenoides; los cuales se encuentran en un intervalo de 7.42 a 44.51 mg/ g de pulpa (Hernández et al., 2015).

2.2.2 Cáscara de tejocote

La cáscara de tejocote resulta de interés, debido a la concentración de compuestos fenólicos presentes; sin embargo, el perfil de las unidades monoméricas y oligoméricas que la componen, se determinan principalmente por la especie de la cual se obtiene la cáscara (Robles-Botero et al., 2020).

Los flavonoides son el grupo de compuestos fenólicos más importantes del fruto de tejocote. Se ha reportado una concentración de flavan-3-ol de 60.3 ± 3.2 mg EC/ g cáscara y proantocianidinas de 3.69 ± 0.01 mg / g cáscara. La síntesis de flavonoides es promovida por la luz solar, la cual genera una mayor concentración de estos componentes en los tejidos externos de la planta, o bien del fruto. De la misma forma, el ácido ascórbico es uno de los componentes mayoritarios encontrados (25.44 ± 0.06 mg/g cáscara), seguido de la quercetina 3-D galactósido ($0.14 - 0.47 \pm 0.01$ mg/ g cáscara) y el ácido clorogénico (0.85 ± 0.01 mg/ g cáscara). Los perfiles químicos de los flavonoides identificados en la cáscara otorgan una importante actividad antioxidante y capacidad reductora del hierro (Robles-Botero et al., 2020).

2.2.3 Contenido de pectina en el fruto de tejocote

El fruto de tejocote contiene una alta concentración de pectina, llegando a obtener hasta un 27 % de rendimiento; con aplicaciones potenciales en la industria

alimentaria, derivado de su capacidad para la formación de geles (Lozano-Grande et al., 2016).

La pectina es un polisacárido complejo formado principalmente por ácido D-galacturónico esterificado con unidades de metanol, unido mediante enlaces del tipo α -(1-4) glucosídicos. Este polisacárido contiene regiones de homogalacturano y ramnogalacturano tipo I y tipo II; también se sabe que la pectina contiene otras cadenas laterales de azúcares neutros en la región del ramnogalacturano, donde los más comunes son D-galactosa y la D-xilosa unidas covalentemente a los residuos de ramnosilo. Dependiendo del número de grupos carboxilo metoxiesterificados presentes, la pectina puede clasificarse en pectina de bajo metoxilo (LMP) con un grado de esterificación (DE) en el rango de 30 % - 35 % y puede formar un gel en un rango de pH más amplio (2.0 - 6.0) sin la adición de azúcar y en presencia de iones divalentes (por ejemplo calcio); por el contrario, la pectina de alto metoxilo (HMP) tiene un valor de DE entre 58 % - 76 % y sólo puede formar un gel en una solución ácida (alrededor de pH 3) en presencia de co-solutos de bajo peso molecular, como la sacarosa. La gelificación de la HMP es el resultado de las zonas de unión intermolecular creadas por los enlaces de hidrógeno y la interacción hidrofóbica de la cadena de pectina (Begum et al., 2021).

En el Cuadro 2 se presenta la caracterización de la pectina de tejocote realizada por Linares- García et al. (2016) donde se reportó una pectina de alto metoxilo (HM), con un grado de esterificación (DE) de 89.1 ± 0.2 y un contenido de ácido galacturónico del 67 %.

Cuadro 2. Caracterización de pectina de tejocote

| Parámetro | Pectina de Tejocote |
|----------------------------------|---------------------|
| Humedad | 11.4 ± 0.9 |
| Contenido de ácido galacturónico | 67.1 ± 3.5 |
| Grado de esterificación | 89.1 ± 0.2 |
| Grado de Acetilación | 2.3 ± 0.06 |
| Peso Molecular (kDa) | 502.3 |

Fuente: Linares-García et al. (2015)

Los extractos de pectina de tejocote (HMPH) se pueden utilizar como agentes gelificante con características similares a las de la pectina comercial extraída de frutos cítricos. En términos reológicos (G') se reporta que la pectina de alto metoxilo de tejocote (HMPH) es capaz de formar geles que exhiben una elasticidad casi tres veces mayor que la de los geles formados con pectina de alto metoxilo de cítricos (HMPC); ambos sistemas se consideran sólidos viscoelásticos, lo cual implica que son más elásticos que viscosos ($G' > G''$). Los geles de HMPH exhibieron la mayor oposición a la deformación y un mayor porcentaje de recuperación, además de exhibir una mayor dureza en comparación con los geles de HMPC (Linares-García et al., 2015).

2.2.4 Compuestos fenólicos de tejocote

De acuerdo con lo reportado por González -Jiménez et al. (2018) el contenido de carbohidratos totales de los extractos fenólicos fue de 69.8 % ± 1.61 %, de los cuales los flavonoides son los compuestos principales responsables de la actividad funcional de la especie *Crataegus pubescens*. Por otro lado, las proantocianidinas presentan efectos beneficiosos para los vasos sanguíneos del endotelio al inhibir la liberación de endotelina-1 y mejorar la circulación

sanguínea, por lo tanto, estas especies pueden ser utilizados en el tratamiento de enfermedades como la insuficiencia cardíaca.

En el Cuadro 3 se presenta la caracterización fitoquímica y contenido de compuestos polifenólicos en frutos de *Crataegus pubescens*.

Cuadro 3. Caracterización fitoquímica de frutos de tejocote

| Grupo/Compuesto | Concentración |
|--|---------------|
| Carbohidratos totales (g/ 100 g de extracto) | 69.8 ± 1.61 |
| Fenólicos totales (mg de ácido gálico equivalente/ g de fruta seca) | 168.6 ± 0.9 |
| Flavonoides totales (mg equivalentes de quercetina/ g de frutos secos) | 55.89 ± 0.11 |
| Proantocianidinas (mg de cianidina/ 100 g de frutos secos) | 84.57 ± 1.43 |
| (-) -Epicatequina (mg/100 mg de frutos secos) | 4.32 ± 0.11 |
| (+) -Catequina (mg/ 100 mg de frutos secos) | 9.17 ± 0.20 |
| Ácido clorogénico (mg/ 100 mg de frutos secos) | 5.60 ± 0.24 |

Fuente: González-Jiménez et al. (2018)

Es importante mencionar que la catequina y epicatequina (flavan-3-ol) presentes en el fruto de tejocote (Cuadro 2) presentan una alta actividad antioxidante, propiedades antimutagénicas, antidiabéticas, propiedades antiinflamatorias, antibacterianas y antivirales. Por tanto, debido a la presencia de (-) – epicatequina, (+) – catequina y ácido clorogénico identificados en el extracto fenólico de tejocote (*Crataegus pubescens*), los frutos de tejocote o sus extractos de pulpa podrían utilizarse como un nuevo ingrediente para la elaboración de alimentos funcionales o bien como nutraceuticos (González-Jiménez et al., 2018).

Los compuestos fenólicos pueden ejercer su actividad biológica a través de diversos mecanismos de acción, que incluyen su interacción con algunas enzimas, factores de transcripción, receptores, membranas y a través de su capacidad para neutralizar radicales libres. (Cervantes-Paz et al., 2018).

La composición cualitativa y cuantitativa de compuestos bioactivos en el tejocote depende de la especie, tejido y estado de madurez del fruto, entre otros factores, aunque existe poca información al respecto (Cervantes-Paz et al., 2018).

2.2.5 Potencial antioxidante del fruto de tejocote

Los compuestos fenólicos participan en la estabilización de los radicales libres y metales al actuar como donantes de electrones (Robles-Botero et al., 2020).

Se ha reportado la alta capacidad antioxidante observada en extractos de flores de *C. monogyna*; la cual es conferida por la (-) epicatequina, (+) catequina, quercetina y procianidina (Cervantes et al., 2018). Wen et al. (2015) reportaron la elevada capacidad antioxidante de bebidas de tejocote (*C. Pinnatifida*), debida al alto contenido de polifenoles, los cuales pueden inhibir la oxidación.

El fruto de tejocote resulta de interés, debido a su capacidad de atrapar los radicales libres; en la figura 1 se muestra la relación inhibidora del radical superóxido dependiente del extracto fenólico. Se puede observar que cuando las concentraciones de extracto oscilan entre 200 y 1000 µg/mL hay un porcentaje de inhibición del radical superóxido entre el 19.5 % y 61.7% (González-Jiménez et al., 2018).

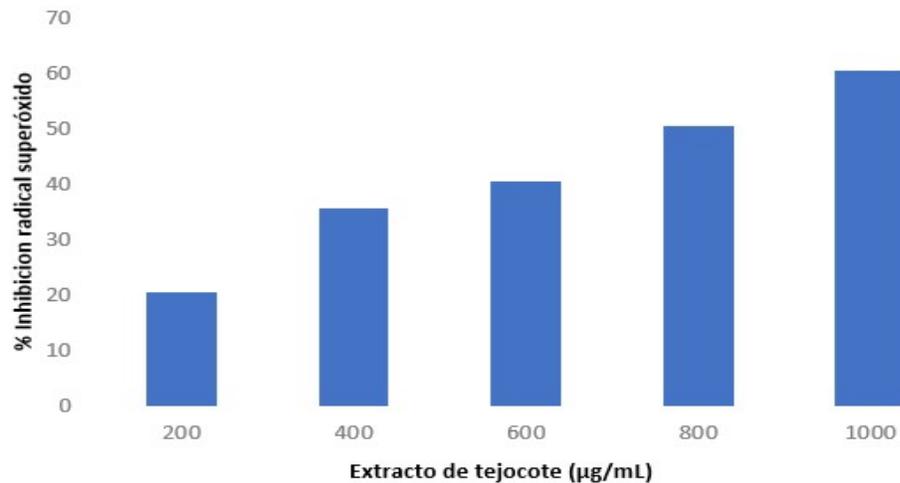


Figura 1. Efecto de diferentes concentraciones de extractos de tejocote sobre la inhibición del radical superóxido generado por el sistema xantina-xantina oxidasa. Fuente: González-Jiménez et al. (2018)

Estos resultados (Figura 1), indican el potencial que tienen los extractos de tejocote para la inhibición de los radicales superóxidos. La capacidad de inhibición del radical superóxido es importante porque además del radical hidroxilo, son las principales especies reactivas de oxígeno (ROS) que se generan continuamente en el metabolismo del cuerpo, particularmente a través de la vía de producción de energía mitocondrial. El control de la producción de ROS es fundamental para evitar el estrés oxidativo, el cual está implicando en la incidencia y progresión de diversas enfermedades como diabetes, Alzheimer, enfermedades cardiovasculares, etc. (González-Jiménez et al., 2018).

Con respecto a la capacidad inhibidora del radical DPPH, Robles-Botero et al. (2020) reportaron que la capacidad antioxidante está asociada al contenido de flavonoides, estructura y disposición de los grupos hidroxilo de dichos compuestos. Se encontraron correlaciones importantes entre la actividad antiradical (DPPH) y el contenido de fenoles totales ($r= 0.7$), flavonoides totales ($r= 0.78$), proantocianidinas ($r= 0.73$), ácido ascórbico ($r= 0.70$) y ácido clorogénico ($r= 0.83$).

En el Cuadro 4 se presenta la capacidad secuestradora del radical DPPH de extractos en etanol-agua de diferentes partes del fruto de tejocote.

Cuadro 4. Actividad antioxidante (DPPH) de extractos del fruto de tejocote

| | Cáscara | Pulpa | Semilla |
|------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| EC ₅₀ (ppm ES) | 196.6 ± 11.0 | 373.7 ± 15.8 | 150.3 ± 3.1 |

Fuente: Robles-Botero et al. (2020).

Se puede notar que los extractos de cáscara y semilla exhibieron (Cuadro 4) la mayor capacidad inhibitoria del radical DPPH respecto de la pulpa, Robles-Botero et al. (2020) indicaron que estas diferencias se explican por las características estructurales de los compuestos bioactivos; ya que los compuestos que poseen una estructura orto 3'4'-hidroxi en el anillo B (catequinas) y los compuestos que poseen grupos hidroxilo en posición meta en el anillo A (Kaempferol), exhiben una actividad antioxidante significativamente mayor que los demás compuestos que pertenecen a este grupo.

La capacidad secuestradora del radical DPPH se encuentra en función del genotipo estudiado, estado de madurez, y parte del fruto de tejocote, en este sentido, en la Figura 2 según datos reportados por García-Mateos et al. (2013) se puede notar la diferencia en la capacidad secuestradora del radical DPPH en función de distintos genotipos de tejocote; donde el genotipo 50 proveniente del Estado de México seguidos de los genotipos 63, 72 y 86 con origen en Estado de México y Chiapas respectivamente, exhibieron la mayor actividad inhibitoria del radical DPPH.

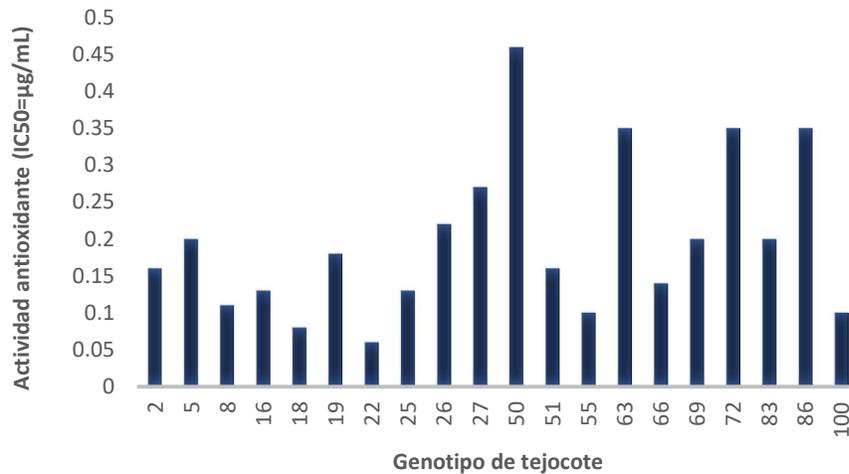


Figura 2. Actividad inhibidora del radical DPPH de diferentes genotipos de tejocote. Fuente: Elaboración propia con datos de García-Mateos et al., (2013).

2.3 El yogur y su importancia

El yogur es una rica fuente de proteínas, calcio, fósforo, riboflavina, tiamina, vitamina B12, folato, niacina, magnesio, zinc, hidratos de carbono y proteínas bioactivas de mayor biodisponibilidad (Kwon et al., 2021).

El yogur es un producto lácteo fermentado que se obtiene mediante la fermentación ácido láctica de *Lactobacillus delbrueckii* spp. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*. Debido a la disminución del pH, aumenta la solubilidad del calcio y fosfato contenido en las micelas; lo que provoca la desestabilización de estas. El yogur se forma debido a la precipitación de la caseína y la formación de cavidades continuas llenas de suero (Tiwari et al., 2021).

La gelificación de la leche en yogures se consigue mediante una lenta acidificación por bacterias ácido-lácticas. La acidificación de la leche induce cambios importantes en la organización de la proteína de la leche, resultando en la formación de una red de proteínas porosas en las que el suero queda atrapado. Dependiendo del tratamiento térmico de la leche, las proteínas del suero desnaturalizadas contribuyen al aumento en la densidad de la red de proteínas y por tanto cambian las propiedades del gel. De la misma manera el contenido de

grasa de la leche tiene un efecto importante sobre la estructura del gel; especialmente si se aplica homogeneización para reducir el tamaño del glóbulo de grasa, ya que la interfase de los glóbulos grasos homogeneizados incluye caseínas que actúan activamente en la red del gel, impactando en el incremento de la viscosidad y reducción de sinéresis en el yogur (Gilbert & Turgeon et al., 2021). Finalmente, si se añaden estabilizantes o iniciadores productores de exopolisacáridos (EPS) la red se modificará de acuerdo con las características del polímero a través de las interacciones agregativas o segregativas con los productos lácteos (Gilbert & Turgeon et al., 2021).

La velocidad con la que ocurre el proceso de fermentación del yogur depende del tipo de microorganismo empleado, tipo de leche, presencia de fibra entre otros factores, por lo cual se recurre a la determinación de parámetros cinéticos de acidificación con el fin de evaluar el proceso de fermentación en el yogur (Torres et al., 2017). La adición de algunos aditivos naturales como frutas, derivados de fuentes herbales e hidrolizados de proteínas, mejora la tasa de acidificación y reducen los tiempos de fermentación del yogur en un 25 – 75 % (Zhang et al., 2010); una disminución en los tiempos de fermentación es de importancia en la industria láctea para disminuir costos de producción (Raikos et al., 2018).

Debido a la presencia de las bacterias ácido-lácticas y a la producción de ingredientes prebióticos durante la fermentación, el yogur es reconocido como un alimento promotor de la salud (Qiu et al., 2021). El yogur como componente alimentario se ha asociado con beneficios cardiometabólicos, así como con efectos sobre la obesidad, diabetes y biomarcadores de enfermedades crónicas, incluyendo el estrés oxidativo y la inflamación (Mousavi et al., 2020). Se ha propuesto que el efecto antiinflamatorio específico de los probióticos está relacionado con la regulación a la baja de los genes proinflamatorios y la regulación al alza de los genes antiinflamatorios en el hígado e intestino; otras posibles funciones de los probióticos en la inflamación son la regulación del

microbioma, el apoyo a la barrera intestinal, la regulación de la respuesta del sistema inmunitario y la apoptosis (Mousavi et al., 2020).

2.4 Tipos de yogur

El control de la formulación secuencia o combinación de operaciones en el proceso manufactura determina el tipo de yogur que se obtendrá (Hongbo et al., 2020). El yogur puede clasificarse de acuerdo con varios criterios; uno de ellos es el tipo de cuerpo del producto:

- Yogur tipo set: Se fermenta directamente en su envase, enfriado, almacenado y posteriormente consumido directamente de dicho envase (Gilbert & Turgeon, 2021).
- Yogures concentrados: Se denominan de forma diferente según su origen (griego, skyr, labneh, etc.). La principal característica de este tipo de yogures es la textura, que es más consistente y cremosa en comparación con otros yogures. Para obtener este tipo de yogures se utilizan distintas alternativas, como la concentración de componentes, adición directa de proteínas y estabilizadores antes del proceso de fermentación (Costa et al., 2019).
- Yogur batido: Se produce sometiendo el producto fermentado a un proceso de agitación para romper la estructura del gel de forma controlada. Como resultado, se produce un yogur semisólido con propiedades reológicas y microestructurales diferentes a la del yogur tipo set (Salama et al., 2021).
- Yogur bebible: Este tipo de yogur tiene menor viscosidad y una sensación en la boca menos cremosa que otros tipos de yogures. Se define como un yogur a base de leche que se puede beber en forma líquida, debido a que durante el proceso de elaboración se somete a un proceso de homogeneización para romper la estructura del gel y obtener las propiedades antes mencionadas (Thompson et al., 2007).

La clasificación propuesta que considera el contenido de grasa es el siguiente (Thompson et al., 2007):

- Yogur graso: Mayor al 3% de materia grasa.
- Yogur bajo en grasa: Alrededor de 1.5% de materia grasa.
- Yogur magro: Menor al 0.1% de grasa.

La clasificación de los tipos de yogur establecida por la legislación nacional vigente (NOM-181-SCFI/SAGARPA-2018) es la siguiente:

- Yogur natural: Es aquel que no contiene edulcorantes, azúcares añadidos, frutas, vegetales, cereales, saborizantes o aromatizantes, y pueden contener aditivos permitidos conforme a la legislación nacional vigente.
- Yogur natural con endulzantes: Es el yogur natural que sólo se mezcla con azúcares o edulcorantes con el fin de endulzarlo, y que puede contener aditivos permitidos conforme a la legislación nacional vigente.
- Yogur saborizado: Es el yogur al que se le adiciona cualquier tipo de edulcorantes, azúcares añadidos, saborizantes o aromatizantes, y que puede contener aditivos permitidos conforme a la legislación nacional vigente.
- Yogur con fruta u otros alimentos: Es el yogur al que se le adicionan edulcorantes, azúcares, aromatizantes, saborizantes, frutas o vegetales (en forma de puré, pulpa o jugo), miel, chocolate, cacao, café, cereales, nueces, frutos secos y especias y que puede contener aditivos permitidos conforme a la legislación nacional vigente.

2.5 Producción de yogur en México

La producción de yogur en México para el año 2020 ascendió a 684, 566 toneladas; siendo el yogur el derivado lácteo que más se produce en México, con el 43.6% de producción, respecto al volumen total de producción de derivados lácteos (SIAP, 2020). En la figura 3 se presenta el porcentaje de producción de los yogures con mayor consumo en México, donde se puede observar que el yogur batido tiene un porcentaje de participación del 16% (SIAP, 2020).

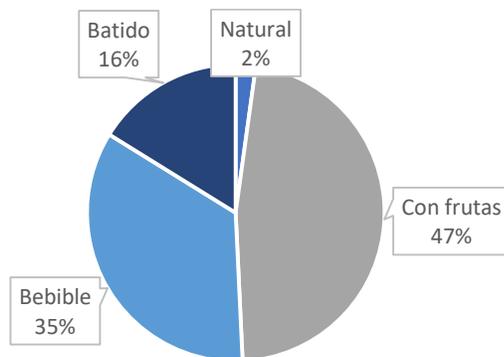


Figura 3. Producción industrial por tipo de yogur. Fuente: SIAP (2020).

2.6 Factores de calidad en el yogur

Yang et al. (2021) reportaron el uso de indicadores sensoriales, fisicoquímicos o bien, la presencia de fenómenos de desestabilización para determinar la calidad del yogur. Las características de calidad predominantes del yogur incluyen textura, sabor y aroma (Das et al., 2019):

- **Aroma:** La fermentación de la leche por las bacterias lácticas del yogur no sólo libera ácido láctico, sino también cierto número de compuestos secundarios, como ácido fórmico, ácido acético, etanol, acetona, dióxido de carbono, acetoína, diacetilo y acetaldehído. Algunos de estos compuestos son responsables del aroma del producto, entre ellos destacan el acetaldehído y el diacetilo. Para responder a la demanda del consumidor, el yogur debe contener alrededor de 25 ppm de acetaldehído (Villegas & Cervantes, 2018).
- **Sabor:** La composición y en particular el tipo de proteínas de la leche, pueden generar un impacto en la textura y propiedades del sabor del yogur (Chollet et al., 2013). La formación de sabor en el yogur es el resultado de una compleja red de procesos en los que el producto final da como resultado el desarrollo de compuestos de aroma y sabor; los procesos primarios que contribuyen al desarrollo del sabor son la glucólisis, lipólisis y proteólisis. El sabor predominante asociado con el yogur es la acidez producida por los cultivos iniciadores, donde el ácido láctico tiene baja

volatilidad y no es asociado directamente con el aroma, pero si con el sabor general del yogur; el acetaldehído, diacetilo y acetoina son metabolitos producidos por los cultivos iniciadores que determinan el perfil de sabor del yogur (Das et al., 2019).

- Textura: Uno de los atributos más importantes que determina la aceptación del yogur es la textura, la cual se relaciona con la viscosidad. Bajo condiciones naturales, el yogur tiene una textura débil que conduce a la sinéresis (Pérez et al., 2021). La textura y las propiedades reológicas pueden verse afectadas por factores como la formulación, procesamiento (tratamiento térmico a la base láctea, homogeneización, etc.), actividad del cultivo, temperaturas de post-fermentación, entre otras (Das et al., 2019).
- Separación del suero: Suele producirse debido al debilitamiento de la red del gel, que resulta en la contracción de esta, generando que el gel pierda su capacidad de retener la fase de suero y por tanto se produzca la expulsión de este (Tiwari et al., 2021).

A menudo, la separación del suero se describe como sinéresis, sin embargo, se trata de dos términos diferentes. El desprendimiento del suero es el agua que aparece en la superficie del yogur y puede evaluarse mediante el método de sifón; mientras que la sinéresis puede calcularse tomando 5 ó 10 gramos de yogur para someterlo a centrifugación y posteriormente cuantificar la cantidad de suero separada (Tiwari et al., 2021).

Los parámetros fisicoquímicos como estándares de calidad establecidos por legislación mexicana vigente (NOM- 181-SCFI-2018) son:

- Contenido de proteína: La caseína debe constituir al menos el 80% de la proteína láctea en el producto final. Para un yogur batido, el contenido mínimo debe ser de 2.1 % (p/p).
- Contenido de grasa butírica: El contenido máximo establecido es de 7% (p/p).

- Acidez titulable: El contenido mínimo expresado como porcentaje de ácido láctico debe ser 0.5%.

Por otro lado, el recuento de probióticos debe superar el valor mínimo de 10^6 UFC/mL entre las cepas de *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus lactis* subespecie *bulgaricus* viables para conferir beneficios a la salud. Por lo cual, la industria láctea debe mantener la viabilidad de las bacterias probióticas del yogur a lo largo del almacenamiento hasta su consumo (Chen et al., 2018).

2.7 Mecanismos de estabilización del yogur

Guo et al. (2021) reportaron los siguientes mecanismos de estabilización en el yogur:

- Repulsión electrostática: Los polisacáridos aniónicos (pectina, carboximetilcelulosa, etc.) están cargados negativamente en el rango de pH del yogur, lo que les permite interactuar con las partículas de caseína cargadas positivamente. La estabilización se da por la adsorción efectiva y la cobertura total de las moléculas de polisacáridos sobre las partículas de caseína en condiciones ácidas. La adsorción electrostática de los polisacáridos aniónicos introduce al menos una capa de adsorción cargada en la superficie de las micelas de caseína, impidiendo la agregación y la sedimentación de las partículas de caseína mediante repulsión electrostática.
- Repulsión estérica: Cuando los polisacáridos aniónicos se adsorben electrostáticamente en las partículas de caseína, además de la repulsión electrostática, las porciones no adsorbidas de los polisacáridos pueden sobresalir en el medio formando bucles, contribuyendo así a la estabilidad.
- Aumento de la viscosidad: Una mayor viscosidad es beneficiosa para la estabilidad física del yogur. La presencia de polisacáridos no adsorbidos contribuye a la estabilidad al aumentar su viscosidad. Este efecto es más notable en yogures estabilizados con carboximetilcelulosa.

- **Formación de redes:** La formación de una red de geles débiles es posible en el yogur, lo cual contribuye a su estabilidad a largo plazo. Este tipo de redes se han identificado en yogures estabilizados con pectina de alto metoxilo; donde se ha considerado que la red del gel está formada por micelas de caseína recubiertas de pectina. Priyanka et al. (2022) reportaron este mecanismo de estabilización en yogures estabilizados con algunos polisacáridos aniónicos.

2.8 Estabilizantes utilizados en yogur

El objetivo principal de añadir estabilizantes al yogur es mejorar las características deseables, por ejemplo, la viscosidad, apariencia, textura y sensación en la boca (Lal et al., 2006). Yousefi & Safari (2019) indicaron que la adición de algunos estabilizantes es un método práctico para aumentar la viscosidad y disminuir la sinéresis. Los hidrocoloides actúan junto con las micelas de caseína para la formación de un gel reforzado que mantenga la fase acuosa.

Un buen estabilizante de yogur debe poseer características como: no impartir ningún sabor, ser eficaz a valores de pH bajos y dispersarse fácilmente a temperaturas normales en una mezcla de yogur. Además, los estabilizantes deben ser fácilmente solubles, tener una buena capacidad de retención de agua y ayudar a formar emulsiones estables (Gawai et al., 2017).

Entre los estabilizantes utilizados para la elaboración del yogur, podemos encontrar a las gomas naturales, extractos de algas (Carragenina y alginato) y gelatinas. Estos ingredientes tienen la capacidad de formar redes de gel y por lo tanto, su incorporación permite la producción de yogures con textura firme y con resistencia a la sinéresis (Lal et al., 2006). En el Cuadro 5 se presenta una clasificación de los estabilizantes utilizados en el yogur por su origen (Lal et al., 2006).

Cuadro 5. Clasificación de estabilizantes del yogur según su origen

| Origen | Estabilizante |
|----------------------|--|
| Semillas de plantas | Goma de algarrobo, Guar, Garrofin |
| Algas | Carragenina, Alginatos, Agar |
| Frutas | Pectina |
| Exudados de plantas | Goma arábica, Tragacanto, Karaya |
| Celulosa y derivados | Carboximetil celulosa de sodio (CMC) |
| Almidón | Almidones modificados o nativos |
| Biopolímeros | Xantana, Gelana, Wellana |
| Origen Animal | Gelatina, Proteínas de leche, Colágeno |

Fuente: Lal et al. (2006)

Sin embargo, los polisacáridos de pectina, carragenina y CMC son los hidrocoloides más utilizados en la estabilización de yogur (Yousefi & Safari 2019).

- Carragenina: La carragenina no añade ningún valor nutricional, ni sabor a al yogur; la industria láctea lo utiliza en varios tipos de yogur, particularmente en yogures bebibles contenidos en empaques exprimibles para niños. La carragenina es estable al calor y favorece la estabilización del gel del yogur mediante la formación de complejos con el Ca^{2+} y la caseína. Sin embargo, se tienen reportados efectos inflamatorios de la carragenina contrarrestando los efectos benéficos del yogur (Gawai et al., 2017).
- Pectina: La pectina de bajo metoxilo (LMP) es el tipo preferido de polisacárido empleado para la estabilización de yogur tipo set, mientras que la pectina de alto metoxilo garantiza la estabilidad y controla la viscosidad en bebidas lácteas acidificadas. LMP en cantidades de 0.07-0.15 % p/p modifica la consistencia del yogur, haciéndolo más rígido y

evitando la sinéresis que podría surgir durante la manipulación, el transporte y la distribución. Por otro lado, HMP estabiliza las proteínas de la leche para obtener productos sin sedimentación ni separación del suero (Gawai et al., 2017). El mecanismo de estabilización de yogur por la pectina se da por la adsorción en las caseínas al inicio del proceso de acidificación, afectando la conformación de las micelas de caseína en un rango de pH de 5.0 a 5.8. Al disminuir el pH el potencial zeta se vuelve más negativo, mejorando la estabilidad debido a fuertes repulsiones estéricas generadas entre las cadenas de pectinas (Yousefi & Jafari, 2019).

- Gomas: Se utilizan como estabilizantes por su efecto de disminución de sinéresis y efectos de gelificación.

Algunas gomas utilizadas para la estabilización de yogur son: goma de algarrobo que es un polisacárido neutro; se utiliza en combinación con otros estabilizantes en yogures congelados, donde su función principal es la estabilización y la unión del agua (Gawai et al., 2017).

De igual forma, la goma guar se utiliza en sistemas estabilizadores de yogur, como formador de viscosidad y agente aglutinante de la humedad; esta goma imparte cuerpo, textura y resistencia al choque térmico.

Otra goma ampliamente utilizada en la estabilización de yogur es la carboximetilcelulosa, cuya función principal es la de espesante, y agente aglutinante de humedad; se utiliza en yogures congelados para ligar el agua y evitar la formación de cristales de hielo que puedan desarrollarse debido a las fluctuaciones de temperatura (Gawai et al., 2017).

- Almidón nativo o modificado: Utilizado en yogures batidos, proporcionando resistencia al cizallamiento mecánico. El almidón modificado de maíz es un generador de viscosidad y estabilizador que puede tolerar condiciones de pH bajo, altas temperaturas y cizallamiento (Gawai et al., 2017).
- Gelatina: La adición de gelatina a la leche durante el proceso de manufactura del yogur modifica la microestructura del producto, mediante formación de láminas o superficies planas que interactúan con la matriz de

caseína; la gelatina crea una estructura de doble red continua y bastante homogénea sin extremos libres. Sin embargo, si se añade por encima de 0.35 % p/p puede proporcionar al yogur un aspecto grumoso al agitarlo (Gawai et al., 2017).

2.9 Microestructura en el yogur

El análisis de microestructura se utiliza para comprender mejor los mecanismos de formación de gel y explicar los resultados de los análisis fisicoquímicos y reológicos (Wang et al., 2019).

La microestructura del yogur batido es el resultado de una desestructuración controlada del gel que ocurre durante el procesamiento (agitación, bombeo, suavizado). Cuando se aplican tratamientos de cizallamiento, algunas interacciones intermoleculares responsables de la estructura pueden romperse generando una reorganización del gel. Ramírez-Santiago et al. (2010) reportaron la microestructura del yogur batido como una red tridimensional de agregados de micelas de caseína, separados por espacios vacíos ocupados por el lactosuero. Gilbert & Turgeon et al. (2021) evidenciaron un modelo de escala fractal para estudiar el reordenamiento de un gel de yogur batido, en este modelo se define una organización microestructural en cuatro escalas de longitud : subpartícula ($< 0.2 \mu\text{m}$), partícula ($0.2\text{-}1 \mu\text{m}$), racimo fractal ($1\text{-}40 \mu\text{m}$) y nivel macroscópico (gel completo) donde, la rigidez de la red está determinada en gran medida por tres factores: formulación, pretratamiento (homogeneización, tratamiento térmico, etc.) y condiciones de fermentación (temperatura, cultivos, tasa de inoculación y duración).

Durante el proceso de manufactura del yogur batido, la resistencia de cada uno de los niveles de estructura (escala fractal) determinará la microestructura del producto final. En la figura 4 se presenta un modelo de la microestructura del yogur batido donde, durante el proceso de cizallamiento del gel, los agregados más débiles pueden romperse primero, lo que lleva a la formación de un gel con fragmentos que definirán los futuros microgeles, posteriormente durante el tiempo de almacenamiento, el gel será expuesto a fricción, que inducirá una

fragmentación y reducción de su tamaño hasta su consumo (Gilbert & Turgeon et al., 2021).



Figura 4. Representación de microestructura del yogur batido durante su proceso de manufactura. Fuente: Gilbert & Turgeon et al. (2021).

En la figura 5 se presenta un modelo de los microgeles, los cuales son estructuras densas de proteína que se observan posterior al proceso de agitación; se ha informado que el tamaño de estos puede variar entre unos pocos μm ($<0.2 \mu\text{m}$) hasta $1 - 40 \mu\text{m}$; el tamaño, forma, grado de compactación y heterogeneidad depende de dos factores principales: la rigidez de la red del gel antes del cizallamiento (fuerza de los diferentes enlaces que mantienen su estructura en conjunto) y la intensidad y secuencia de operación durante el proceso de cizallamiento después de la fermentación. Durante el almacenamiento y hasta el consumo, los microgeles son capaces de agregarse nuevamente formando nuevas estructuras, explicando así el fenómeno de restructuración y los cambios en el grado de sinéresis (Gilbert & Turgeon et al., 2021).

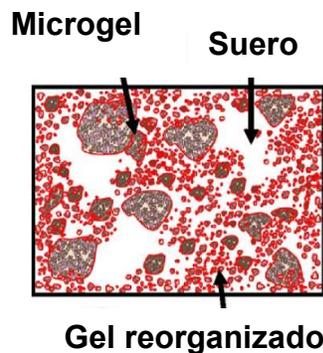


Figura 5. Representación de microestructura de los microgeles. Fuente: Gilbert & Turgeon et al. (2021).

El análisis de la microestructura del yogur batido resulta de interés porque permite dimensionar el área total de los microgeles, así como el análisis de su estructura. Existe una gran variedad de técnicas disponibles que proporcionan un acceso a diferentes escalas de observación. Algunas técnicas empleadas en el análisis de microestructura son: microscopía laser, confocal, microscopía óptica y microscopía digital donde cada técnica implica un método específico de preparación de muestra (Gilbert et al., 2020).

2.10 Uso de pastas de frutas en yogur

La manufactura de yogur con adición de frutas, principalmente en forma de pulpa o pasta se ha extendido, debido a que esta provee mayor valor nutricional y por tanto un mejor efecto en la salud de los consumidores (Senadeera et al., 2018). Lo anterior, derivado de la preocupación de los consumidores por el uso de aditivos en el yogur; que ha generado una tendencia en la búsqueda de nuevos ingredientes funcionales, que además de igualar las características sensoriales otorguen un impacto positivo en la salud del consumidor (Gilbert et al., 2020).

Pereira et al. (2021) emplearon pulpa de mango en formulaciones de yogur enriquecidos con fructooligosacáridos y edulcorantes naturales. Los resultados desde el punto de vista estructural indican que las proteínas contenidas en la pulpa de mango modificaron el nivel de estructuración de la red, generando una mayor reticulación de esta, lo que generó una estructura más densa y rígida; que impactó de forma positiva en la aceptación sensorial de los yogures enriquecidos con pulpa de mango debido a la textura y sabor dulce.

Senadeera et al. (2018) incorporando pulpas de diferentes especies de *Annona* en formulaciones de yogures probióticos, evidenciaron que la composición química de los yogures exhibió mayores concentraciones de ácido láctico, compuestos fenólicos y una mayor disponibilidad de carbohidratos, los cuales favorecieron la actividad metabólica de las bacterias ácido-lácticas. En cuanto a

la estructuración, se generó una incompatibilidad termodinámica entre los polisacáridos de la pasta de *Annona* y las proteínas de la leche generando un incremento en el porcentaje de sinéresis, condición que impacta de forma negativa las propiedades sensoriales, particularmente el atributo textural.

Espirito Santo et al. (2010) reportaron que la adición de Acai en formulaciones de yogur generó un efecto sinérgico de la pulpa y de las bacterias ácido-lácticas; disminuyendo los tiempos totales de fermentación, debido al contenido de carbohidratos en la pulpa, así como de minerales como el manganeso. Se evidenció también un prebiótico, al obtener mayores recuentos de *Lactobacillus acidophilus* L10 y *Bifidobacterium longum* B105. El perfil de lípidos indicó un mayor contenido de ácidos grasos poliinsaturados como ácidos linoleicos y linolénicos en los yogures enriquecidos.

El desarrollo de productos funcionales a partir del fruto de tejocote resulta de interés (Arenales-Sierra et al., 2014); debido a que la composición química del fruto otorga la posibilidad de emplearla como fuente de carotenos y compuestos fenólicos, los cuales confieren actividad antioxidante a los alimentos adicionados (Nieto et al., 2009). Por otra parte, la pectina presente en el tejocote ofrece propiedades de gelificación que pueden ser aprovechadas en formulaciones de yogur al mejorar su estabilidad y propiedades mecánico-sensoriales (Gutiérrez-Carrillo et al., 2015).

2.11 Perspectivas en la producción del yogur

Actualmente, los consumidores se han preocupado por mantener una dieta saludable. Este comportamiento ha afectado a las industrias de elaboración de alimentos y ha generado la búsqueda de productos con beneficios adicionales, como un alto contenido en proteínas, una textura modificada y un bajo contenido en grasas (Cándido de Souza et al., 2021). Estudios recientes han indicado que productos de origen natural como las frutas y vegetales contienen compuestos con alto valor biológico (antioxidantes, fibra dietética, proteínas, colorantes naturales, etc.), los cuales pueden ser extraídos, purificados y concentrados para

ser utilizados como ingredientes funcionales en la industria alimentaria (Cándido de Souza et al., 2021).

El crecimiento del mercado de lácteos funcionales ha aumentado, debido a la alta demanda de consumidores preocupados por su salud. La industria láctea se enfrenta a grandes desafíos con el fin de satisfacer la demanda de estos consumidores y permanecer en un mercado competitivo; ante este panorama la industria necesita desarrollar productos innovadores con propiedades funcionales útiles, donde el yogur es considerado como una opción de alimentos saludables más populares y cuyo mercado mundial se proyecta para 2024 en 106.6 mil millones de dólares, lo que confirma la popularidad de este producto entre los consumidores (Pereira et al., 2021).

Entre las tendencias e innovaciones en la industria del yogur, existe un aumento en los productos concentrados con tendencia a reducir e incluso eliminar el uso de aditivos artificiales y agentes conservantes; de esta manera, la adición de pulpa de frutas para agregar sabor u otras características (mecánicas y estructurales) puede considerarse como una alternativa. Sin embargo, la adición de estas representa un desafío tecnológico por el posible incremento en el grado de sinéresis que puede presentar el yogur (Pereira et al., 2021).

2.12 Literatura citada

- Arenales-Sierra, I. M., Aguirre-Mandujano, E., & Cuevas-Bernardino, J. (2014). EXTRACTION AND EVALUATION OF PECTIN HAWTHORN (*Crataegus* spp). *Revista Tecnológica Agrobioalimentaria Vol, 1*(1), 34.
- Begum, R., Aziz, M. G., Yusof, Y. A., Saifullah, M., & Uddin, M. B. (2021). Evaluation of gelation properties of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) waste pectin. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 100160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100160>
- Cervantes-Paz, B., Ornelas-Paz, J. d. J., Gardea-Béjar, A. A., Yahia, E. M., Rios-Velasco, C., Zamudio-Flores, P. B., . . . Ibarra-Junquera, V. (2018). Compuestos fenólicos de tejocote (*Crataegus* spp.): su actividad biológica asociada a la protección de la salud humana. *Revista fitotecnia mexicana, 41*(3), 339-349.
- Chen, S., Chen, L., Chen, L., Ren, X., Ge, H., Li, B., . . . Li, Y. (2018). Potential probiotic characterization of *Lactobacillus reuteri* from traditional Chinese highland barley wine and application for room-temperature-storage drinkable yogurt. *Journal of Dairy Science, 101*(7), 5780-5788. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2017-14139>
- Chollet, M., Gille, D., Schmid, A., Walther, B., & Piccinali, P. (2013). Acceptance of sugar reduction in flavored yogurt. *Journal of Dairy Science, 96*(9), 5501-5511. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2013-6610>
- Costa, M. F., Pimentel, T. C., Guimaraes, J. T., Balthazar, C. F., Rocha, R. S., Cavalcanti, R. N., . . . Cruz, A. G. (2019). Impact of prebiotics on the rheological characteristics and volatile compounds of Greek yogurt. *LWT, 105*, 371-376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.007>
- Cuevas-Bernardino, J. C., Lobato-Calleros, C., Román-Guerrero, A., Alvarez-Ramirez, J., & Vernon-Carter, E. J. (2016). Physicochemical characterisation of hawthorn pectins and their performing in stabilising oil-in-water emulsions. *Reactive and Functional Polymers, 103*, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.03.024>
- Cândido de Souza, W. F., Souza do Amaral, C. R., & Lima da Silva Bernardino, P. D. (2021). The addition of skim milk powder and dairy cream influences the physicochemical properties and the sensory acceptance of concentrated Greek-style yogurt. *International Journal of Gastronomy and Food Science, 24*, 100349. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100349>

- Das, K., Choudhary, R., & Thompson-Witrick, K. A. (2019). Effects of new technology on the current manufacturing process of yogurt-to increase the overall marketability of yogurt. *LWT*, *108*, 69-80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.058>
- Espírito Santo, A. P. d., Silva, R. C., Soares, F. A. S. M., Anjos, D., Gioielli, L. A., & Oliveira, M. N. (2010). Açai pulp addition improves fatty acid profile and probiotic viability in yoghurt. *International Dairy Journal*, *20*(6), 415-422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2010.01.002>
- Food and Agriculture Organization (FAO) (2015). Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. fao.org. Recuperado de <http://www.faostat.fao.org/agriculture>
- García-Mateos, R., Ibarra-Estrada, E., & Nieto-Angel, R. (2013). Antioxidant compounds in hawthorn fruits (*Crataegus* spp.) of Mexico. *Revista mexicana de biodiversidad*, *84*, 1298-1304.
- Gawai, K. M., Mudgal, S. P., & Prajapati, J. B. (2017). Chapter 3 - Stabilizers, Colorants, and Exopolysaccharides in Yogurt. In N. P. Shah (Ed.), *Yogurt in Health and Disease Prevention* (pp. 49-68). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805134-4.00003-1>
- Gilbert, A., Rioux, L.-E., St-Gelais, D., & Turgeon, S. (2020). Studying stirred yogurt microstructure using optical microscopy: How smoothing temperature and storage time affect microgel size related to syneresis. *Journal of Dairy Science*, *103*. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16787>
- Gilbert, A., & Turgeon, S. L. (2021). Studying stirred yogurt microstructure and its correlation to physical properties: A review. *Food Hydrocolloids*, *121*, 106970. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106970>
- González Jiménez, F. E. (2018). Obtención y caracterización de fracciones polifenólicas de la pulpa y pectina de tejocote (*Crataegus pubescens*) para su aprovechamiento en el desarrollo de un recubrimiento nutracéutico.
- Guo, Y., Wei, Y., Cai, Z., Hou, B., & Zhang, H. (2021). Stability of acidified milk drinks induced by various polysaccharide stabilizers: A review. *Food Hydrocolloids*, *118*, 106814. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106814>
- Hernández, A. V., Veloz, C. S., Ángel, R. N., Guzmán, M. E. R., & Reyes, D. S. (2015). COMPORTAMIENTO PRE Y POSTCOSECHA DE FRUTOS DE

DOS ACCESIONES DE TEJOCOTE (*Crataegus* spp.). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(2), 240-248.

- Kwon, S.-H., Kothari, D., Jung, H.-I., Lim, J.-M., Kim, W.-L., Kwon, H.-C., . . . Kim, S.-K. (2021). Noni juice-fortified yogurt mitigates dextran sodium sulfate-induced colitis in mice through the modulation of inflammatory cytokines. *Journal of Functional Foods*, 86, 104652. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104652>
- Lal, S. N. D., O'Connor, C. J., & Eyres, L. (2006). Application of emulsifiers/stabilizers in dairy products of high rheology. *Advances in Colloid and Interface Science*, 123-126, 433-437. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.05.009>
- Li, H., Liu, T., Yang, J., Wang, R., Li, Y., Feng, Y., . . . Yu, J. (2021). Effect of a microencapsulated synbiotic product on microbiology, microstructure, textural and rheological properties of stirred yogurt. *LWT*, 152, 112302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112302>
- Linares-García, J. A., Ramos-Ramírez, E. G., & Salazar-Montoya, J. A. (2015). Viscoelastic properties and textural characterisation of high methoxyl pectin of hawthorn (*Crataegus pubescens*) in a gelling system. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(6), 1484-1493. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12792>
- Lozano-Grande, M. A., Valle-Guadarrama, S., Aguirre-Mandujano, E., Lobato-Calleros, C. S. O., & Huelitl-Palacios, F. (2016). FILMS BASED ON HAWTHORN (*Crataegus* spp.) FRUIT PECTIN AND CANDELILLA WAX EMULSIONS: CHARACTERIZATION AND APPLICATION ON *Pleurotus ostreatus* [Article]. *Agrociencia*, 50(7), 849-866.
- Mary, P. R., Mutturi, S., & Kapoor, M. (2022). Non-enzymatically hydrolyzed guar gum and orange peel fibre together stabilize the low-fat, set-type yogurt: A techno-functional study. *Food Hydrocolloids*, 122, 107100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107100>
- Mousavi, S. N., Saboori, S., & Asbaghi, O. (2020). Effect of daily probiotic yogurt consumption on inflammation: A systematic review and meta-analysis of randomized Controlled Clinical trials. *Obesity Medicine*, 18, 100221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.obmed.2020.100221>
- Nieto-Ángel, R., Pérez-Ortega, S. A., Núñez-Colín, C. A., Martínez-Solís, J., & González-Andrés, F. (2009). Seed and endocarp traits as markers of the biodiversity of regional sources of germplasm of tejocote (*Crataegus* spp.) from Central and Southern Mexico. *Scientia Horticulturae*, 121(2), 166-170.

- Norma Oficial Mexicana NOM-181-SCFI/SAGARPA-2018, Yogurt-Denominación, especificaciones fisicoquímicas y microbiológicas , información comercial y métodos de prueba. Recuperado de: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5549317&fecha=31/01/2019
- Ornelas-Lim, C., Luna-Vázquez, F. J., Rojas-Molina, A., & Ibarra-Alvarado, C. (2021). Development of a quantified herbal extract of hawthorn *Crataegus mexicana* leaves with vasodilator effect. *Saudi Pharmaceutical Journal*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isps.2021.10.002>
- Pereira, C. T. M., Pereira, D. M., de Medeiros, A. C., Hiramatsu, E. Y., Ventura, M. B., & Bolini, H. M. A. (2021). Skyr yogurt with mango pulp, fructooligosaccharide and natural sweeteners: Physical aspects and drivers of liking. *LWT*, *150*, 112054. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112054>
- Pérez, J., Arteaga, M., Andrade, R., Durango, A., & Salcedo, J. (2021). Effect of yam (*Dioscorea* spp.) starch on the physicochemical, rheological, and sensory properties of yogurt. *Heliyon*, *7*(1), e05987.
- Qiu, L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Chang, L. (2021). Effect of edible rose (*Rosa rugosa* cv. Plena) flower extract addition on the physicochemical, rheological, functional and sensory properties of set-type yogurt. *Food Bioscience*, *43*, 101249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101249>
- Raikos, V., Grant, S., Hayes, H., & Ranawana, V. (2018). Use of β -glucan from spent brewer's yeast as a thickener in skimmed yogurt: Physicochemical, textural, and structural properties related to sensory perception. *Journal of Dairy Science*, *101*. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14261>
- Ramirez-Santiago, C., Ramos-Solis, L., Lobato-Calleros, C., Peña-Valdivia, C., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramírez, J. (2010). Enrichment of stirred yogurt with soluble dietary fiber from *Pachyrhizus erosus* L. Urban: Effect on syneresis, microstructure and rheological properties. *Journal of Food Engineering*, *101*(3), 229-235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.023>
- Robles-Botero, M. V., Ronquillo-de Jesús, E., Quiroz-Reyes, C. N., & Aguilar-Méndez, M. A. (2020). Caracterización e identificación de compuestos bioactivos con actividad antioxidante de la cáscara, pulpa y semilla del fruto de tejocote (*Crataegus mexicana*). *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, *23*.
- Rodriguez-Jimenez, J. R., Amaya-Guerra, C. A., Baez-Gonzalez, J. G., Aguilera-Gonzalez, C., Urias-Orona, V., & Nino-Medina, G. (2018). Physicochemical, Functional, and Nutraceutical Properties of Eggplant

Flours Obtained by Different Drying Methods [Article]. *Molecules*, 23(12), 13, Article 3210. <https://doi.org/10.3390/molecules23123210>

Salama, H. H., El-Sayed, H. S., Kholif, A. M. M., & Edris, A. E. (2021). Essential oils nanoemulsion for the flavoring of functional stirred yogurt: Manufacturing, physicochemical, microbiological, and sensorial investigation. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.10.001>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)(2019). Avance de siembras y cosechas, resumen por estado. Recuperado de http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto

Senadeera, S. S., Prasanna, P. H. P., Jayawardana, N. W. I. A., Gunasekara, D. C. S., Senadeera, P., & Chandrasekara, A. (2018). Antioxidant, physicochemical, microbiological, and sensory properties of probiotic yoghurt incorporated with various *Annona* species pulp. *Heliyon*, 4(11), e00955. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00955>

Thompson, J. L., Lopetcharat, K., & Drake, M. A. (2007). Preferences for Commercial Strawberry Drinkable Yogurts Among African American, Caucasian, and Hispanic Consumers in the United States. *Journal of Dairy Science*, 90(11), 4974-4987. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2007-0313>

Tiwari, S., Kavitake, D., Devi, P. B., & Halady Shetty, P. (2021). Bacterial exopolysaccharides for improvement of technological, functional and rheological properties of yoghurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 1585-1595. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.140>

Torres, R. D., Ramírez, C. L., Anzules, J. C., Monzón, A. H., & Borbor, R. S. (2017). Viabilidad de *Lactobacillus paracasei* en co-cultivo con otras bacterias lácticas en leche descremada fermentada de cabra. *Cumbres*, 3(1), 77-83.

Villegas, A., & Cervantes, F. (2018). *Fundamentos de tecnología de productos lácteos fermentados* (E. d. C. d. Postgraduados, Ed. Primera edición ed.).

Wang, X., Kristo, E., & LaPointe, G. (2019). The effect of apple pomace on the texture, rheology and microstructure of set type yogurt. In (Vol. 91, pp. 83-91): Elsevier Ltd.

- Wen, L., Guo, X., Liu, R. H., You, L., Abbasi, A. M., & Fu, X. (2015). Phenolic contents and cellular antioxidant activity of Chinese hawthorn "Crataegus pinnatifida". *Food chemistry*, 186, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.017>
- Witschinski, F., Demartini, D., Kilian, J., Dallago, R. M., Rosa, C. D., Cansian, R. L., . . . Steffens, J. (2018). Development and characterization of light yoghurt elaborated with Bifidobacterium animalis subsp. Lactis Bb-12 and fructooligosaccharides/Desenvolvimento e caracterizacao de iogurte light elaborado com Bifidobacterium animalis subsp. Lactis Bb-12 e fruto-oligosacarideos. In (Vol. 48): Universidade Federal de Santa Maria.
- Wusigale, Liang, L., & Luo, Y. (2020). Casein and pectin: Structures, interactions, and applications. In (Vol. 97, pp. 391-403): Elsevier Ltd.
- Yousefi, M., & Jafari, S. M. (2019). Recent advances in application of different hydrocolloids in dairy products to improve their techno-functional properties [Review]. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 468-483. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.015>
- Zhang, Q., Zhao, M., Qu, D., Zhao, H., & Zhao, Q. (2010). Effect of papain-hydrolysed casein peptides on the fermentation kinetics, microbiological survival and physicochemical properties of yoghurt [<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02411.x>]. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(11), 2379-2386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02411.x>

3. INFLUENCIA DE LA PASTA DE TEJOCOTE SOBRE LA FUNCIONALIDAD, MICROESTRUCTURA Y FACTORES DE CALIDAD DEL YOGUR

3.1 RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue determinar las propiedades fisicoquímicas, reológicas, microestructurales, actividad antioxidante, atributos sensoriales y sinéresis de yogures batidos adicionados con 0 (Y control), 0.1 (Y0.1), 0.3 (Y0.3) y 0.5 % p/p (Y0.5) de pasta de tejocote (PT). La cinética de acidificación fue determinada durante la elaboración de los yogures; los cuales se almacenaron a 4°C durante 21 días. La adición de pasta disminuyó el tiempo de fermentación de 8 ± 0.1 h (Y) a 5.8 ± 0.1 h (Y0.5) y causó incrementos en el porcentaje de ácido láctico hasta en 17 % (Y0.5). El porcentaje de sinéresis de los yogures adicionados con PT disminuyó 18 % y exhibieron valores mayores de G' (módulo de almacenamiento) y G'' (módulo de pérdida) respecto de Y. El comportamiento de flujo de los yogures fue descrito por el modelo de Ellis, donde la viscosidad a bajas tasas de corte y la constante de tiempo asociada al tiempo de relajación de los polímeros en solución, mostraron valores más altos conforme se aumentó la concentración de PT. Las micrografías ópticas mostraron redes proteínicas más cerradas, con menor índice de heterogeneidad para Y0.1, Y0.3 y Y0.5 (17.6 ± 1.7 , 18.4 ± 2.4 y 24 ± 2.4) respecto de Y (28.4 ± 3). El porcentaje de inhibición del radical DPPH se incrementó al aumentar la concentración de PT; así, el mayor porcentaje de inhibición fue 53 ± 1.5 % (Y0.5) y el menor 39.57 ± 0.62 % (Y). Y0.1 y Y0.3 obtuvieron una aceptabilidad global de 3.92 ± 0.79 y 4.12 ± 0.72 en una escala de 5 puntos. Los resultados mostraron el potencial uso de PT como ingrediente funcional en yogur.

Palabras clave: pasta de tejocote, yogur batido, sinéresis, reología, actividad antioxidante

INFLUENCE OF TEJOCOTE PASTE ON FUNCTIONALITY, MICROSTRUCTURE AND QUALITY FACTORS OF YOGURT

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the physicochemical, rheological and microstructural properties, antioxidant activity, sensory attributes and syneresis of stirred yogurts added with 0 (Y control), 0.1 (Y0.1), 0.3 (Y0.3) and 0.5 (Y0.5) % w/w of tejocote paste (TP). The acidification kinetics was determined during the preparation of the yogurts, which were stored at 4°C for 21 days. The addition of paste decreased the fermentation time from 8 ± 0.1 h (Y) to 5.8 ± 0.1 h (Y0.5) and caused increases in the percentage of lactic acid by up to 17% (Y0.5). The syneresis percentage of yogurts added with TP decreased by 18% and exhibited higher values of G' (storage module) and G'' (loss module) than that of the Y. Flow behavior of yogurts was described by the Ellis model, where low shear limiting viscosity and time constant associated to the relaxation time of polymers in solution exhibited higher values as the concentration of TP was increased. Optical micrographs showed more compact protein networks with lower heterogeneity index for Y0.1, Y0.3 and Y0.5 (17.6 ± 1.7 , 18.4 ± 2.4 and 24 ± 2.4) in comparison to the Y (28.4 ± 3). The percentage of inhibition of the DPPH radical increased with the increment of TP concentration; thus, the highest percentage inhibition was 53 ± 1.5 % (Y0.5) and the lowest 39.57 ± 0.62 % (Y). Y0.1 and Y0.3 obtained an overall acceptability of 3.92 ± 0.79 and 4.12 ± 0.72 on a 5-point scale. The results showed the potential use of TP as a functional ingredient in yogurt.

Keywords: tejocote paste, stirred yoghurt, syneresis, rheology, antioxidant activity

3.2 INTRODUCCIÓN

El yogur es un producto lácteo fermentado que se obtiene mediante una fermentación de un cultivo iniciador específico en el que, debido a la disminución del pH, aumenta la solubilidad del calcio y el fosfato contenidos en las micelas, lo que provoca la desestabilización de estas. El yogur se forma debido a la precipitación de la caseína y la formación de cavidades continuas llenas de suero (Tiwari et al., 2021).

Las características nutricionales del yogur y sus efectos sobre la salud están ganando popularidad en todo el mundo debido a sus propiedades nutricionales y sensoriales. Recientemente se ha reportado, que el yogur tiene un valor de nutrientes particularmente alto, propiedades antimicrobianas, propiedades anti carcinogénicas y propiedades para combatir el nivel de colesterol en la sangre (Cakmakci et al., 2014). Según investigaciones recientes, el uso de diversos ingredientes funcionales a base de frutos o subproductos de estos tienen una influencia significativa sobre la calidad del yogur (Cho et al., 2020).

El género *Crataegus* pertenece a la familia de las rosáceas; es un árbol perenne ampliamente extendido en el hemisferio norte, distribuido principalmente en Asia, Europa y América del Norte (Nieto et al., 2009). Se le considera un cultivo con, uso limitado principalmente a la elaboración de licores, jaleas y mermeladas debido al alto contenido de pectina, con aplicaciones agroindustriales limitadas (González-Jiménez et al., 2018); sin embargo, este fruto tiene un aporte importante de fenoles totales, flavonoides, proantocianidinas, ácido ascórbico, ácido clorogénico y pectina (Robles-Botero et al., 2020). La caseína y la pectina a menudo se estudian juntas para mejorar las propiedades fisicoquímicas a fin de complementar la funcionalidad del otro y dar como resultado aplicaciones novedosas en la industria alimentaria (Wusigale et al., 2020). Se ha demostrado que la pectina presente en la pasta puede emplearse para mejorar la estabilidad

y textura de bebidas lácteas acidificadas, ya que en bebidas como el yogur debido al bajo pH el producto resultante puede sufrir sedimentación (Wusigale et al., 2020).

En este sentido, resulta de interés la obtención de una pasta de tejocote (pulpa y cáscara) y evaluar el efecto de la adición de la pasta de tejocote sobre la cinética de fermentación, propiedades fisicoquímicas, mecánicas, microestructurales, antioxidantes y sensoriales del yogur batido.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

El diagrama de bloques que se siguió para el desarrollo de esta investigación se presenta en la Figura 6

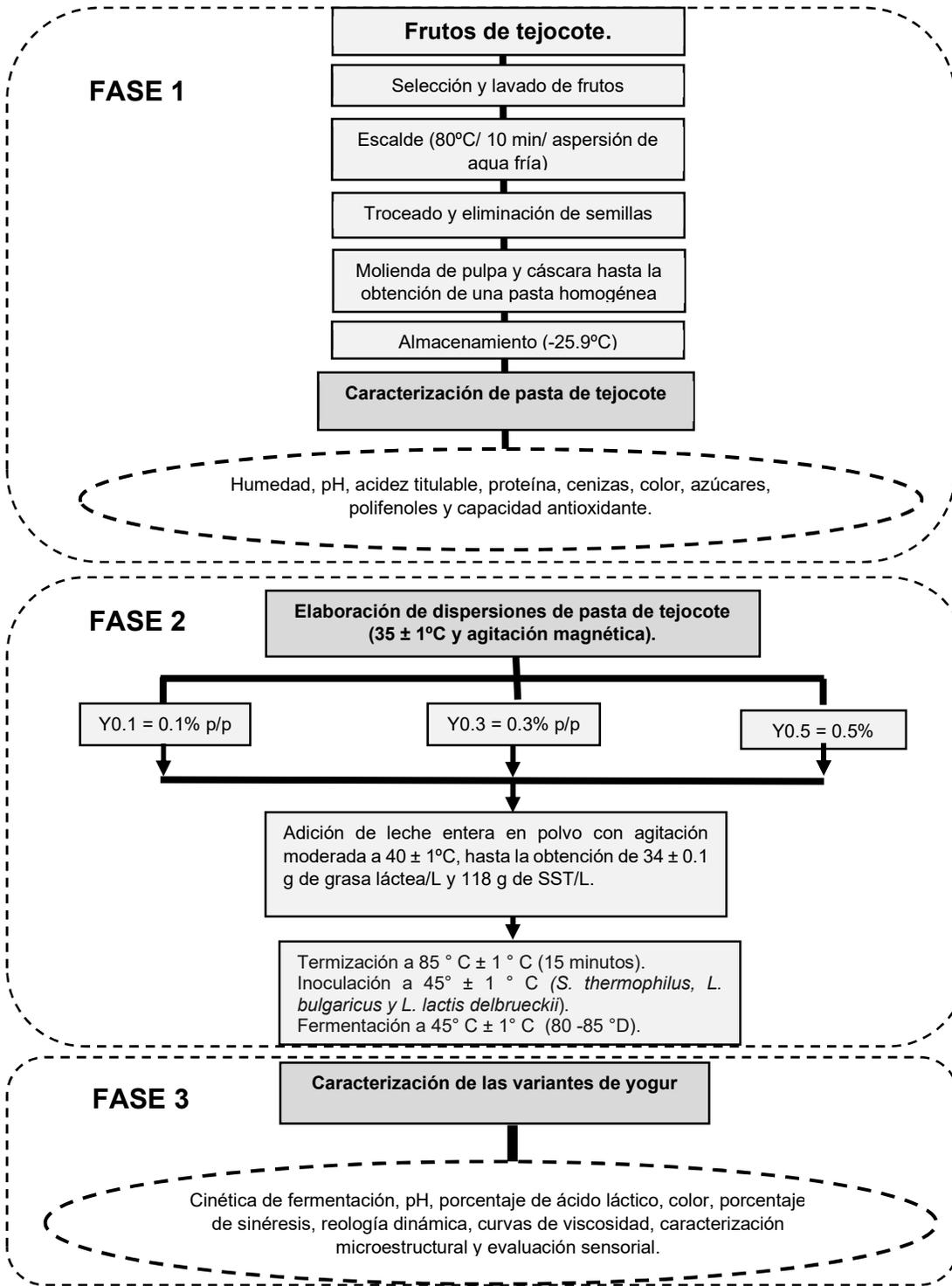


Figura 6. Diagrama de bloques de las diferentes etapas de investigación

3.3.1 Ubicación del trabajo

El trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Tecnología de los Alimentos, ubicado en el Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

3.3.2 Materiales

Frutos de tejocote (*Crataegus* spp.) de la variedad DOAR 02, libres de enfermedades y daños mecánicos, fueron obtenidos del Banco de Germoplasma de Tejocote de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, con coordenadas GPS de 19°29' N, 98°53' W y una elevación sobre el nivel del mar de 2250 m.

Para la elaboración del yogur batido, se utilizó leche entera en polvo (NIDO®, Nestlé, S.A. de C.V. México), cultivo láctico liofilizado de inoculación directa constituido por *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbruecki subsp. bulgaricus* y *Lactobacillus delbruecki subsp. lactis* (CHOOZIT MY 800-5 DCU, Danisco Francia SAS 220 Dange Saint Romain, Francia).

Los reactivos utilizados fueron ácido clorhídrico, hidróxido de sodio, carbonato de sodio, etanol absoluto que fueron adquiridos en Química Laitz, S.A. de C.V. (Ciudad de México, México). Glucosa, reactivo Folin-Ciocalteu, ácido tánico, albumina de suero bovina y 2,2-difenil 1-picril-hidrazilo fueron adquiridos en Sigma-Aldrich, Toluca, Estado de México, México. Toda el agua usada en los experimentos fue destilada.

3.3.3 Obtención de la pasta de tejocote

Los frutos de tejocote se lavaron con una solución de hipoclorito de sodio al 2% p/v (Linares-García et al., 2015), posteriormente se sometieron a un escalde con el fin de inactivar la enzima polifenoloxidasas, mediante inmersión en agua a 80 ° C por 10 minutos y enfriamiento por aspersion con agua fría. Terminado el proceso de escalde, se siguió la metodología reportada por Senadeera et al. (2018) con algunas modificaciones; se retiraron manualmente las semillas del fruto, posteriormente se tomaron 100 gramos (pulpa y cáscara) que fueron

homogeneizados en un triturador de alimentos (mod. 465-15/13 2V, motor de 500 W, Osterizer, Sunbeam Mexicana, S.A. de C.V, Ciudad de México, México) por 3 minutos. Finalmente, la pasta se trituró manualmente en un mortero hasta la obtención de una pasta uniforme que fue envasada en bolsas herméticamente selladas y almacenadas a -25.9°C en un congelador (LABH-17-FM, LabRepro, Pennsylvania, EUA).

3.3.4 Caracterización de la pasta de tejocote

3.3.5 Caracterización fisicoquímica

El pH de la pasta se midió usando un potenciómetro (pH 120, Conductronic, Puebla, México) a temperatura ambiente. La acidez titulable de las muestras se realizó por triplicado utilizando extractos acuosos conteniendo 10 gramos de pasta de tejocote en 100 mL de agua destilada libre de CO_2 , posteriormente se filtró y el filtrado se valoró con una solución estándar de NaOH 0.1 N, los resultados se expresaron como gramos de ácido málico/100 g de pasta de tejocote (De la Cruz et al., 2014).

Se determinaron los sólidos solubles totales siguiendo la metodología reportada por Solórzano et al. (2015); posteriormente se calculó el índice de madurez mediante la relación de sólidos solubles totales y acidez titulable (Torres et al., 2013).

Se determinaron los contenidos de humedad y cenizas (AOAC,1990). Se utilizó el método de Lowry para la estimación del contenido de proteína utilizando albúmina sérica bovina (BSA) (Sigma-Aldrich, Toluca, Estado de México, México) como estándar ($0.02\text{-}1\text{ mg mL}^{-1}$). La absorbancia se midió a 680 nm utilizando un UV/VIS espectrofotómetro (HP 8453; Hewlett Packard, NY, USA) (Kaur et al., 2018).

Para la determinación de azúcares y fenoles totales, se obtuvo un extracto de la pulpa de tejocote según lo reportado por Vit et al. (2014) con algunas modificaciones. Se pesaron 10 g de pulpa y se mezclaron con 50 mL de etanol

al 80% v/v, posteriormente se colocó en baño maría a 80°C por 5 minutos, se filtró con papel Whatman No. 1 y sometidos a centrifugación a 3000 rpm por 10 min a temperatura ambiente (R 5810, Eppendorf, Germany) recuperando los sobrenadantes los cuales se conservaron en congelación a -25.9 °C en un frasco color ámbar (LabRepro, LABH-17-FM, Pennsylvania, EUA).

El contenido de azúcares totales se evaluó por el método fenol/sulfúrico, empleando glucosa (Sigma-Aldrich México, Toluca, Estado de México, México) para la curva de calibración (0.1 - 0.9 mg mL⁻¹). Los resultados se expresaron como mg de glucosa/100g de pasta de tejocote (Franco-Mora et al., 2010).

El contenido total de polifenoles se analizó utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu, los resultados se expresaron como mg de equivalentes de ácido tánico (EAT)/g de pasta de tejocote (Franco-Mora et al., 2010).

3.3.6 Color de la pasta de tejocote

El color de la pasta de tejocote se evaluó utilizando un colorímetro (CR 400, Konica, Minolta, Inc., Tokio, Japón), a temperatura ambiente. De forma manual la pasta de tejocote (5g) se colocó en cajas Petri de 5 cm de diámetro y los parámetros de color Hunter *L*, *a* y *b* correspondientes en luminosidad (*L*), verde (-*a*) o rojo (+*a*) y azul (-*b*) o amarillo (+*b*), para los parámetros Hue (*H_o*) y chroma (*c*) se calcularon con las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, tal como lo reporta Wang et al., (2019).

$$H_o = \tan^{-1}(a/b) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$C = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad \text{Ecuación 2}$$

3.3.7 Actividad antioxidante de la pasta de tejocote

La actividad antioxidante de la pasta de tejocote se determinó de acuerdo con lo descrito por Brand-Williams et al. (1995), empleando el radical libre DPPH (2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo) (Sigma-Aldrich México, Toluca, Estado de México, México). La reacción se realizó utilizando 3.9 mL de solución de DPPH y 0.1 mL del extracto etanólico (extracto obtenido para determinación de polifenoles totales) (González-Jiménez et al., 2018); la mezcla se agitó suavemente y se dejó

incubar por 30 minutos a temperatura ambiente (24 ± 2 ° C). La capacidad antioxidante de las muestras se observó a 517 nm a partir del cambio gradual de color de DPPH (púrpura) a DPPH reducido (amarillo) utilizando un UV/VIS espectrofotómetro (HP 8453; Hewlett Packard, NY, USA) (García-Mateos et al., 2013).

La actividad captadora de radical DPPH se calculó utilizando la ecuación 3.

$$\% \text{ inhibición} = \left(\frac{AC-AA}{AC} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

% Inhibición= % de actividad captadora del radical DPPH

AC= Absorbancia del control (metanol)

AA= Absorbancia del estándar o extracto

3.3.8 Elaboración del yogur enriquecido con pasta de tejocote

Para la obtención del yogur batido se siguió el método reportado por Ramírez-Santiago et al., (2010).

Se prepararon cuatro variaciones de yogur batido completos en grasa tal como se indican en el Cuadro 6. Lotes de 1 litro de cada una de las variaciones de los yogures fueron preparados por triplicado en un diseño completamente al azar.

Se prepararon dispersiones de pasta de tejocote (0.1, 0.3 y 0.5 %p/p) a 35 ± 1 °C aplicando agitación magnética por 30 minutos; ; posteriormente se adicionó leche entera en polvo (NIDO, Nestlé, S.A. de C.V., México) hasta obtener 3.2 ± 0.1 g de grasa láctea/ 100 g y 12.0 ± 0.1 g de sólidos totales de leche/ 100 g (40 ± 1 °C y agitación moderada). Las cuales fueron refrigeradas a 4 ± 1 °C por 24 horas para permitir su hidratación completa.

Cuadro 6. Formulación de las variaciones de yogur

| Variaciones de yogur | Volumen | Pasta adicionada | Leche adicionada | Peso de la disolución (leche+agua ó leche+ dispersión según corresponda) |
|----------------------|---------|------------------|------------------|--|
| Y | 1 L | --- | 120 g | 1030 g |
| Y0.1 | 1 L | 1.03g | 118.97 g | 1030 g |
| Y0.3 | 1 L | 3.09 | 116.91 g | 1030 g |
| Y0.5 | 1 L | 5.15 | 114.85 g | 1030 g |

Todas las variantes de leche fueron calentadas a $85^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ por 15 minutos, enfriadas a $45^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$, e inoculadas con 0.03 g/L del cultivo iniciador (*Streptococcus Thermophilus*, *Lactobacillus delbruecki subsp. bulgaricus* y *Lactobacillus delbruecki subsp. lactis*, CHOOZIT MY 800 LYO, Danisco Francia SAS, Dangé Saint Romain, Francia) el proceso de fermentación de la leche se llevó a cabo a $45^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ hasta alcanzar una acidez de 80-85 °D, posteriormente se enfriaron los lotes de leche fermentada y se almacenaron a $4 \pm 1^{\circ} \text{C}$ por 24 horas, después los geles fueron retirados de refrigeración y se agitaron suavemente con ayuda de un mezclador mecánico (Caframo, RZR1 , Vernon Hills, II,EUA) a 500 rpm durante 1 minuto y se almacenaron a $4 \pm 1^{\circ} \text{C}$ por 24 h. para la recuperación de la estructura. Los geles se mantuvieron en condiciones de refrigeración a 4°C hasta que fueron llevadas a cabo las evaluaciones fisicoquímicas, reológicas, texturales, microestructurales y capacidad antioxidante (Ramírez-Santiago et al., 2010).

Las variantes se realizaron por triplicado utilizando un diseño completamente al azar.

3.3.9 Cinética de acidificación de los yogures

La velocidad máxima de acidificación (V_{MAX}) se calculó a partir de la variación del pH en función del tiempo (dpH/dt), expresada en unidades de $pH \times 10^{-3} / \text{min}$. Al final de la fermentación se calcularon los siguientes parámetros cinéticos: tiempo necesario para alcanzar la V_{MAX} (t_{MAX} ; h), tiempo necesario para alcanzar el pH 5.0 ($t_{pH5.0}$; h) y el tiempo necesario para completar la fermentación (t_f ; h). El pH de todas las muestras de yogur se determinó utilizando un medidor de pH (pH 120, Conductronic, Puebla, México) (Kwon et al., 2019). La tasa máxima de acidificación (V_{MAX}) se determinó mediante la Ecuación 4 (Zhao et al., 2017).

$$V_{MAX} = \left(\frac{dpH}{dt}\right)_{MAX} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

dpH = Cambio de pH

dt = Cambio de tiempo

V_{MAX} = Velocidad de acidificación máxima

3.3.10 Caracterización del yogur enriquecido con pasta de tejocote

Todas las determinaciones fueron realizadas a los 1 y 21 días de almacenamiento a 4°C.

3.3.11 Caracterización fisicoquímica

La determinación de pH se realizó usando un potenciómetro (pH 120, Conductronic, Puebla, México) a temperatura ambiente. Para la determinación de acidez se realizó por titulación por neutralización con una solución de NaOH 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.3, se utilizaron 3 gramos de yogur diluidos con 27 mL de agua destilada. La ecuación 5 fue utilizada para determinar el contenido de ácido láctico, los resultados se expresaron como % de ácido láctico, tal como reporta (Cho et al., 2020).

$$\% \text{Ácido Láctico} = \left(\frac{(10 * V_{NaOH} * 0.009 * 0.1)}{W} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

V_{NaOH} = Volumen gastado de NaOH en la titulación

W = Peso de la muestra en gramos

Para la determinación de sinéresis las distintas muestras de yogur con adición de pasta de tejocote (14 g) fueron centrifugadas (R 5810, Eppendorf, Germany) a 222 x g por 10 min a $4 \pm 1^\circ\text{C}$. El sobrenadante transparente se retiró, peso y se expresó como porcentaje en peso respecto al peso original del yogur, tal como se muestra en la ecuación 6 (Keogh y O’Kennedy, 1998) (Cho et al., 2020).

$$\% \text{Sinéresis} = \frac{\text{Peso del supernadante en gramos}}{\text{Peso de la muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

3.3.12 Color del yogur

El color de los diferentes tratamientos de yogur se evaluó utilizando un colorímetro (CR 400, Konica, Minolta, Inc., Tokio, Japón) a temperatura ambiente. Las muestras de yogur se colocaron en cajas Petri (5 cm de diámetro) y los parámetros de color Hunter L , a , b , c y H_o correspondientes en luminosidad (L), verde ($-a$) o rojo ($+a$), azul ($-b$) o amarillo ($+b$), croma (c) y tono o matiz (H_o) (Crispín-Isidro et al., 2019).

3.3.13 Análisis reológico

Las propiedades reológicas de las variantes de yogur se determinaron en un reómetro Physica, MCR 301 (Anton Paar, Dynamic Shear Rheometer, Messtechnik, Stuttgart, Alemania), utilizando una geometría de cono-plato (ángulo de cono de 1° , 50 mm de diámetro). Las muestras de yogur batido se colocaron cuidadosamente en el sistema de medición y se dejó reposar por 15 min a 4°C para la recuperación de su estructura y equilibrar la temperatura. Posteriormente, las muestras de yogur batido se sometieron a una deformación

en el intervalo de 0.01 a 100 % a una frecuencia de 1 Hz y una temperatura de 4 °C para caracterizar la región viscoelástica lineal. El mantenimiento de la temperatura se logró mediante un sistema de medición y control de temperatura Physica TEK 150P (Physica Messtechnik, Stuttgart, Alemania). Para todos los casos, los valores del módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') se obtuvieron mediante el software RheoPlus/32 V2.62 (Ramírez-Santiago et al., 2010). Curvas de flujo de los yogures se obtuvieron variando la tasa de corte de 10^{-3} a 10^3 s^{-1} y los correspondientes valores de viscosidad aparente de los yogures fueron medidos (Ramírez-Santiago et al., 2010).. Los datos de las curvas de flujo se ajustaron usando el paquete RheoPlus/32 V2.62 al modelo de Ellis, el cual describe el comportamiento independiente del tiempo de fluidos (Cuevas-Bernardino et al., 2016).

3.3.14 Análisis de actividad antioxidante

La actividad antioxidante de la pasta de tejocote se determinó de acuerdo con lo descrito por Brand-Williams et al. (1995), empleando el radical libre DPPH (2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo) (Sigma-Aldrich México, Toluca, Estado de México, México) . La capacidad antioxidante de las muestras se observó a 517 nm a partir del cambio gradual de color de DPPH (púrpura) a DPPH reducido (amarillo) (García-Mateos et al., 2013).

Para la preparación de la muestra se siguió la metodología reportada por Cho et al. (2020) donde se utilizó un factor de dilución 1:10. Posteriormente 10 mL de la muestra y 10 mL solución 0.15 mM DPPH se hicieron reaccionar a temperatura ambiente en condiciones de oscuridad por 30 min. Después, se midió la absorbancia a 517 nm utilizando un UV/VIS espectrofotómetro (HP 8453; Hewlett Packard, NY, USA).

La actividad captadora de radical DPPH se calculó utilizando según la ecuación 4.

3.3.15 Análisis de microestructura

La microestructura de las variaciones del yogur se examinó con un microscopio óptico (Olympus BX53F, Olympus Optical Corp., Tokio, Japón) conectado a una

cámara Moticam 2500 (Motic Incorporation Ltd., Hong Kong, China) y un software Motic Images Plus 2.0 (Motic, Corp., Ltd., China). El yogur (aproximadamente 0.5 mL de yogur batido) se transfirió a un portaobjetos (2.5 cm x 7.5 cm) equipado con un cubreobjeto (2.5 cm x 2.5 cm x 0.18 ± 0.0015 mm) las muestras se observaron con un objetivo de 10x tomando diez imágenes al azar.

Se desarrolló un método de análisis de imágenes según lo reportado por Gilbert et al. (2020) utilizando el software Image J2; se utilizó una escala de imagen de 10 µm (15.198 píxeles/cm); las determinaciones realizadas fueron:

-Superficie total y número de microgeles: El ajuste de umbral se definió como el patrón percentil de gris; a continuación, las imágenes se bipolarizaron y se aplicó el proceso de cuenca para diferenciar las partículas entre sí. Se midió la superficie media de las partículas en cada imagen. A continuación, se determinó la suma del número de partículas encontradas en cada imagen (10 por muestra de yogur) y se presentó según 2 clases de superficie: $<10^3 \mu\text{m}^2$, $10^3\text{-}10^4 \mu\text{m}^2$ (Gilbert et al., 2020).

-Índice de heterogeneidad: La heterogeneidad de la red de proteínas se determinó según la caracterización de la rugosidad visual del yogur agitado, utilizando la variación del nivel de gris en las imágenes. Cada píxel de las imágenes se fijó en un valor de gris entre 0 (negro) y 255 (blanco), que correspondió a la red de proteínas. Los valores cercanos a 0 representaron una red de proteínas densa en la ubicación del píxel, mientras que los píxeles blancos representaron la ausencia de una red de proteínas. El histograma de valores de gris representó la distribución de gris en el área total de la imagen. Esta distribución caracterizó la variación de la densidad de la red de proteínas de cada imagen; por lo tanto, el índice de heterogeneidad (NHI) se definió como la heterogeneidad de la densidad de la red de proteínas y fue igual a la desviación estándar de las distribuciones de valores de grises en las imágenes (Gilbert et al., 2020).

-Índice de circularidad: Las partículas se caracterizaron por su índice de circularidad, que se define en Image J2 como $(4\pi \times \text{área de la partícula}) /$

(perímetro de la partícula)². Este índice varía entre 0 (forma no circular) y 1 (forma circular perfecta) (Gilbert et al., 2020).

3.3.16 Evaluación sensorial

Las variaciones de yogur después de cinco días de almacenamiento fueron evaluadas por 40 consumidores de yogur (20 hombres y 20 mujeres, con edades comprendidas entre los 25 y 50 años), los cuales fueron habitantes de los municipios Sanctórum de Lázaro Cárdenas y Calpulalpan (Tlaxcala) y establecieron que eran consumidores habituales de yogur.

Cada variante de yogur se colocó en vasos de plástico de 20 mL, codificados con números aleatorios de tres dígitos y se presentaron al azar (Hernández-Rodríguez et al., 2017); se pidió a los panelistas que evaluaran su preferencia por los siguientes atributos que se consideran de importancia para la aceptación por parte del consumidor: aroma, apariencia, cremosidad, acidez, granulosidad, sabor, sabor residual y aceptabilidad global (Ghasempour et al., 2020; Senadeera et al., 2018). Para el enjuague bucal se utilizó agua entre las evaluaciones (Ghasempour et al., 2020)

La preferencia por parte de los consumidores se calificó en una escala hedónica de cinco puntos (1= Me disgusta mucho; 2 = Me disgusta moderadamente; 3 = ni me gusta ni me disgusta, 4= Me gusta moderadamente y 5= me gusta mucho) (Hernández-Rodríguez et al., 2017).

3.3.17 Análisis de datos

Los análisis se llevaron a cabo por triplicado de muestras independientes utilizando un diseño experimental aleatorio. Los datos se sometieron a una Análisis de Varianza de Clasificación Simple y se realizó un análisis de comparación de medias por medio de la prueba Tukey cuando fue adecuado. El nivel de significancia se estableció en $p \leq 0.05$. El análisis de datos se realizó en el software Statgraphics Centurion XVI (Statistical Graphics Corp., Manugistics, Inc., Cambridge, MA, EE.UU.).

Para la evaluación sensorial el diseño experimental fue un diseño de bloques completos al azar, los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza

con una comparación de medias de diferencia mínima significativa (LSD) con $p \leq 0.05$ y posteriormente se realizó un análisis de componentes principales utilizando el software Statgraphics Centurion XVI (Statistical Graphics Corp., Manugistics, Inc., Cambridge, MA, EUA.).

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1 Caracterización fisicoquímica de la pasta de tejocote (PT)

En el Cuadro 7 se muestran las características de la pasta de tejocote. El índice de madurez de los frutos de tejocote utilizados para la obtención de PT expresa de forma cuantificable el grado de madurez del fruto; dicho índice se correlaciona positivamente con los sólidos solubles totales y pH, mientras que se correlaciona negativamente con la acidez titulable (Franco-Mora et al., 2010). De la Cruz et al. (2014) evidenciaron índices de madurez entre 17 y 58 en las siete accesiones de tejocote estudiadas (ACC18, ACC19, ACC22, ACC25, ACC63, ACC72, ACC100); resultados que se explican por la elevada concentración de azúcares y baja acidez titulable. Linares-García reportaron que índices de madurez mayores a 1.7 en frutos de tejocote es indicativo de que el fruto se encuentra en un estadio de maduración 3 que físicamente se puede identificar por frutos de tejocote de color amarillo. Las diferencias en el índice de madurez se explican por la diferencia en el estado de madurez que afecta de forma significativa el contenido de sólidos solubles, pero también se explica por la variedad estudiada, ya que se reportan diferencias entre la acidez del fruto y la concentración de sólidos solubles (Hernández et al., 2015).

El contenido de azúcares totales se encuentra en el intervalo reportado por Franco-Mora et al. (2010) (64 a 129 mg/g pasta de tejocote). Diferentes contenidos de azúcares totales se atribuyen a la variedad de tejocote y zona de producción (Franco-Mora et al., 2010). Los azúcares reportados por De la Cruz et al. (2013) para diferentes accesiones de tejocote fueron la sacarosa en mayor proporción, seguido de la fructosa y en menor cantidad la glucosa.

El contenido de humedad fue comparable al reportado por Cuevas-Bernardino et al. (2016); quienes reportaron un contenido de humedad en la pulpa del fruto de

tejocote en las accesiones HP50 y HP55 de 75.4 % obtenidas del Banco de Germoplasma de la Universidad Autónoma Chapingo.

Cuadro 7. Características de la pasta de tejocote

| Características ^z | Pasta de Tejocote ^y |
|--|--------------------------------|
| Humedad (%) | 69.5 ± 0.4 |
| pH | 4.4 ± 0.0 |
| Acidez Titulable (g Ac. málico/100g) | 0.4 ± 0.0 |
| Índice de madurez | 9.5 |
| Color | |
| L | 48.5 ± 0.4 |
| a | -0.9 ± 0.0 |
| b | 34.2 ± 0.2 |
| Chroma | 34.3 ± 0.2 |
| Hue | 178 ± 0.0 |
| Cenizas (%) | 0.4 ± 0.0 |
| Azúcares Totales (mg/g) | 83.4 ± 0.6 |
| Proteínas (%) | 0.3 ± 0.0 |
| Contenido total de polifenoles (mg A. Tánico/ g) | 22.3 ± 0.1 |
| Porcentaje de inhibición del radical DPPH(%) | 54.3 ± 2.2 |

z: Media ± desviación estándar

y: Base Húmeda

El contenido de proteínas en la pasta de tejocote fue menor a los resultados reportados por Vivar-Vera et al. (2007) ($0.34 \pm 0.0\%$); las diferencias en el contenido de proteína pueden atribuirse a la variedad y estado de madurez del fruto (Franco-Mora et al., 2010). El contenido de cenizas fue superior al reportado por Cuevas-Bernardino et al. (2016) en la pectina extraída de las accesiones HP50 y HP55 (0.2 ± 0.0); esta diferencia puede atribuirse al proceso de hidrólisis

ácida para la extracción de pectina, donde se pueden perder cierto contenido de fibras insolubles y minerales (Paredes et al., 2015).

Los resultados de pH y acidez titulable indican el carácter ácido de la pasta de tejocote; resultados que son similares a los reportados por Hernández et al. (2015) en la caracterización de las accesiones ATEX 02 y ATEX 05. Los resultados reportados por Franco-Mora et al. (2010), indican que la variedad utilizada para la elaboración de la pasta (DOAR 02) se clasifica de baja acidez; debido a contenidos inferiores al 1 % de ácido málico en el fruto.

Los resultados obtenidos de índice de madurez, contenido de azúcares totales y baja acidez indican cambios inherentes al proceso de maduración del fruto; donde, existe un aumento en la concentración de sólidos solubles y una disminución de la acidez titulable del fruto (Linares-García et al., 2016).

Hernández et al. (2015) reportaron que los compuestos responsables del color en el fruto de tejocote son la clorofila asociados al color verde que se presenta en los estados de madurez 1 y 2 (Linares-García et al., 2017); mientras que los carotenoides son los responsables del color amarillo en frutos con estados de madurez avanzados. Los parámetros de color sugieren que la pasta de tejocote es ligeramente luminosa con ligera tendencia al color verde y amarillo. Hernández et al. (2015) reportaron valores comparables de L^* , a^* y b^* en la caracterización de color de pulpa de dos accesiones de frutos de tejocote ATEX 02 y ATEX 05. Estos autores reportaron un valor de a^* superior, del orden de -5.3; lo que implica una menor coloración verde en la pasta; estas diferencias pueden estar relacionadas con la pérdida de clorofila y avance de la senescencia en frutos no climatéricos (Gorny et al., 2002). Para L^* y b^* los valores encontrados por Hernández et al. (2015) fueron de 56.3 y 29.9 respectivamente; estos autores sugieren que el valor de b^* se explica por un cambio en el color debido a la hidrólisis de la clorofila y aparición de carotenoides responsables del color amarillo. Para L^* se reporta una pérdida en la luminosidad conforme aumenta el

tiempo de almacenamiento de los frutos; debido a la senescencia, contribuyendo a la apariencia de envejecimiento.

El contenido de polifenoles de la pasta de tejocote (Cuadro 6) es comparable con los resultados reportados por Franco-Mora et al. (2010), quienes reportaron un intervalo en los genotipos obtenidos de Ocoyoacac y Lerma en el Estado de México de 8.1 - 22.3 mg ácido tánico/g de peso fresco de pulpa; estos autores indicaron que solo el 6 % de las colectas de tejocote superaron valores de 20 mg ácido tánico/g de peso fresco de pulpa. García et al. (2013) reportaron que los frutos provenientes del estado de Puebla presentaron uno de los mayores contenidos de fenoles totales (500 mg/100g); sin embargo, se encuentran otros genotipos como el 2 (*Crataegus rosei*) y 5 (*Crataegus aurescens*) cuyo contenido es menor a 100 mg/100 g, indicando que la composición de polifenoles está determinada por factores genéticos y factores ambientales. Vega et al. (2019) indicaron que el contenido de polifenoles totales se ve afectado por el estado de madurez del fruto; presentándose un decremento significativo en el contenido de polifenoles durante su maduración; lo cual puede atribuirse a la transformación de los fenoles insolubles por polimerización u oxidación a ácidos fenólicos ligados en estados que no pueden detectarse por Espectrofotometría e inclusive por Cromatografía de líquidos acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS).

La actividad secuestradora de los radicales DPPH se correlaciona directamente con el contenido de fenoles totales (Robles-Botero et al., 2020); el porcentaje de inhibición que presentó la pasta de tejocote (Cuadro 6) es comparable con el reportado por González- Jiménez et al. (2018) donde el porcentaje de inhibición de extractos de fruto de tejocote se encontró en el rango de 20.5 % a 51.5 %. Las diferencias en la actividad antioxidante se pueden atribuir a la variedad y además a las características estructurales de los compuestos bioactivos de los frutos; ya que dichos compuestos determinan la capacidad antioxidante del fruto y de sus extractos (Robles-Botero et al., 2020).

3.4.2 Cinética de acidificación

Durante la fermentación, los microorganismos ácido-lácticos se desarrollan convirtiendo parcialmente la lactosa en ácido láctico. Debido a este proceso se produce un descenso en el pH y un aumento de la acidez a medida que transcurre el proceso de fermentación. La velocidad con la que ocurren estos cambios dependen del tipo de microorganismo empleado, tipo de leche, presencia de fibra entre otros factores, por lo cual se recurre a la determinación de parámetros cinéticos de acidificación con el fin de evaluar el proceso de fermentación en el yogur (Torres et al., 2017). Raikos et al. (2018) indicaron que una disminución en los tiempos de fermentación de productos lácteos es un importante hallazgo para la industria láctea; ya que puede acelerar el procesamiento y, por tanto, reducir el costo de producción.

Los resultados muestran que la velocidad máxima de acidificación (V_{MAX}), tiempo requerido para alcanzar la V_{MAX} (t_{MAX}), tiempo para alcanzar pH 5.0 ($t_{pH5.0}$) y tiempo total de fermentación (t_f) cambiaron significativamente ($p < 0.05$) en función del porcentaje de pasta añadida (Cuadro 7).

Cuadro 8. Parámetros de cinética de acidificación de los yogures

| Parámetros del modelo ^x | Tratamientos (concentración %p/p) | | | |
|--|-----------------------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| | Y ^y | Y0.1 | Y0.3 | Y0.5 |
| V_{MAX} ($\times 10^{-3}$ unidades de pHmin ⁻¹) | 13.6 \pm 2.8 a ^z | 15.5 \pm 3.3 a,b | 17.1 \pm 0.0 a,b | 22.0 \pm 1.6 c |
| t_{MAX} (h) | 6.7 \pm 0.2 c | 6.2 \pm 0.1 c,b | 6 \pm 0.1 b | 4.6 \pm 0.0 a |
| $t_{pH5.0}$ (h) | 6.8 \pm 0.0 d | 6.5 \pm 0.1 c | 5.7 \pm 0.0 b | 5 \pm 0.1 a |
| t_f (h) | 8 \pm 0.1 c | 7 \pm 0.3 b | 6.7 \pm 0.2 b | 5.8 \pm 0.1 a |

^z Medias seguidas con diferente letra (a,b,c,d en la misma fila) son significativamente diferentes ($p < 0.05$)

^y Valores corresponden a media \pm SD (n=3). Y: yogur control ; Y0.1, Y0.3 y Y0.5: Yogur conteniendo 0.1%, 0.3% y 0.5% p/p de pasta de tejocote, respectivamente.

^x V_{MAX} = Velocidad de acidificación máxima; t_{MAX} = Tiempo para alcanzar V_{MAX} ; $t_{pH4.6}$ = Tiempo para llegar a pH 4.6, t_f = Tiempo para completar la fermentación.

La adición de pasta de tejocote generó un aumento en la V_{MAX} , donde Y0.5 fue el tratamiento que exhibió la velocidad de acidificación mayor (22.0 ± 1.6) y Y la menor (6.7 ± 0.2); estos resultados indican una acidificación del yogur más rápida en Y0.5 respecto de Y. En cuanto a t_{MAX} Y0.5 mostró el menor tiempo (4.6 ± 0.0 h) y Y el tiempo mayor (6.7 ± 0.2 h). En concordancia, se obtuvo un tiempo más corto para alcanzar un pH de 5.0 ($t_{pH5.0}$) y un menor tiempo total de acidificación (t_f) conforme se incrementó el porcentaje de pasta adicionada. Oh et al. (2016) reportaron resultados comparables con valores de V_{MAX} ($\times 10^{-3} \Delta pH/ \text{min}$) entre 8 -14.58, $t_{pH5.0}$ de 4.73 a 10.71 horas y t_{MAX} de 5.92 -11.48 horas en yogures enriquecidos con extracto de frutos de *Cudrania tricuspidata* (maclura china) y *Morus alba* (morera blanca). Abdel-Hamid et al. (2020) reportaron un comportamiento similar en yogures enriquecidos con extracto de *Siraitia grosvenorii* (2%) donde el tiempo total de acidificación de los yogures fue de 6 horas, resultados que son comparables con los obtenidos en esta investigación.

Este comportamiento puede explicarse por la adición de la pasta que, al ser obtenida de un fruto acelera el proceso de acidificación; debido a los carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales contenidos en el extracto adicionado que mejoran el crecimiento de los cultivos en el yogur (Abdel-Hamid et al., 2020). Otro compuesto con efecto prebiótico es el ácido clorogénico reportado en el fruto de tejocote, el cual puede aumentar la viabilidad de las BAL durante el proceso de acidificación del yogur y por tanto acelera el proceso de producción del yogur (Kwon et al., 2019).

Los resultados obtenidos sugieren que la pasta de tejocote puede ser utilizada como un ingrediente que genera tiempos de fermentación más cortos en la elaboración de yogur batido.

3.4.3 Caracterización de las variantes de yogur enriquecido con pasta de tejocote

3.4.4 Caracterización fisicoquímica del yogur

Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica de las variantes de yogur y su evolución durante el almacenamiento se presentan en el Cuadro 8.

Los valores de acidez (porcentaje de ácido láctico y pH) al día uno de almacenamiento, difirieron significativamente ($p < 0.05$) de la siguiente manera $Y0.5 > Y0.3 > Y0.1 > Y$. Wang et al. (2019) indicaron que el aumento en los niveles de acidez desarrollada en los yogures suplementados se puede explicar por el contenido de ácidos orgánicos naturales presentes en el fruto de tejocote (ácido ascórbico (3.48 mg/g) y clorogénico (1.38 mg/g) acidificando el medio donde se adicionen.

Cuadro 9. Características fisicoquímicas de las variantes de yogur durante el almacenamiento en frío a 4° C

| | Periodo de almacenamiento (días) | Y ^Y | Tratamientos (concentración % p/p) | | |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | Y0.1 | Y0.3 | Y0.5 |
| pH | 1 | 4.2 ± 0.0 d,x ^z | 4.16 ± 0.0 c,x | 4.12 ± 0.0 b,x | 4.10 ± 0.0 a,x |
| | 21 | 4.2 ± 0.0 d,x | 4.15 ± 0.0 c,z | 4.10 ± 0.0 b,z | 4.07 ± 0.0 a,z |
| % Ácido láctico | 1 | 0.95 ± 0.02 b,z | 0.96 ± 0.02 c,z | 0.97 ± 0.00 c,z | 1.03 ± 0.01 d,z |
| | 21 | 1.17 ± 0.01 b,x | 1.21 ± 0.0 c,b,x | 1.28 ± 0.04 c,x | 1.37 ± 0.02 d,x |
| % Sinéresis | 1 | 9.5 ± 0.9 b,z | 6.02 ± 0.7 a,x | 7.16 ± 0.3 a,z | 7.1 ± 0.8 a,z |
| | 21 | 12.65 ± 0.4 d,x | 6.08 ± 0.4 a,x | 8.2 ± 0.09 b,x | 10.3 ± 0.02 c,x |

^z Medias seguidas con diferente letra (a,b,c,d en la misma fila ; x,z en la misma columna) son significativamente diferentes ($p < 0.05$)

^Y Valores corresponden a media ± SD (n=3). Y: Control ; Y0.1, Y0.3 y Y0.5: Yogur conteniendo 0.1%, 0.3% y 0.5% p/p de pasta de tejocote, respectivamente.

Después de veintidós días los yogures alcanzaron una acidez significativamente mayor, variando de la siguiente manera $Y0.5 > Y0.3 > Y0.1 > Y$. Aumentos en la acidez del yogur durante su almacenamiento se relaciona con la conversión de lactosa en ácido láctico por acción de bacterias ácido- lácticas propias del yogur (W- Y Cho et al., 2020). Pacheco et al. (2021) reportaron variaciones de acidez similares durante el periodo de almacenamiento; atribuyendo este incremento en

la acidez debido a una actividad metabólica favorecida por los cultivos iniciadores, debido a una mayor disponibilidad de carbohidratos provenientes de la pasta de tejocote.

W-Y Cho et al. (2020) reportaron que el pH del yogur con fines comerciales debe estar entre 3.27 y 4.59. En este estudio, los valores de pH para todas las muestras de yogur se encuentran en el rango mencionado durante los veintiún días de almacenamiento.

Los resultados de sinéresis obtenidos (Cuadro 8) indican que la presencia de pasta de tejocote redujo el grado de sinéresis respecto de Y.

Los valores de sinéresis de las variantes de yogur al día uno de almacenamiento presentaron diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) (Cuadro 3) entre el control y los yogures con adición de pasta de tejocote; sin embargo, no así entre ellas (Y0.1, Y0.3, Y0.5). Wang et al. (2019) evidenciaron esta misma tendencia en yogures suplementados con orujo de manzana; atribuyendo la reducción del grado de sinéresis por la solubilización de la pectina durante el proceso de calentamiento de la leche antes de la fermentación del yogur, favoreciendo la capacidad de ligar agua y el aumento de la viscosidad en el entorno.

En un proceso de acidificación de un producto como el yogur, en un pH cercano a 4, las estructuras de caseína micelar se desestabilizan; en estas condiciones parte de la pectina solubilizada en la fase de calentamiento se adsorbe en la superficie de las micelas de caseína, estabilizando así estéricamente los agregados (Yousefi & Jafari, 2019).

Al día veintiuno de almacenamiento, los valores de sinéresis obtenidos variaron de la siguiente manera $Y > Y0.5 > Y0.3 > Y0.1$, presentando un incremento significativo ($p < 0.05$) en el grado de sinéresis de todas las variantes de yogur durante el almacenamiento en frío. Este mismo comportamiento es reportado por Mori-Núñez et al. (2019) quienes indicaron que la sinéresis aumenta conforme transcurre el tiempo de almacenamiento del yogur a 4°C, llegando a valores

máximos de aproximadamente de 16% en los tratamientos evaluados. Estos mismos autores indican que el aumento de la sinéresis en función del tiempo se debe principalmente al rompimiento del gel; que ocasiona una menor retención de agua en la estructura del yogur, provocando el incremento en el porcentaje de sinéresis; otro factor es el almacenamiento que puede tener un efecto sobre el encogimiento de la matriz de micelas de caseína causando liberación del suero (Mori-Nuñez et al., 2019).

De los tratamientos con adición de pasta, Y0.1 exhibió el menor porcentaje de sinéresis y Y0.5 el mayor valor. Parra (2014) indicó que un factor que influye en el aumento de la sinéresis es el desarrollo de alta acidez, al igual que la agitación a temperaturas relativamente altas. Esto se relaciona con los valores de acidez que fueron menores para Y0.1 y mayores para Y0.5; mayor acidez en el yogur puede generar un efecto de contracción en la matriz de la micela de caseína causando mayor eliminación de lactosuero (Parra 2014). La correlación encontrada entre el porcentaje de sinéresis y acidez al día veintiuno de almacenamiento fue de 0.936 indicando que existe una relación positiva, donde, conforme se incrementa el porcentaje de ácido láctico existe un incremento en el valor de sinéresis

Otro factor que se espera incremente los valores de sinéresis durante el almacenamiento corresponde al proceso de batido; debido a que en esta operación se aplica una fuerza externa al gel con el fin de romper la estructura (Jiménez et al., 2004).

Simanca et al. (2013) mencionaron que la estructura del yogur no es adecuada cuando el porcentaje de sinéresis es mayor al 42 %, al respecto, los tratamientos evaluados presentaron un menor porcentaje de sinéresis al reportado por estos autores.

3.4.5 Color del yogur

El color de los ingredientes funcionales adicionados al yogur como fibra de frutos o bien como subproductos de estos, pueden generar cambios en el yogur, como son alteraciones en la apariencia, color, viscosidad, entre otros; sin embargo, el aporte nutricional que confieren dichos ingredientes funcionales al yogur compensa dichas modificaciones (Wang et al., 2019).

El cambio de color de muestras de yogur durante el almacenamiento se determinó en términos de L^* , a^* , b^* , H^0 , C y ΔE (Cuadro 9).

Los valores de L^* obtenidos de las muestras exhibieron sistemas blancos y brillantes al ojo humano ($L^* > 70$) durante todo el período de almacenamiento; este mismo comportamiento fue reportado por Macedo & Vélez (2015) en sus variantes de yogur. El valor de L^* mostró diferencia significativa ($p < 0.05$) entre el control y los tres tratamientos de yogur con PT durante todo el período de almacenamiento. Al día uno, se observaron valores de L^* más altos ($p < 0.05$) a medida que aumentó el contenido de pasta de tejocote. Los valores variaron de la siguiente manera $Y0.5 > Y0.3 > Y0.1 > Y$; comportamiento que es comparable con el reportado por Parra (2015), quien concluye que a mayor concentración de extracto hay una disminución en la luminosidad del yogur.

Al día veintiuno de almacenamiento se presentó un decremento en el valor de luminosidad en aproximadamente un 30 % en todos los tratamientos; este mismo comportamiento es reportado por W-Y Cho et al. (2020) quienes evidenciaron que cuando el período de almacenamiento aumenta, se presenta una disminución en el valor de L^* , como consecuencia de los cambios bioquímicos (mecanismos internos de coagulación de proteínas y factores de separación).

Cuadro 10. Evaluación de color del yogur

| | Periodo de almacenamiento (días) | YY | Tratamientos (concentración % p/p) | | |
|----|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------|---------------------|
| | | | Y0.1 | Y0.3 | Y0.5 |
| L* | 1 | 74 ± 0.6 a, x ^z | 78.5 ± 0.2 b, x | 78.7 ± 0.0 b, x | 80.9 ± 0.0 c, x |
| | 21 | 51.2 ± 2.1 a, y | 57.1 ± 0.4 b, y | 59 ± 0.5 a, b, y | 63.7 ± 3.2 c, y |
| a* | 1 | -2.4 ± 0.0 a, x | -3 ± 0.0 b, x | -3.1 ± 0.0 c, x | -3.3 ± 0.0 d, x |
| | 21 | -1.4 ± 0.0 a, y | -1.5 ± 0.0 a, y | -1.5 ± 0.0 a, y | -1.7 ± 0.0 b, y |
| b* | 1 | 4.9 ± 0.0 a, y | 5.6 ± 0.1 b, y | 5.7 ± 0.0 b, y | 6.5 ± 0.0 c, x |
| | 21 | 5.7 ± 0.2 a, x | 6.2 ± 0.0 b, x | 6.3 ± 0.2 c, b, x | 6.8 ± 0.2 c, x |
| H* | 1 | 151.3 ± 0.3 a, y | 152.1 ± 0.5 c, y | 153.1 ± 0.1 b, y | 153.1 ± 0.4 a, b, y |
| | 21 | 165.5 ± 0.5 a, x | 167 ± 0.5 a, x | 166.4 ± 0.5 a, x | 165.7 ± 0.8 a, d, x |
| C* | 1 | 5.4 ± 0.0 a, y | 6.3 ± 0.0 b, x | 6.5 ± 0.0 c, x | 7.3 ± 0.0 d, y |
| | 21 | 5.9 ± 0.1 a, x | 6.4 ± 0.0 b, x | 6.5 ± 0.2 b, x | 7 ± 0.1 d, x |
| ΔE | 1 | --- | 4.6 ± 0.8 a, x | 4.8 ± 0.6 a, x | 7.1 ± 0.6 b, y |
| | 21 | --- | 5.9 ± 2.2 a, x | 7.8 ± 1.9 a, b, x | 12.6 ± 1.9 b, x |

^z Medias seguidas con diferente letra (a,b,c,d en la misma fila x,y en la misma columna) son significativamente diferentes ($p < 0.05$)

^y Valores corresponden a media ± SD (n=3). Y: Control ; Y0.1, Y0.3 y Y0.5: Yogur conteniendo 0.1%, 0.3% y 0.5% p/p de pasta de tejocote, respectivamente.

Los valores de a* muestran una tendencia al color verde; al día uno de almacenamiento conforme se incrementó el porcentaje de pasta de tejocote añadida existió un aumento en los valores de la siguiente manera $Y > Y0.1 > Y0.3 > Y0.5$; atribuyendo este comportamiento al incremento de la concentración de clorofila contenido en la pasta de tejocote (López & Di Sarli, 2016). Al día veintiuno de almacenamiento se presentó un incremento ($p < 0.05$) en el valor de este parámetro para todos los tratamientos. W-Y Cho et al. (2020) reportaron esta misma tendencia en variantes de yogur enriquecido con extracto de hoja de olivo. La agitación del gel y los cambios de acidez en el yogur durante el almacenamiento pueden estar asociados a cambios en los valores de a*; ya que pueden provocar cambios en la estructura que dan lugar a la migración de pigmentos naturales en la matriz del yogur (Estrada et al., 2011).

Por otro lado, los valores de b* exhibieron una tendencia al color amarillo en todos los grupos experimentales. Al día veintiuno de almacenamiento se observó un incremento significativo en los valores para todos los tratamientos. Estrada et al.

(2011) reportaron valores de b^* para un yogur enriquecido con aceite de pescado después de cuatro semanas, con un valor de 7.7, valor que es comparable con el obtenido en este estudio.

Santillan & Ruíz (2019) reportaron en sus variantes de yogur que, durante el almacenamiento, se observó una disminución significativa en L^* y b^* , mientras que el parámetro a^* mostró un aumento significativo. Estos autores mencionan que la presencia de minerales, los cuales en nuestro caso provienen de la pasta de tejocote, favorecen la oxidación de los lípidos del yogur durante el almacenamiento, disminuyendo así la luminosidad y provocando cambios en los parámetros L^* y b^* .

El valor de croma está relacionado con la intensidad y saturación del color (Coronel-Aguilera & San Martín-González, 2015). Los parámetros de croma (C) de los yogures presentaron diferencia en ambos periodos de almacenamiento para todos los tratamientos; donde a mayor porcentaje de pasta añadida se incrementó el índice de saturación, esto puede ser explicado por los pigmentos naturales presentes en la pasta de tejocote como los carotenoides; aunados a los cambios en el índice de intensidad de color, los yogures presentaron diferencias estadísticas en los valores de tono (H°) variando de la siguiente manera Y0.5 y Y0.3 los cuales no mostraron diferencia estadística significativa entre ellos; seguidos de los tratamientos Y y Y0.1. Para todos los tratamientos, los valores de tono fueron menores de 180° , resultados que corresponden a una tonalidad amarilla. Durante el almacenamiento, los valores de tono presentaron un ligero incremento manteniendo un tono amarillo; este comportamiento es comparable con el reportado por Salinas et al. (2005) en yogures enriquecidos con extractos de antocianinas obtenidas a partir de grano de maíz. Inostroza et al. (2015) reportaron comportamientos similares al adicionar al yogur *Tropaeolum tuberosum*, atribuyendo estos incrementos a la pérdida de pigmentos por un reordenamiento en la matriz del gel.

Las diferencias de color (ΔE) entre los tratamientos al día uno fueron significativos para Y0.5; mientras que al día veintiuno de almacenamiento se presentó diferencia estadística significativa en todos los tratamientos.

Los resultados obtenidos indican que los tratamientos Y0.1 y Y0.3 exhibieron diferencias de color notables en ambos períodos de almacenamiento; sin embargo, el tratamiento Y0.5 exhibió el mayor cambio de color con una diferencia significativa al día veintiuno de almacenamiento.

Estos resultados son comparables a los reportados por Aparco et al. (2021) en yogures enriquecidos con hierro. Obón et al. (2009) e Inostroza et al. (2013) reportaron cambios visibles en el color de muestras de yogur después de un mes de almacenamiento; derivado de los cambios bioquímicos que ocurren en el yogur, como el incremento de la acidez generando la pérdida de pigmentos de la matriz del gel como ya se ha mencionado.

3.4.6 Comportamiento reológico de los yogures

3.4.6.1 Propiedades de flujo

Las variaciones de la viscosidad aparente como función de la tasa de corte para las variantes de yogur al día uno y veintiuno de almacenamiento se muestran en la Figura 7 y 8 respectivamente. Al día uno y veintiuno todos los tratamientos exhibieron curvas de flujo típicas de materiales caracterizados por una viscosidad estructural, esto es, mostrando una región Newtoniana a bajas tasas de corte (0.0009-0.00133 1/s), seguida de una región de adelgazamiento al corte a tasas de corte intermedia (0.00133-100 1/s). Venica et al. (2020) reportaron este mismo comportamiento en diversas formulaciones de yogur con adición de fibra de zanahoria; atribuyéndolo a la alineación que sufren los agregados de proteínas cuando se exponen a velocidades de cizallamiento crecientes. Zhao et al. (2020) reportaron que la aplicación de la tensión de cizallamiento en el yogur provocó la deformación de la estructura; ya que la viscosidad aparente disminuyó con el aumento de la velocidad de cizallamiento.

Huang et al. (2021) evidenciaron que, a bajas velocidades de cizallamiento, la fuerza browniana actúa aleatorizando las partículas y formando un número importante de agregados, mostrando una alta viscosidad, mientras que, a una elevada velocidad de cizallamiento, esta fuerza es capaz de romper interacciones entre las cadenas de moléculas de polímeros adyacentes disminuyendo así la viscosidad.

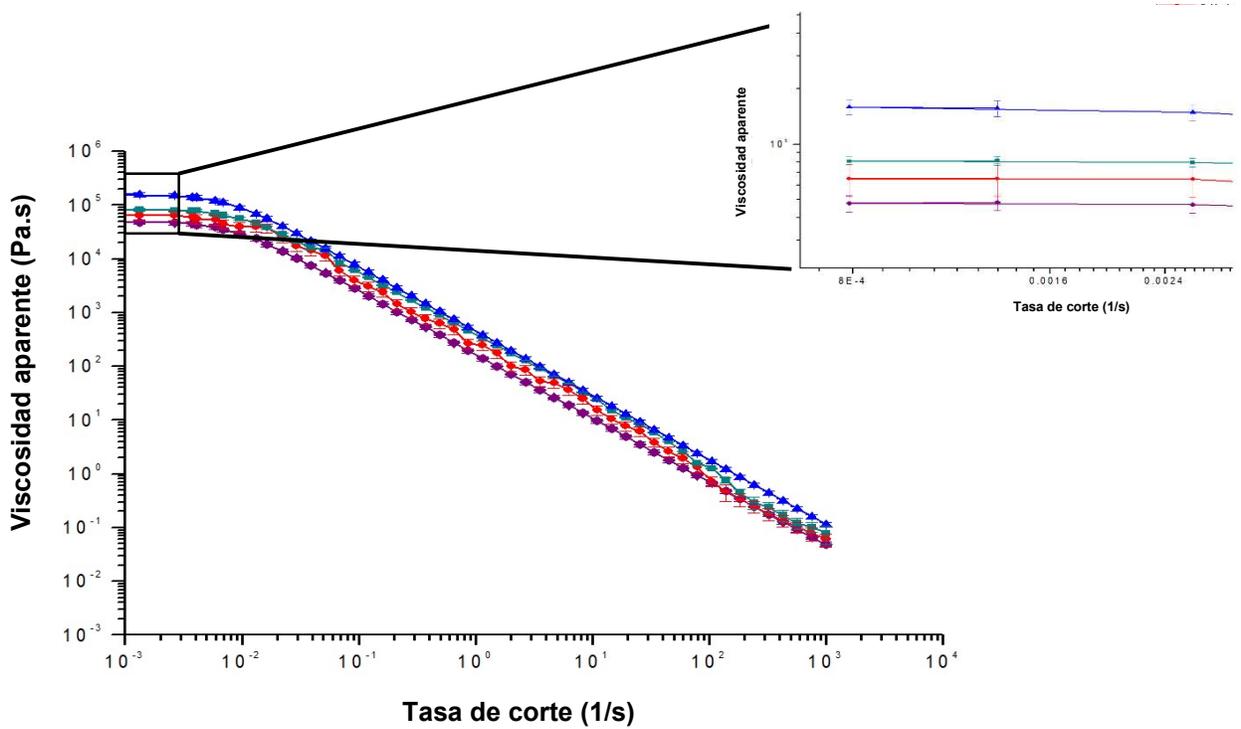


Figura 7. Curva de flujo de las variantes de yogur al día uno de almacenamiento Y (◆), Y 0.1 (●), Y0.3 (■) y Y0.5 (▲)

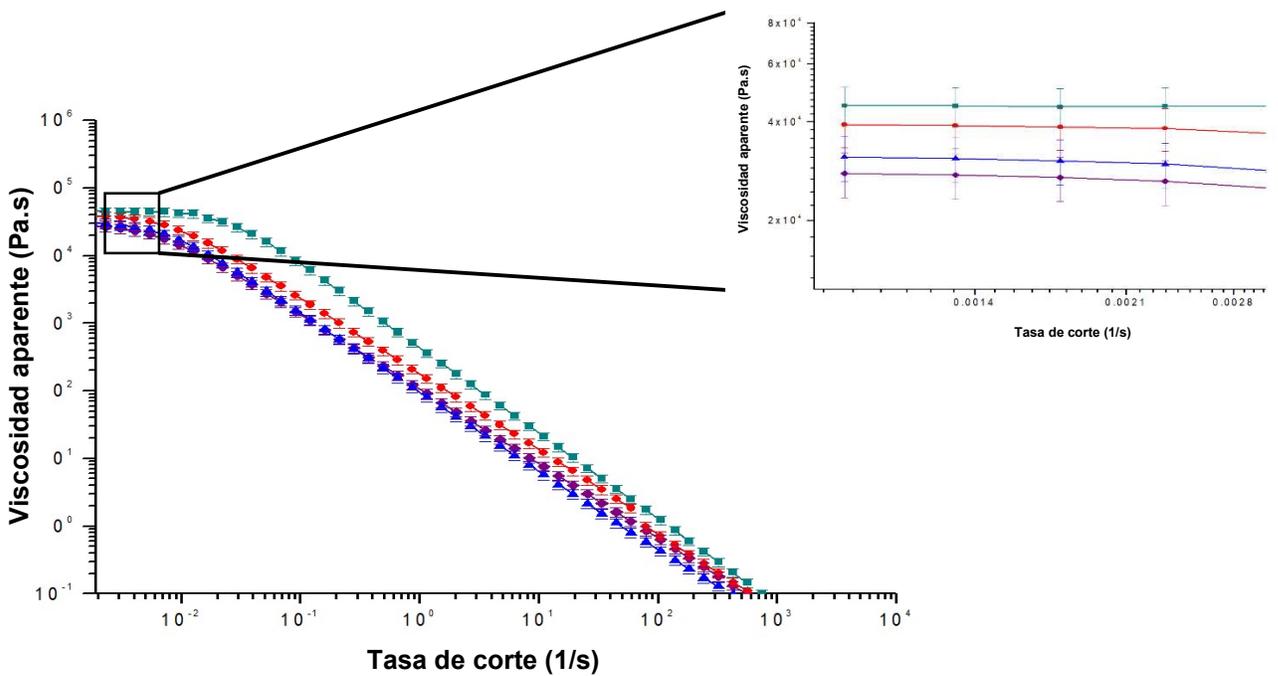


Figura 8. Curva de flujo de las variantes de yogur al día veintiuno de almacenamiento Y (◆), Y 0.1 (●), Y0.3 (■) y Y0.5 (▲)

Los datos experimentales de las Figura 7 y 8 fueron ajustados ($R^2 > 0.99$) al modelo de Ellis:

$$\eta = \frac{\eta_0}{[1+(\lambda\dot{\gamma})^2]^p} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde: η = viscosidad aparente; $\dot{\gamma}$ = tasa de corte; η_0 = viscosidad a baja tasa de corte; λ = Tiempo constante asociado al tiempo de relajación de los biopolímeros en solución y p = índice de adelgazamiento al corte.

Los valores de los parámetros reológicos de Ellis para las variantes de yogur como función del porcentaje de pasta adicionada y el tiempo de almacenamiento se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 11. Valores medios de los parámetros del modelo de Ellis

| | | Tratamientos (concentración % p/p) | | | |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | | Y ^Y | Y0.1 | Y0.3 | Y0.5 |
| | Periodo de almacenamiento (días) | | | | |
| η_0 (Pa.s) | 1 | 44193 ± 309 a ^z | 49996 ± 1221 b | 69501 ± 341.53 c | 82225 ± 155.5 d |
| | 21 | 30210 ± 1435 a | 39491 ± 31.81 b | 54912 ± 152.73 c | 30863 ± 986.1 a |
| p | 1 | 0.55 ± 0.00 a | 0.58 ± 0.01 ab | 0.58 ± 0.01 ab | 0.59 ± 0.00 b |
| | 21 | 0.55 ± 0.00 a | 0.58 ± 0.00 ab | 0.6 ± 0.02 b | 0.56 ± 0.00 ab |
| λ (s) | 1 | 118.3 ± 1.9 a | 121.3 ± 4.3 b | 143.2 ± 4.27 c | 158.6 ± 1.1 d |
| | 21 | 134.5 ± 2.9 a | 147.1 ± 2.9 b | 148.9 ± 0.9 c | 136.9 ± 2.8 a |
| R ² | 1 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| | 21 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |

^z Medias seguidas con diferente letra (a,b,c,d en la misma fila) son significativamente diferentes ($p < 0.05$)

^Y Valores corresponden a media ± SD (n=3). Y: Control ; Y0.1, Y0.3 y Y0.5: Yogur con adición de 0.1%, 0.3% y 0.5% p/p de pasta de tejocote, respectivamente.

Conforme la concentración de pasta de tejocote aumentó, los valores de η_0 aumentaron significativamente ($p < 0.05$). Así, Y0.5 presentó el mayor valor para η_0 mientras que el valor más bajo lo presentó Y. El comportamiento exhibido, sugiere que, a mayor porcentaje de pasta añadida, se intensifican las interacciones de los componentes de la pasta de tejocote con la red de caseína, dando origen a un gel más fuerte, ya que la pectina contenida en la pasta de

tejocote se solubiliza durante la fase de calentamiento de la leche previo al proceso de fermentación del yogur, lo cual permite el ligamiento de agua y por tanto el aumento de la viscosidad en el entorno (Wang et al., 2019). Aunado a lo anterior, se ha reportado la interacción de los polifenoles contenidos en los extractos de frutas adicionados con proteínas de la leche, principalmente mediante enlaces hidrofóbicos y fuerzas de van der Waals, lo que conlleva al reforzamiento de la red de proteína formada en la fase de acidificación del yogur (Ban et al., 2020).

Guimaraes et al. (2016) evidenciaron en yogures con adición de pulpa de guayaba (15%), mayores valores de viscosidad; atribuyendo estos resultados a la disminución del pH del yogur generado por la adición de pulpa de guayaba. Ng et al. (2018) reportaron que la adición de pectina y betaglucano en yogur condujo a un aumento de la viscosidad, debido al reforzamiento por parte de la pectina en la red de proteínas del yogur.

Sin embargo, al día veintiuno el valor mayor estadísticamente significativo de η_0 lo presentó Y0.3 y el menor Y; estos resultados sugieren que la pasta de tejocote tiene un efecto positivo sobre la viscosidad del yogur durante el almacenamiento. Se presentó una disminución en los valores de viscosidad al día veintiuno de almacenamiento. Sengül et al. (2014) reportaron una disminución en los valores de viscosidad de yogures con adición de pulpa de fresa (8 % -16 %), atribuyendo este comportamiento a la adición de la pulpa de fruta, al presentar una disminución en la capacidad de retención de agua de la proteína, generando un decremento en la viscosidad del yogur. El cambio en las propiedades reológicas durante el almacenamiento puede deberse a la reordenación de las partículas del gel (Mokoonlall et al., 2016). Los valores menores estadísticamente de η_0 para las muestras Y0.5 y Y se pueden relacionar con el mayor porcentaje de sinéresis presentado por ambas variantes; de esta forma, la expulsión del suero es una posible consecuencia de una excesiva ruptura en las partículas del gel, lo cual afecta la viscosidad del mismo (Guénard-Lampron et al., 2020). Mokoonlall et al. (2016) mencionan que la ruptura de la estructura del gel da como resultado una

disminución de la firmeza y viscosidad, así como una mayor predisposición para la presencia de sinéresis.

La disminución en los valores de viscosidad al día veintiuno puede ser resultado de la disminución del pH y el incremento de la acidez, provocando de esta forma la sinéresis en el yogur (Sánchez-Moreno, 2018). Rojas-Castro et al. (2007) reportaron un comportamiento similar en yogures batidos con fresa donde en el día 21 se presentó un descenso en la viscosidad para todas las formulaciones; estos mismos autores explican, que, durante los primeros días de almacenamiento ocurre una mejora en la consistencia y viscosidad del yogur, la cual está relacionada con la solidificación de la estructura del gel durante el enfriamiento y la eventual tixotropía del yogur batido. Ruíz-Rivera & Ramírez-Matheus (2009) reportaron en yogures con adición de inulina, una disminución mayor en la viscosidad durante el almacenamiento en frío en formulaciones de yogur con mayor acidez, indicando que la disminución de la viscosidad en este tipo de formulaciones se asocian con pH ácidos, dado que las proteínas se solubilizan a valores de pH bajos.

Los tiempos de relajación (λ) están relacionados directamente con la ruptura y el tiempo de recuperación de los enlaces en el sistema (Cuevas-Bernardino et al., 2016). Conforme se incrementó el porcentaje de pasta añadida, se dio un incremento en el valor de λ ; de esta forma, Y obtuvo el valor menor. Al disminuir λ , los yogures requieren menor tiempo y menor energía para que los agregados sean disgregados; sin embargo, al día veintiuno los valores de λ coincidieron con los resultados obtenidos de η_0 , donde el tratamiento Y0.3 mostró el mayor valor de λ (148.9 ± 0.9 s). La acción de la tasa de corte durante la medición de las propiedades reológicas afecta principalmente a las fuerzas débiles o interacciones intermoleculares (puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals), lo que permite una deformación continua y una disminución en los valores de viscosidad de manera progresiva (Cuevas-Bernardino et al., 2016).

Por otro lado para el parámetro p , Rao (1999) reportó que este tiende a un valor de $1-n$, donde n es el índice de flujo de la Ley de Potencia. Así, valores más altos

de p significan menores valores de n , y un comportamiento de adelgazamiento al corte más extensivo. Para todos los tratamientos los valores de p fueron menores de 1, indicando un comportamiento de adelgazamiento al corte, el cual puede ser considerado como resultado de modificaciones estructurales en la red macromolecular, lo cual significa que al incrementar la tasa de corte existe un rompimiento mayor en el número de enlaces e interacciones intermoleculares con respecto a la formación de nuevos enlaces, el esfuerzo aplicado obliga a que las moléculas se alineen en dirección al flujo y la viscosidad aparente disminuya (Cuevas-Bernardino et al., 2016).

Sin embargo, al día uno de almacenamiento puede notarse diferencia en los valores de p para Y y Y0.5 indicando un comportamiento de adelgazamiento al corte pronunciado en Y0.5 (valor mayor de p), mostrando que a medida que aumenta la concentración de pasta se mejora la resistencia al arrastre y la disipación de la viscosidad es mayor.

3.4.6.2 Propiedades viscoelásticas

Los barridos de deformación mostraron que tanto el porcentaje de pasta añadida, como el tiempo de almacenamiento afectaron la respuesta viscoelástica de las variantes de yogur. Las Figuras 9 y 10 muestran las variaciones en los valores de G' y G'' en función de la deformación aplicada al día uno y veintiuno respectivamente. Los valores del módulo elástico (G') para ambos periodos de almacenamiento indicaron que los yogures presentaron una región viscoelástica lineal (RVL) a bajos porcentajes de deformación (menor que 0.2%), caracterizada por un valor constante de G' donde se presentaron los valores más altos (Cuadro 6); seguida por una disminución pronunciada en sus valores a porcentajes de deformación mayores. Zhao et al. (2020) reportaron en yogures enriquecidos con β -1-3 glucanos que independientemente de la concentración (0.1% -0.5% p/p), todas las variantes eran estables en el intervalo viscoelástico lineal debido a la rápida recuperación de la estructura a bajas tasas de deformación; mientras que un tratamiento de deformación gradualmente creciente dio lugar a la disminución en los valores de G' .

Cuadro 12. Valores de los módulos de almacenamiento (G'), pérdida (G'') y factor de cedencia ($\tan\delta$) de los yogures en la región viscoelástica lineal

| Tratamiento | G' (Pa) | G'' (Pa) | Tan δ (Adim) | G' (Pa) | G'' (Pa) | Tan δ (Adim) |
|---------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|----------------|------------------------|
| Día uno de almacenamiento | | | Día veintiuno de almacenamiento | | | |
| Y ^Y | 12905 ± 7a,x ^Z | 2090 ± 14.1a,x | 0.2 ± 0.05b,x | 1800 ± 0.0a,y | 717 ± 16.3a,y | 0.4 ± 0.05c,y |
| Y0.1 | 14712 ± 17.7b,x | 2812 ± 95.5b,x | 0.16 ± 0.2a,x | 3105 ± 7.1b,y | 712 ± 9.2a,y | 0.22 ± 0.06a,y |
| Y0.3 | 15803 ± 5c,x | 3183 ± 4.95c,x | 0.19 ± 0.0a,x | 5180 ± 28.3d,y | 1170 ± 28.3c,y | 0.22 ± 0.08a,y |
| Y0.5 | 27675 ± 35.4d,x | 5237 ± 74.2d,x | 0.19 ± 0.06a,x | 3185 ± 7.1c,y | 910 ± 11.3b,y | 0.28 ± 0.03b,y |

^Z Medias seguidas con diferente letra (a,b,c,d en la misma fila) son significativamente diferentes ($p < 0.05$)

^Y Valores corresponden a media ± SD (n=3). Y: Control ; Y0.1, Y0.3 y Y0.5: Yogur con adición de 0.1%, 0.3% y 0.5% p/p de pasta de tejocote, respectivamente.

Al día uno de almacenamiento, los valores del módulo elástico (G') y viscoso (G'') en la RVL variaron de mayor a menor de la siguiente forma: Y0.5 > Y0.3 > Y0.1 > Y (Cuadro 6). Este comportamiento es comparable con el reportado por Zhao et al. (2020) en yogures enriquecidos con β -1-3 glucanos; donde se presentó un módulo de almacenamiento mayor al presentado por el control, sugiriendo que módulos de almacenamiento mayores, se atribuyen a una interacción sinérgica entre el ingrediente funcional con la red de proteína coagulada. Ban et al. (2020) mencionan que la actividad metabólica de las bacterias lácticas favorece la asociación de las micelas de caseína al disminuir el pH, generando un aumento en el módulo elástico durante la fermentación; lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación, ya que en el día uno las variantes con mayor acidez (menor pH y mayor porcentaje de ácido láctico) fueron los que exhibieron los valores mayores de G' (Figura 9).

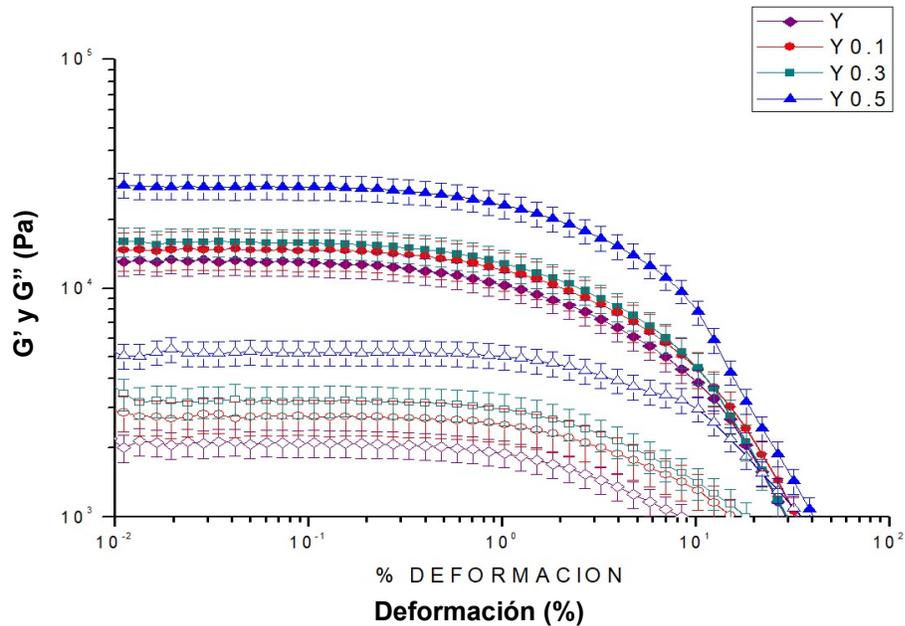


Figura 9. Variación de módulo de almacenamiento (G' símbolos sólidos) y pérdida (G'' símbolos vacíos) de las variantes de yogur al día uno de almacenamiento como función del porcentaje de deformación.

Debe destacarse, que los valores de G'' en la RVL fueron significativamente menores a los exhibidos por G' , indicando un comportamiento predominantemente elástico, característica típica en geles de yogur (Cruz et al., 2013). Khubber et al. (2021) informaron que las propiedades de G' predominaban en un yogur con adición de pectina de bajo metoxilo en comparación a G'' .

Al día veintiuno de almacenamiento, se encontraron valores significativamente menores de G' y G'' que variaron de mayor a menor de la siguiente forma $Y0.3 > Y0.5 > Y0.1 > Y$ (Cuadro 11, Figura 10). Los resultados de las propiedades viscoelásticas tienen una alta correlación con los resultados encontrados en las curvas de flujo de los yogures, donde $Y0.3$ presentó valores mayores de η_0 al día veintiuno de almacenamiento. En el intervalo de porcentaje de deformación 10^1 - 10^2 , los valores de G' fueron menores que G'' en los tratamientos Y y $Y0.5$ dando lugar a un punto de cruce (Figura 10); este comportamiento sugiere que conforme hubo un aumento en los porcentajes de deformación, se dio lugar a la ruptura en la estructura del gel. El punto de cruce está relacionado con el rompimiento de la

estructura original del yogur (Huang et al., 2021), por lo cual este valor corresponde al esfuerzo máximo que la muestra puede resistir.

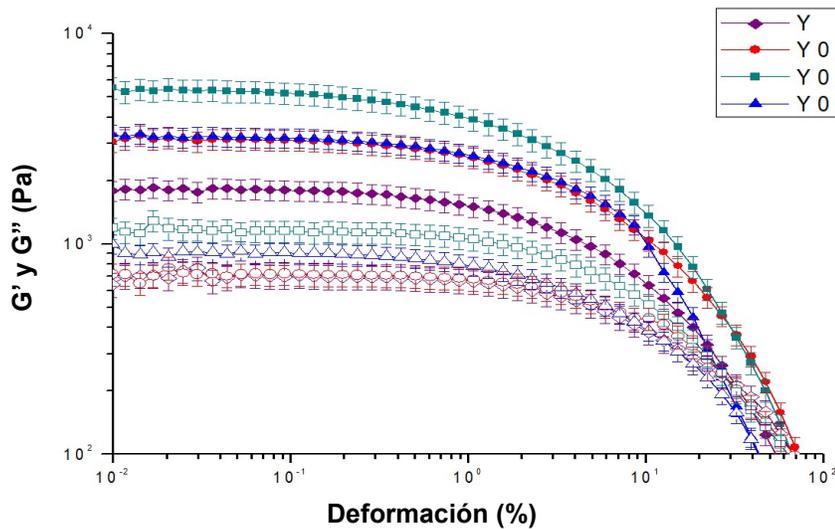


Figura 10. Variación de módulo de almacenamiento (G' símbolos sólidos) y pérdida (G'' símbolos vacíos) de las variantes de yogur al día veintiuno de almacenamiento como función del porcentaje de deformación.

El factor de cedencia ($\tan \delta$) es un parámetro útil para explicar el comportamiento viscoelástico del material; determina si la muestra tiene propiedades viscosas o elásticas. Un factor de cedencia mayor a 1 indica un comportamiento viscoso, mientras que un factor menor que 1 indica un comportamiento elástico (Rezaei et al., 2017). En la figura 11 se muestra la variación de $\tan \delta$ (G''/G') en los diferentes tratamientos en función del porcentaje de deformación y del tiempo de almacenamiento. Para todos los yogures en ambos períodos de almacenamiento se presentó una tendencia general, donde a porcentajes de deformación menores al 10 % se presentaron valores menores a 10^0 y casi constantes de $\tan \delta$; a porcentajes de deformación mayores del 10 % se presentó un incremento; sin embargo, predominaron valores menores que 1 durante ambos períodos de almacenamiento. Al respecto Costa et al. (2019) reportaron resultados comparables en variantes de yogur enriquecidos con prebióticos (GOS, XOS y

FOS), indicando que valores predominantes de $\text{Tan } \delta$ menores que 1 son indicativo de una red proteica bien estructurada con menor movilidad molecular, por tanto, los yogures presentaron características de un sólido más que de un líquido.

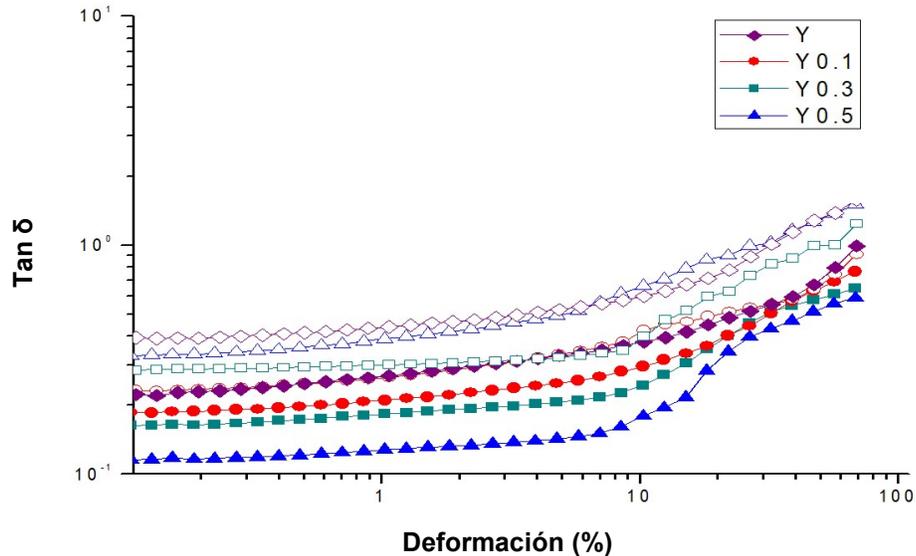


Figura 11. Variación de $\text{Tan } \delta$ al día uno (símbolos sólidos) y veintiuno (símbolos vacíos) de las variantes de yogur como función del porcentaje de deformación y tiempo de almacenamiento.

En ambos períodos de almacenamiento, se puede notar que Y mostró los valores más altos de $\text{Tan } \delta$ (0.2 ± 0.05 día 1, 0.4 ± 0.05 día 21) respecto de los tratamientos donde se adicionó pasta de tejocote; estos resultados indican que los enlaces en el tratamiento control (Y) son más susceptibles a la relajación favoreciendo la sinéresis (Arango et al., 2020).

Los valores de $\text{Tan } \delta$ en la región viscoelástica lineal (Cuadro 6) al día uno exhibieron diferencia significativa entre Y y los tratamientos con adición de pasta Y0.1, Y0.3 y Y0.5; sin embargo, no se encontró diferencia estadística significativa entre dichos tratamientos con pasta adicionada.

3.4.7 Análisis de microestructura de los yogures

El análisis de microestructura permite identificar las diferencias en la densidad del gel, la luz al atravesar las áreas de gel menos densas indica una red proteica más abierta; mientras que, cuando la zona es más oscura indica áreas de gel más compacto y densa lo cual impide el paso de la luz (Gilbert et al., 2020).

El grado de estructuración de los geles presentó una variación considerable en los distintos niveles de pasta de tejocote añadida. La micrografía del yogur control (Figura 12) presenta una red de menor tamaño ($4402 \pm 540 \mu\text{m}^2$) (menos áreas oscuras Figura 12) y dispersa con zonas ocupadas por lactosuero (zonas más claras); mientras que, en los yogures con adición de pasta, particularmente en los tratamientos Y0.1 y Y0.3 se observa una red de caseína más densa, compacta y con menos zonas ocupadas por lactosuero; sin embargo, la micrografía del tratamiento Y0.5 muestra una red de proteína menos compacta y densa que Y0.1 y Y0.3; al presentar una red más abierta se observan un mayor número de espacios ocupados por lactosuero, siendo un indicativo de una menor estructuración, resultado que se relaciona con los valores de sinéresis para este tratamiento. Como se ha mencionado, el aumento en la sinéresis de los yogures, reflejan un rompimiento o contracción en la matriz del gel y por consecuencia la liberación del lactosuero (Mori-Núñez et al., 2019). Desde el punto de vista reológico los resultados de microestructura se relacionan, ya que Y0.5 mostró una disminución en la viscosidad y el menor módulo de almacenamiento al día veintiuno, lo que nos indica una menor estructuración respecto de los demás tratamientos en donde fue añadida la pasta de tejocote.

Estudios similares, reportaron que las variantes de yogur enriquecidas con inulina desarrollaron una microestructura más compacta y densa con agregados de mayor tamaño en las muestras de yogur que contenían cantidades mayores de biopolímeros que la muestra control; observándose agregados formados por proteínas distribuidas uniformemente, glóbulos de grasa y cavidades con suero (Kwon et al., 2021).

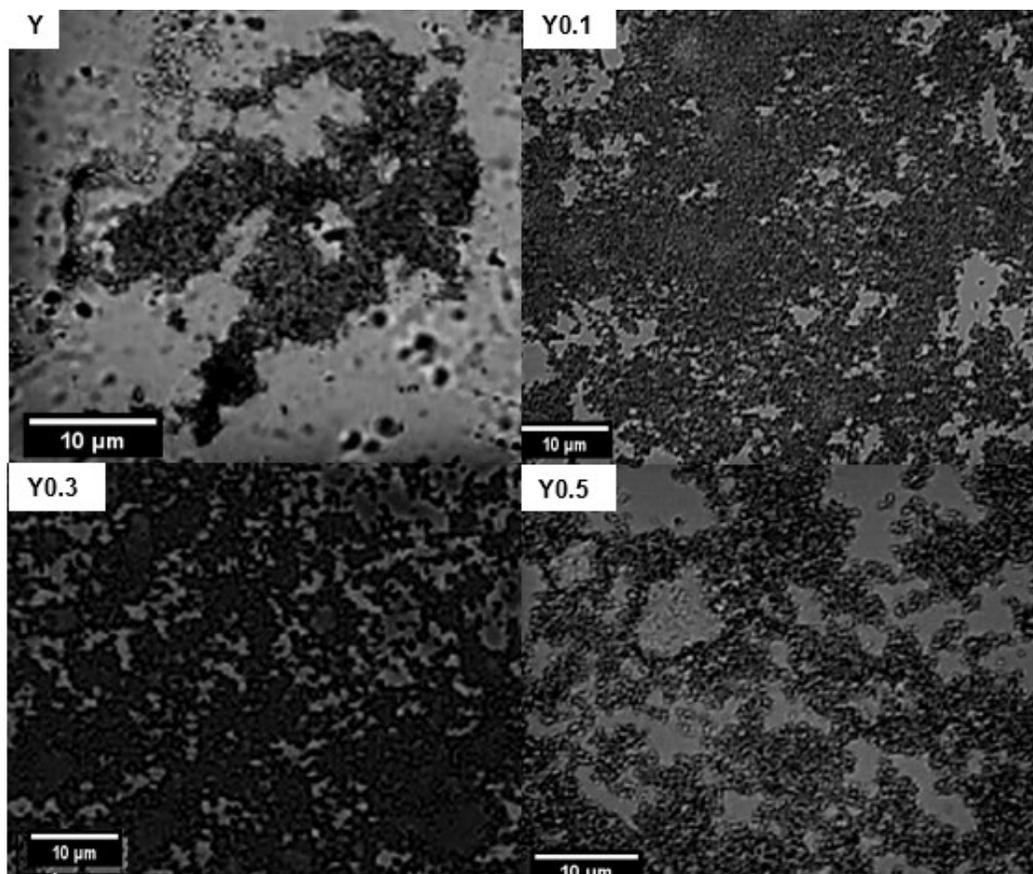


Figura 12. Micrografías de los yogures al día veintiuno de almacenamiento Mokoonlall et al. (2016) reportaron en yogur, la presencia de grupos de proteínas agregadas con tamaños entre 10-250 µm y en algunos casos mayores a 1 mm definiéndolos como microgeles. Por tanto, el análisis de imágenes de microgeles permite obtener parámetros importantes que ayudan en la caracterización de la microestructura del yogur, como son, superficie total ocupada, tamaño, índice de heterogeneidad (NIH) e índice de circularidad (Gilbert et al., 2020).

En la Figura 13 se muestran los resultados de la superficie total de microgeles y el número de microgeles por mL de yogur agrupados en diferentes tamaños de superficie ($<10^3$, 10^3 - 10^4) de acuerdo con lo descrito por Gilbert et al. (2020) en la caracterización de la microestructura de yogur batido mediante microscopía óptica y análisis de imágenes.

Los tratamientos Y y Y0.5 exhibieron los menores valores de área de microgeles, resultados que se relacionan con una red más abierta; seguidos de los tratamientos Y0.1 y Y0.3, los cuales exhiben un gel más denso indicando una mejor asociación entre los componentes de la pasta de tejocote con la red de proteína. En todos los tratamientos se encontraron microgeles de menor tamaño ($< 10^3 \mu\text{m}^2$) y microgeles de mayor tamaño ($10^3\text{-}10^4 \mu\text{m}^2$) siendo esta última la clasificación predominante para los cuatro tratamientos; sin embargo, Y0.3 exhibió el mayor número de microgeles de mayor tamaño ($10^3\text{-}10^4 \mu\text{m}^2$), por el contrario, los tratamientos Y y Y0.5 presentaron el menor número de microgeles en el orden de $10^3\text{-}10^4 \mu\text{m}^2$.

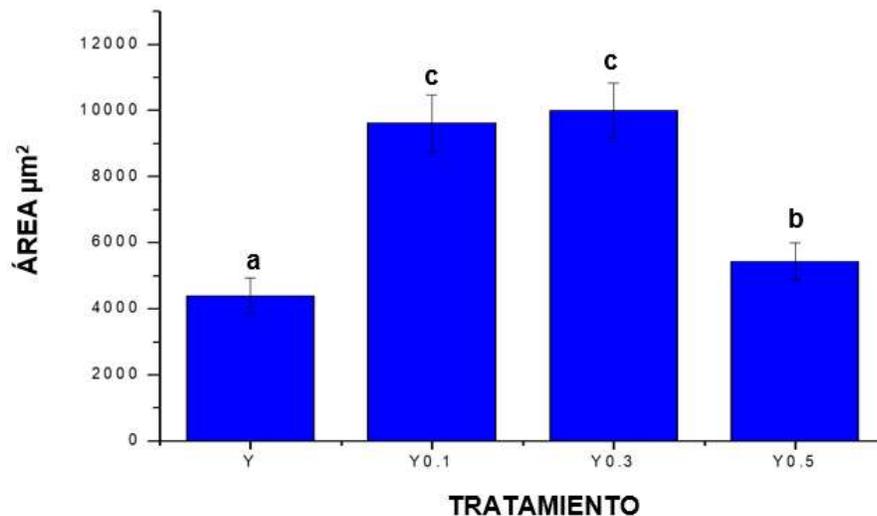


Figura 13. Superficie de microgeles

Gilbert et al. (2020) reportaron resultados comparables en la superficie total de microgeles; sin embargo, además de microgeles de tamaño $<10^3$ y $10^3\text{-}10^4$ evidenciaron microgeles de mayor dimensión a los encontrados en esta investigación ($> 10^5$); atribuyendo una correlación positiva entre la temperatura de termizado y tamaño de los microgeles, así también como al tiempo de almacenamiento.

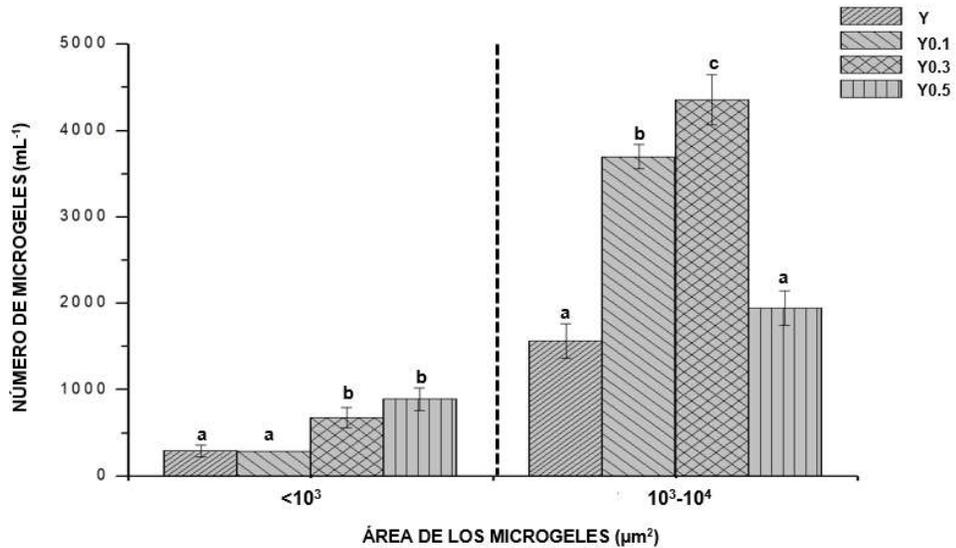


Figura 14. Tamaño de microgeles

En la Figura 15 se presenta el índice de heterogeneidad (NHI) de los yogures, el cual determina las diferencias en la densidad del gel en el área total, contribuyendo así a la caracterización de la apertura del gel (Gilbert et al., 2020). Se puede notar que, Y exhibió el mayor valor, seguido de Y0.5 y el menor valor lo presentaron los tratamientos Y0.1 y Y0.3. Los resultados obtenidos sugieren que la adición de pasta de tejocote influye positivamente en el grado de estructuración de la red de proteína, dando lugar a un gel más denso con menos espacios ocupados por lactosuero. Algunos componentes de la pasta de tejocote como la pectina, se adsorben a la superficie de las micelas de caseína protegiéndolas de la precipitación, formando capsulas de forma esférica rodeadas de pectina y por consecuencia se proporciona un reforzamiento en la estructura del gel (Sandoval-Castilla et al., 2004).

Gilbert et al. (2020) reportaron valores comparables de NIH en yogures batidos (10 - 17). Valores mayores de NHI son indicativos de redes de proteína menos densas con un mayor número de áreas con suero; por el contrario, valores menores indican la presencia de un gel con incrustaciones de microgeles que reducen el espacio ocupado por el lactosuero.

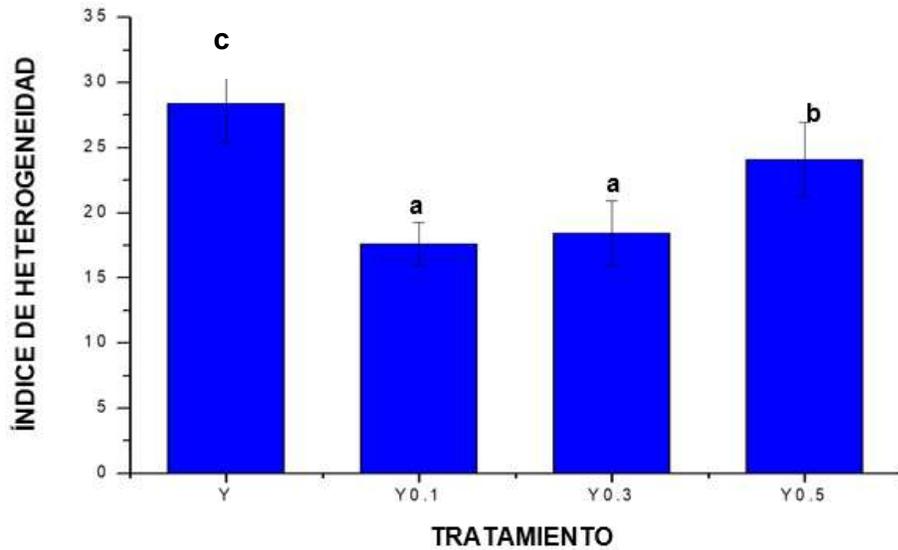


Figura 15. Índice de heterogeneidad de los yogures

El

análisis de imágenes por medio de microscopía óptica proporciona información del gel a través del índice de circularidad, el cual varía de 0 (forma irregular) a 1 (círculo perfecto) (Gilbert et al., 2020). La adición de pasta de tejocote afectó el índice de circularidad (Figura 16) generando un aumento de dicho índice en el

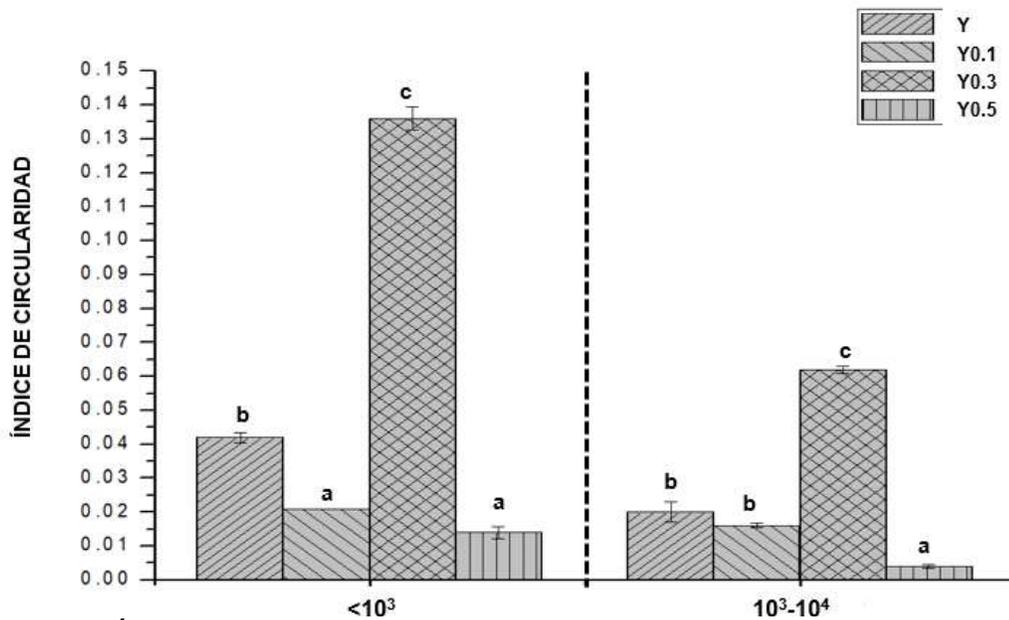


Figura 16. Índice de circularidad

tratamiento Y0.3; al observarse una disminución de este parámetro conforme se incrementa el área del tamaño del microgel, comportamiento reportado por Gilbert et al. (2020) quienes indicaron que microgeles de mayor dimensión (valores mayores a 10^3) muestran una superficie irregular comparados con los microgeles de menor tamaño. Esta diferencia puede ser explicada debido al fenómeno de agregación que ocurre durante la fermentación del yogur al promoverse la formación de estructuras no esféricas debido a la agregación de microgeles primarios con formas irregulares.

Los índices de circularidad encontrados en esta investigación son menores a los reportados por Gilbert et al. (2020), resultados que sugieren que la incorporación de la pasta de tejocote tiene un efecto sobre la formación de agregados irregulares afectando el índice de circularidad.

3.4.8 Análisis de actividad antioxidante

La actividad captadora del radical libre DPPH (2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo) se utiliza ampliamente para evaluar la actividad antioxidante, debido a su simplicidad, rapidez, sensibilidad, y reproducibilidad en comparación con otros métodos (Zhang, 2011). DPPH es un radical libre estable que adquiere propiedades diamagnéticas (electrones emparejados) al neutralizarse. El radical tiene un color violeta intenso con una fuerte absorbancia centrada en 520 nm, el DPPH se vuelve incoloro o amarillo pálido cuando se neutraliza, este cambio de color está directamente relacionado con la capacidad antioxidante de la muestra (Parolia et al., 2022).

En la Figura 17 se muestra la actividad antioxidante de los yogures expresado como porcentaje de inhibición del radical DPPH respecto del control. La actividad captadora de radicales DPPH de los yogures que contenían pasta de tejocote después de un día de almacenamiento fue significativamente mayor respecto del control, variando de la siguiente manera $Y0.5 > Y0.3 = Y0.1 > Y$. Los resultados obtenidos son similares a los evidenciados por W-Y Cho et al. (2020), quienes informaron que la actividad antioxidante en los yogures se correlaciona con los

compuestos fenólicos del ingrediente funcional adicionado; lo cual explica el incremento de la actividad antioxidante conforme se incrementa el porcentaje del ingrediente funcional añadido. Aguilar-Méndez et al. (2020) reportaron que las diferencias en la actividad secuestradora de los radicales libres se atribuyen a las características estructurales de los compuestos bioactivos, los cuales determinan la habilidad de donar electrones; atribuyendo la actividad antioxidante del tejocote a la estructura y disposición de los grupos hidroxilo en los flavonoides que contiene el fruto.

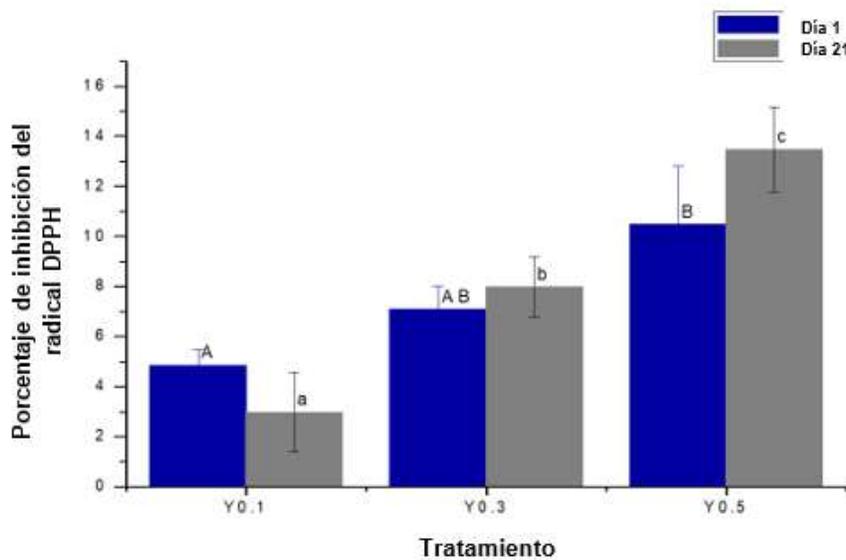


Figura 17. Incremento en el porcentaje de inhibición del radical DPPH de las variantes de yogur respecto del control durante el almacenamiento en frío a 4°C

Durante el almacenamiento, no se presentó una disminución significativa de la actividad captadora de radicales DPPH, comportamiento que es similar al reportado en yogures enriquecidos con extracto de hoja de olivo (W-Y Cho et al., 2020). Jaster et al. (2018) reportaron este mismo comportamiento en yogures enriquecidos con pulpa de fresa destacando el mantenimiento de la actividad

durante el almacenamiento. Oh et al. (2016) reportaron que la mayor actividad antioxidante en yogures suplementados al final del almacenamiento se explica por los contenidos fitoquímicos de los suplementos adicionados en los yogures y de las actividades metabólicas microbianas..

3.4.9 Evaluación sensorial

Las propiedades sensoriales de los alimentos están fuertemente relacionadas con las preferencias del consumidor y pueden determinar la aceptación del producto (Kim et al., 2020). La evaluación sensorial proporciona índices cuantitativos para atributos que son importantes en el yogur como el sabor, textura y apariencia, los cuales determinan en gran proporción la aceptabilidad global desde el punto de vista del consumidor. Las investigaciones han descubierto que el sabor es el principal criterio que afecta la aceptación, en general, los consumidores no están interesados en derivados lácteos enriquecidos si estos confieren sabores desagradables al producto final (Ghasempour et al., 2020).

Los parámetros sensoriales evaluados de los yogures se muestran en el Cuadro 12. Para el atributo de aroma se obtuvieron puntuaciones que no fueron estadísticamente diferentes ($p > 0.05$) para todas las variantes de yogur; resultados similares fueron reportados por Sengül et al. (2014) donde en la evaluación sensorial de yogures con adición de pulpa de fresa, estos no exhibieron diferencias estadísticas significativas en los atributos de color, apariencia y aroma.

En las puntuaciones de apariencia se presentaron valores estadísticamente superiores para Y0.3 y Y0.1, los cuales no difirieron estadísticamente entre ellos; esta misma tendencia se presentó para la cremosidad; Feng et al. (2019) indicaron que la adición de pulpa de *Zizyphus jujuba* puede mantener una adecuada textura en el yogur. Por otro lado, se ha reportado que el enriquecimiento del yogur con ingredientes que contienen fibra mejoran la capacidad de retención de agua y viscosidad; sin embargo, a ciertos niveles de enriquecimiento, sensorialmente se pueden relacionar con la granulosis y una

inadecuada sensación en la boca producida por las partículas insolubles (Ardabilchi Marand et al., 2020).

Cuadro 13. Valores de la prueba de aceptabilidad global de los yogures

| Atributo | Tratamientos (concentración %p/p) | | | |
|----------------------|-----------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| | Y ^Y | Y0.1 | Y0.3 | Y0.5 |
| Aroma | 3.2 ± 1.2 a ^z | 3.5 ± 1.2 a | 3.4 ± 1.2 a | 3.2 ± 1.2 a |
| Apariencia | 3 ± 1.3 b | 3.6 ± 1.0 c | 3.8 ± 1.1 c | 2.4 ± 0.7 a |
| Cremosidad | 2.5 ± 1.2 a | 3.5 ± 1.3 b | 3.6 ± 1.2 b | 2.7 ± 0.9 a |
| Acidez | 3.7 ± 1.3 c | 3.5 ± 1.4 c | 3.3 ± 1.2 b | 2.1 ± 1 a |
| Granulosidad | 3.5 ± 1.1 c | 3.2 ± 1.3 cb | 2.8 ± 1.2 b | 2.2 ± 1.2 a |
| Sabor | 2.5 ± 1.1 a | 3.5 ± 1.1 c | 4.2 ± 0.7 b | 2.2 ± 1.3 a |
| Sabor residual | 2.9 ± 1.3 b | 3.3 ± 1 c | 2.9 ± 1.2 c | 2 ± 1 a |
| Aceptabilidad global | 3.4 ± 1.3 a | 4 ± 0.8 b | 4.1 ± 0.7 b | 3.2 ± 1.4 a |

^z Medias seguidas con diferente letra (a,b,c,d en la misma fila) son significativamente diferentes (p < 0.05)

^Y Valores corresponden a media ± SD (n=3). Y: Control ; Y0.1, Y0.3 y Y0.5: Yogur conteniendo 0.1%, 0.3% y 0.5% p/p de pasta de tejocote, respectivamente.

Para la acidez, Y y Y0.1 presentaron la mayor puntuación, seguidos de Y0.3, el tratamiento con la menor puntuación significativa fue . Al respecto, resultados en estudios similares indican que yogures adicionados con linaza, presentaron una acidez menor y mayores valores en la puntuación por parte del panel sensorial; dichos valores se relacionan con la reducción del aroma a acetaldehído en las muestras (Ardabilchi Marand et al., 2020).

Por otro lado, Y y Y0.1 presentaron la mayor puntuación para granulosidad, seguida del tratamiento Y0.3 y el menor puntaje lo presentó Y0.5; estos resultados son congruentes con los reportados por Espírito-Santo et al. (2013), quienes reportaron puntuaciones más altas para yogures naturales respecto de los tratamientos complementados con fibra de frutas; estos mismos autores indican que la evaluación de granulosidad no solo puede atribuirse a la cantidad de fibra de fruta adicionada en los yogures, sino a la microestructura de la fibra adicionada, dado que fibras de forma esférica y lisa son menos perceptibles por el consumidor.

Para el atributo sabor, el tratamiento Y0.1 exhibió las mayores puntuaciones y el menor Y0.5 y Y . Kim et al. (2020) indican que el sabor se detecta por la acción

combinada de papilas gustativas y receptores olfativos, este atributo está fuertemente relacionado a las preferencias del consumidor. Puntuaciones para sabor residual indicaron que el tratamiento Y0.5 obtuvo el menor valor estadísticamente significativo (2.2 ± 1.2), resultados que se relacionan con los obtenidos en el parámetro sabor.

Los resultados obtenidos para aceptabilidad global, indicaron que Y0.1 y Y0.3 tuvieron mayor aceptabilidad exhibiendo las mayores calificaciones, respecto de Y0.5 y Y; estos hallazgos son comparables por los reportados por Senadeera et al. (2018) quienes reportaron mayores puntuaciones en aceptabilidad global para yogures con adición de pulpa de guanábana respecto del tratamiento control; estos autores informan que la adición de materiales a base de frutas podría conducir a un mayor contenido de azúcar natural en el yogur generando una mayor aceptabilidad por parte del consumidor.

Por otro lado, el análisis de componentes principales (ACP) es una de las técnicas estadísticas que se aplica a la evaluación sensorial de los alimentos (Feng et al., 2019). El análisis de componentes se utilizó para evaluar las características sensoriales de los yogures elaborados (Figura 18), en donde el primer componente (PC1) explicó el 69 % de la varianza total y el segundo componente (PC2) el 25 %. En el primer componente (PC1), se observó correlación positiva con todos los atributos evaluados (Cuadro14); mientras que para el segundo componente los atributos aroma, cremosidad y sabor mostraron una correlación negativa en el segundo componente.

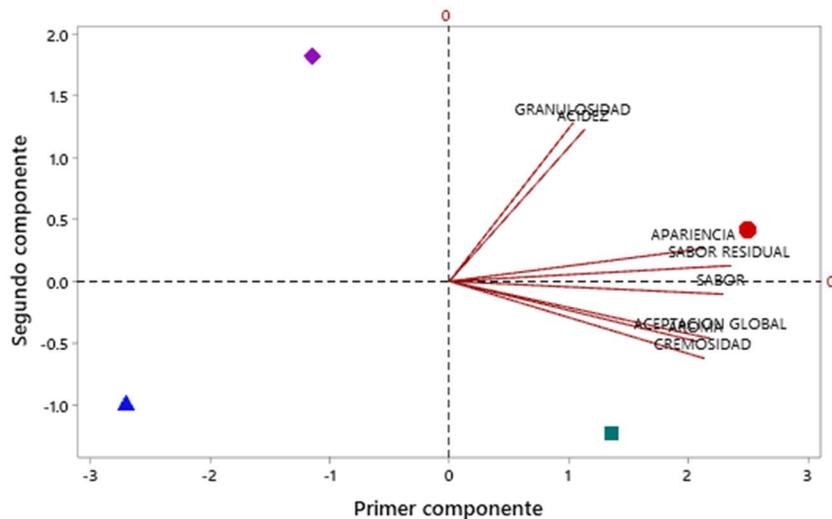


Figura 18. Análisis de componentes principales de los yogures, Y(◆), Y0.1(●), Y0.3(■), Y0.5(▲)

En la Figura 18 se observa que el yogur Y0.1 fue preferido por sus atributos de apariencia, sabor, sabor residual, granulosidad y acidez; mientras que el tratamiento Y0.3 fue preferido por atributos de cremosidad y aroma. Mientras que los tratamientos Y0.5 y Y no exhibieron ninguna preferencia respecto a los atributos sensoriales evaluados.

Los resultados sugieren que el sabor y sabor residual fueron el máximo efecto en el componente 1; mientras que la acidez y la granulosidad lo tuvieron en el segundo componente (Cuadro 14).

Cuadro 14. Vectores propios

| Variable | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 | PC6 | PC7 | PC8 |
|----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Aroma | 0.370 | -0.240 | -0.548 | 0.213 | 0.242 | -0.538 | -0.079 | -0.323 |
| Apariencia | 0.382 | 0.131 | 0.620 | -0.174 | -0.223 | -0.609 | -0.022 | 0.026 |
| Cremosidad | 0.380 | -0.307 | 0.079 | 0.322 | -0.529 | 0.326 | 0.417 | -0.301 |
| Acidez | 0.203 | 0.608 | -0.248 | -0.263 | 0.139 | 0.003 | 0.661 | -0.036 |
| Granulosidad | 0.185 | 0.633 | 0.009 | 0.301 | -0.104 | 0.216 | -0.516 | -0.388 |
| Sabor | 0.409 | -0.051 | -0.393 | -0.515 | -0.400 | 0.165 | -0.329 | 0.340 |
| Sabor residual | 0.421 | 0.063 | 0.070 | 0.513 | 0.296 | 0.121 | 0.017 | 0.669 |

Aceptación global 0.392 -0.230 0.296 -0.364 0.578 0.379 -0.082 -0.299

3.5 CONCLUSIONES

La pasta de tejocote actuó como ingrediente funcional en el proceso de fermentación del yogur por su carácter ácido, contenido de azúcares y fenoles totales presentados; debido a que las formulaciones con adición de pasta tuvieron una reducción en el tiempo de acidificación durante el proceso de manufactura.

La incorporación de pasta de tejocote incrementó la acidez y disminuyó la sinéresis presentada por los yogures. Las propiedades mecánicas de los yogures mejoraron al adicionar la pasta de tejocote; donde, Y0.3 exhibió los valores más altos de viscosidad y módulo de almacenamiento (G') al día veintiuno. En concordancia con estos resultados, en el análisis de microestructura Y0.1 y Y0.3 exhibieron el nivel de agregación más compacto con menor índice de heterogeneidad.

Con respecto a la actividad antioxidante Y0.3 y Y0.5 presentaron los mayores porcentajes de inhibición del radical DPPH durante los veintidós días de almacenamiento. Los resultados de la evaluación sensorial indicaron que Y0.1 y Y0.3 mostraron la mayor aceptabilidad global.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que la pasta de tejocote puede ser empleada como ingrediente funcional en productos lácteos fermentados como el yogur batido.

3.6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México por la beca de la estudiante de maestría.

3.7 LITERATURA CITADA

- Abdel-Hamid, M., Romeih, E., Huang, Z., Enomoto, T., Huang, L., & Li, L. (2020). Bioactive properties of probiotic set-yogurt supplemented with *Siraitia grosvenorii* fruit extract. *Food Chemistry*, 303, 125400. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125400>
- Aguilar-Méndez, M. A., Quiroz-Reyes, C. N., Ronquillo-de Jesús, E., & Robles-Botero, M. V. (2020). Caracterización e identificación de compuestos bioactivos con actividad antioxidante de la cáscara, pulpa y semilla del fruto de tejocote (*Crataegus mexicana*). *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23(1), 1-10.
- Aparco, R. H., Pardo, F. T., & Laime, M. d. C. D. (2021). Fortificación de yogurt con hierro hémico y su aceptación en niños del sector rural de la región Apurímac. *Manglar*, 18(2), 117-122.
- Arango, O., Trujillo, A. J., & Castillo, M. (2020). Influence of fat substitution by inulin on fermentation process and physical properties of set yoghurt evaluated by an optical sensor. *Food and Bioproducts Processing*, 124, 24-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.07.020>
- Ardabilchi Marand, M., Amjadi, S., Ardabilchi Marand, M., Roufegarinejad, L., & Jafari, S. M. (2020). Fortification of yogurt with flaxseed powder and evaluation of its fatty acid profile, physicochemical, antioxidant, and sensory properties. *Powder Technology*, 359, 76-84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.082>
- Association of Analytical Communities (AOAC) (1995). Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemist. EUA
- Ban, Q., Liu, Z., Yu, C., Sun, X., Jiang, Y., Cheng, J., & Guo, M. (2020). Physiochemical, rheological, microstructural, and antioxidant properties of yogurt using monk fruit extract as a sweetener. *Journal of Dairy Science*, 103(11), 10006-10014. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2020-18703>
- Cakmakci, S., Tahmas-Kahyaoglu, D., Erkaya, T., Cebi, K., & Hayaloglu, A. A. (2014). β -Carotene Contents and Quality Properties of Set Type Yoghurt Supplemented with Carrot Juice and Sugar. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(3), 1155-1163. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12075>
- Cho, W.-Y., Kim, D.-H., Lee, H.-J., Yeon, S.-J., & Lee, C.-H. (2020). Quality characteristic and antioxidant activity of yogurt containing olive leaf hot water extract. *CYTA: journal of food*, 18(1), 43-50. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1640797>

- Cho, W. Y., Hwa, S. H., Yang, F., & Lee, C. H. (2020). Quality Characteristics and Antioxidant Activity of Yogurt Containing Raw Omija and Sugared Omija during Storage [Article]. *Journal of Chemistry*, 2020, 7, Article 1274591. <https://doi.org/10.1155/2020/1274591>
- Coronel-Aguilera, C. P., & San Martín-González, M. F. (2015). Encapsulation of spray dried β -carotene emulsion by fluidized bed coating technology. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1, Part 1), 187-193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.12.036>
- Costa, M. F., Pimentel, T. C., Guimaraes, J. T., Balthazar, C. F., Rocha, R. S., Cavalcanti, R. N., . . . Cruz, A. G. (2019). Impact of prebiotics on the rheological characteristics and volatile compounds of Greek yogurt. *LWT*, 105, 371-376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.007>
- Crispín-Isidro, G., Hernández-Rodríguez, L., Ramírez-Santiago, C., Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., & Vernon-Carter, E. J. (2019). Influence of purification on physicochemical and emulsifying properties of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seed gum. *Food Hydrocolloids*, 93, 402-412. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.046>
- Cruz, A. G., Cavalcanti, R. N., Guerreiro, L. M. R., Sant'Ana, A. S., Nogueira, L. C., Oliveira, C. A. F., . . . Bolini, H. M. A. (2013). Developing a prebiotic yogurt: Rheological, physico-chemical and microbiological aspects and adequacy of survival analysis methodology. *Journal of Food Engineering*, 114(3), 323-330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.018>
- Cuevas-Bernardino, J. C., Lobato-Calleros, C., Román-Guerrero, A., Alvarez-Ramirez, J., & Vernon-Carter, E. J. (2016). Physicochemical characterisation of hawthorn pectins and their performing in stabilising oil-in-water emulsions. *Reactive and Functional Polymers*, 103, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.03.024>
- De la Cruz, M., E., M. (2014). Estudios de los flavonoides de diez genotipos de tejocote (*Crataegus pubescens*) y su potencial como alimento funcional. In (http://sappi.ipn.mx/cgpi/archivos_anexo/20071499_5082.pdf ed.).
- del Pilar Pinzón, I. M., Fischer, G., & Corredor, G. (2007). Determinación de los estados de madurez del fruto de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims.). *Agronomía Colombiana*, 25(1), 83-95.
- do Espírito Santo, A. P., Cartolano, N. S., Silva, T. F., Soares, F. A. S. M., Gioielli, L. A., Perego, P., . . . Oliveira, M. N. (2012). Fibers from fruit by-products enhance probiotic viability and fatty acid profile and increase CLA content

in yoghurts. *International Journal of Food Microbiology*, 154(3), 135-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.12.025>

Díaz Jiménez, B., Sosa Morales, M. E., & Vélez Ruiz, J. F. (2004). Efecto de la adición de fibra y la disminución de grasa en las propiedades fisicoquímicas del yogur. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 3(3), 287-305. (IN FILE)

Estrada, J. D., Boeneke, C., Bechtel, P., & Sathivel, S. (2011). Developing a strawberry yogurt fortified with marine fish oil1. *Journal of Dairy Science*, 94(12), 5760-5769. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2011-4226>

Feng, C., Wang, B., Zhao, A., Wei, L., Shao, Y., Wang, Y., . . . Zhang, F. (2019). Quality characteristics and antioxidant activities of goat milk yogurt with added jujube pulp. *Food Chemistry*, 277, 238-245. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.104>

Franco-Mora, O., Aguirre-Ortega, S., Morales-Rosales, E. J., González-Huerta, A., & Gutiérrez-Rodríguez, F. (2010). Caracterización morfológica y bioquímica de frutos de tejocote (*Crataegus mexicana* DC.) de Lerma y Ocoyoacac, México. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 17(1), 61-66. (IN FILE)

García-Mateos, R., Ibarra-Estrada, E., & Nieto-Angel, R. (2013). Antioxidant compounds in hawthorn fruits (*Crataegus* spp.) of Mexico. *Revista mexicana de biodiversidad*, 84, 1298-1304.

Ghasempour, Z., Javanmard, N., Mojaddar Langroodi, A., Alizadeh-Sani, M., Ehsani, A., & Moghaddas Kia, E. (2020). Development of probiotic yogurt containing red beet extract and basil seed gum; techno-functional, microbial and sensorial characterization. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29, 101785. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101785>

Gilbert, A., Rioux, L.-E., St-Gelais, D., & Turgeon, S. (2020). Studying stirred yogurt microstructure using optical microscopy: How smoothing temperature and storage time affect microgel size related to syneresis. *Journal of Dairy Science*, 103. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16787>

González Jiménez, F. E. (2018). Obtención y caracterización de fracciones polifenólicas de la pulpa y pectina de tejocote (*Crataegus pubescens*) para su aprovechamiento en el desarrollo de un recubrimiento nutracéutico.

- Guimaraes, D. H. P., Iodelis, A., & Aguiar, L. F. S. (2016). Análisis de los Parámetros Reológicos y Sensoriales de Yogur de Guayaba Enriquecido con Cereales. *Revista de Ciencia y Tecnología*.
- Guénard-Lampron, V., Villeneuve, S., St-Gelais, D., & Turgeon, S. L. (2020). Relationship between smoothing temperature, storage time, syneresis and rheological properties of stirred yogurt. *International Dairy Journal*, 109, 104742. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104742>
- Hernández, A. V., Veloz, C. S., Ángel, R. N., Guzmán, M. E. R., & Reyes, D. S. (2015). COMPORTAMIENTO PRE Y POSTCOSECHA DE FRUTOS DE DOS ACCESIONES DE TEJOCOTE (*Crataegus* spp.). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(2), 240-248.
- Hernández-Rodríguez, L., Lobato-Calleros, C., Ramírez-Santiago, C., Rodríguez-Huezo, M. E., & Meraz, M. (2017). MICROSTRUCTURE AND RHEOLOGY OF YOGURT ADDED WITH PROTEIN-L. plantarum-POLYSACCHARIDE COACERVATE AND STEVIA IN SUBSTITUTION OF MILK-FAT AND SUCROSE. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), 77-89. (IN FILE)
- Huang, T., Tu, Z., Shangguan, X., Wang, H., Zhang, L., & Bansal, N. (2021). Characteristics of fish gelatin-anionic polysaccharide complexes and their applications in yoghurt: Rheology and tribology. *Food Chemistry*, 343, 128413. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128413>
- Inostroza, L. A., Castro, A. J., Hernández, E. M., Carhuapoma, M., Yuli, R. A., Collado, A., & Córdova, J. S. (2015). Actividad antioxidante de *Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón (mashua) y su aplicación como colorante para yogur. *Ciencia e Investigación*, 18(2), 83-89.
- Jaster, H., Arend, G. D., Rezzadori, K., Chaves, V. C., Reginatto, F. H., & Petrus, J. C. C. (2018). Enhancement of antioxidant activity and physicochemical properties of yogurt enriched with concentrated strawberry pulp obtained by block freeze concentration. *Food Research International*, 104, 119-125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.006>
- Khubber, S., Chaturvedi, K., Thakur, N., Sharma, N., & Yadav, S. K. (2021). Low-methoxyl pectin stabilizes low-fat set yoghurt and improves their physicochemical properties, rheology, microstructure and sensory liking. *Food Hydrocolloids*, 111, 106240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106240>
- Kim, S. Y., Hyeonbin, O., Lee, P., & Kim, Y.-S. (2020). The quality characteristics, antioxidant activity, and sensory evaluation of reduced-fat yogurt and nonfat yogurt supplemented with basil seed gum as a fat

- substitute. *Journal of Dairy Science*, 103(2), 1324-1336. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2019-17117>
- Kwon, H. C., Bae, H., Seo, H. G., & Han, S. G. (2019). Short communication: Chia seed extract enhances physiochemical and antioxidant properties of yogurt. *Journal of Dairy Science*, 102(6), 4870-4876. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2018-16129>
- Kwon, S.-H., Kothari, D., Jung, H.-I., Lim, J.-M., Kim, W.-L., Kwon, H.-C., . . . Kim, S.-K. (2021). Noni juice-fortified yogurt mitigates dextran sodium sulfate-induced colitis in mice through the modulation of inflammatory cytokines. *Journal of Functional Foods*, 86, 104652. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104652>
- Linares-García, J. A., Ramos-Ramírez, E. G., & Salazar-Montoya, J. A. (2015). Viscoelastic properties and textural characterisation of high methoxyl pectin of hawthorn (*Crataegus pubescens*) in a gelling system. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(6), 1484-1493. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12792>
- López, A., & Di Sarli, A. R. (2016). El modelo CIELAB, las fórmulas de diferencia de color y el uso de la norma europea EN 12878 en morteros y hormigones coloreados. *Ciencia y tecnología de los materiales*.
- Macedo y Ramírez, R. C., & Vélez-Ruíz, J. F. (2015). Propiedades Fisicoquímicas y de Flujo de un Yogur Asentado Enriquecido con Microcápsulas que Contienen Ácidos Grasos Omega 3. *Información tecnológica*, 26, 87-96.
- Mokoonlall, A., Nöbel, S., & Hinrichs, J. (2016). Post-processing of fermented milk to stirred products: Reviewing the effects on gel structure. *Trends in Food Science & Technology*, 54, 26-36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.05.012>
- Mori Núñez, C. L., de Industria, E. P. d. I., & Núñez Saavedra, C. (2019). Efecto de la carragenina y sacarosa en la capacidad de retención de agua y sinéresis de yogur.
- Ng, S. B. X., Nguyen, P. T. M., Bhandari, B., & Prakash, S. (2018). Influence of different functional ingredients on physical properties, rheology, tribology, and oral perceptions of no fat stirred yoghurt [Article]. *Journal of Texture Studies*, 49(3), 274-285. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12307>
- Nieto-Ángel, R., Pérez-Ortega, S. A., Núñez-Colín, C. A., Martínez-Solís, J., & González-Andrés, F. (2009). Seed and endocarp traits as markers of the biodiversity of regional sources of germplasm of tejocote (*Crataegus* spp.)

- from Central and Southern Mexico. *Scientia Horticulturae*, 121(2), 166-170.
- Oh, N. S., Lee, J. Y., Joung, J. Y., Kim, K. S., Shin, Y. K., Lee, K.-W., . . . Kim, Y. (2016). Microbiological characterization and functionality of set-type yogurt fermented with potential prebiotic substrates *Cudrania tricuspidata* and *Morus alba* L. leaf extracts. *Journal of Dairy Science*, 99(8), 6014-6025. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2015-10814>
- Pacheco, Y. E. G., Stand, L. I. M., Pinto, N. G. M., Obeso, M. A. C., & Botero, L. A. (2021). Efecto de la inclusión de hojas de amaranto (*Amaranthus dubius*) en las propiedades de un yogurt frutado. *INGE CUC*, 17(1).
- Paredes, J., Hernández, R., & Cañizares, A. (2015). Efecto del grado de madurez sobre las propiedades fisicoquímicas de pectinas extraídas de cascos de guayaba (*Psidium guajava* L.). *Idesia (Arica)*, 33(3), 35-41.
- Parolia, S., Maley, J., Sammynaiken, R., Green, R., Nickerson, M., & Ghosh, S. (2022). Structure – Functionality of lentil protein-polyphenol conjugates. *Food Chemistry*, 367, 130603. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130603>
- Parra, R. A. (2014). Physicochemical, sensory, proximal and microbiological characteristics of yoghurt with chocolate in refrigeration. *Revista Temas Agrarios*, 19(2), 146-158.
- Raikos, V., Grant, S., Hayes, H., & Ranawana, V. (2018). Use of β -glucan from spent brewer's yeast as a thickener in skimmed yogurt: Physicochemical, textural, and structural properties related to sensory perception. *Journal of Dairy Science*, 101. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14261>
- Ramirez-Santiago, C., Ramos-Solis, L., Lobato-Calleros, C., Peña-Valdivia, C., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramírez, J. (2010). Enrichment of stirred yogurt with soluble dietary fiber from *Pachyrhizus erosus* L. Urban: Effect on syneresis, microstructure and rheological properties. *Journal of Food Engineering*, 101(3), 229-235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.023>
- Rezaei, R., Khomeiri, M., Kashaninejad, M., Aalami, M., & Mazaheri-Tehrani, M. (2017). Steady and dynamic rheological behaviour of frozen soy yogurt mix affected by resistant starch and β -glucan. *International Journal of Food Properties*, 20(sup3), S2688-S2695. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1397692>
- Robles-Botero, M. V., Ronquillo-de Jesús, E., Quiroz-Reyes, C. N., & Aguilar-Méndez, M. A. (2020). Caracterización e identificación de compuestos

bioactivos con actividad antioxidante de la cáscara, pulpa y semilla del fruto de tejocote (*Crataegus mexicana*). *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 23.

- Rojas-Castro, W. N., Chacón-Villalobos, A., & Pineda-Castro, M. L. (2007). Características del yogurt batido de fresa derivadas de diferentes proporciones de leche de vaca y cabra. *Agronomía Mesoamericana*, 18(2), 221-237. (IN FILE)
- Ruiz Rivera, J. A., & Ramírez Matheus, A. O. (2009). Elaboración de yogurt con probióticos (*Bifidobacterium* spp. y *Lactobacillus acidophilus*) e inulina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 26, 223-242.
- Sah, B. N. P., Vasiljevic, T., McKechnie, S., & Donkor, O. N. (2016). Effect of pineapple waste powder on probiotic growth, antioxidant and antimutagenic activities of yogurt. *Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 1698-1708. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2100-0>
- Salinas Moreno, Y., Rubio Hernández, D., & Díaz Velázquez, A. (2005). Extracción y uso de pigmentos del grano de maíz (ZEA MAYS L.) como colorantes en yogur. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 55(3), 293-298.
- Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E., & Vernon-Carter, E. J. (2004). Microstructure and texture of yogurt as influenced by fat replacers. *International Dairy Journal*, 14(2), 151-159.
- Santillan, E., & Ruiz, J. F. V. (2019). Evaluación de propiedades fisicoquímicas y físicas de dos alimentos lácteos (yogur y queso) enriquecidos con nanopartículas de Ca, Fe y Zn. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 6(1), 52-80.
- Senadeera, S. S., Prasanna, P. H. P., Jayawardana, N. W. I. A., Gunasekara, D. C. S., Senadeera, P., & Chandrasekara, A. (2018). Antioxidant, physicochemical, microbiological, and sensory properties of probiotic yoghurt incorporated with various *Annona* species pulp. *Heliyon*, 4(11), e00955. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00955>
- Simanca, M. M., Andrade, R. D., & Arteaga, M. R. (2013). Efecto del Salvado de Trigo en las Propiedades Fisicoquímicas y Sensoriales del Yogurt de Leche de Búfala. *Información tecnológica*, 24, 79-86.
- Sánchez Moreno, A. E. (2018). Efecto de la adición de harina de melloco (*Ullucus Tuberosus*) variedad amarillo (INIAP-Quillu) en las propiedades fisicoquímicas y reológicas del yogurt bajo en grasa.

- Tavakoli, M., Habibi Najafi, M. B., & Mohebbi, M. (2019). Effect of the milk fat content and starter culture selection on proteolysis and antioxidant activity of probiotic yogurt. *Heliyon*, 5(2), e01204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01204>
- Tiwari, S., Kavitate, D., Devi, P. B., & Halady Shetty, P. (2021). Bacterial exopolysaccharides for improvement of technological, functional and rheological properties of yoghurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 1585-1595. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.140>
- Torres, R. D., Ramírez, C. L., Anzules, J. C., Monzón, A. H., & Borbor, R. S. (2017). Viabilidad de lactobacillus paracasei en co-cultivo con otras bacterias lácticas en leche descremada fermentada de cabra. *Cumbres*, 3(1), 77-83.
- Vega, J. C. D. I., Cañarejo, M. A., Cabascango, O. N., & Lara, M. V. (2019). Deshidratado de Physalis peruviana L. en dos Estados de Madurez y su Efecto sobre el Contenido de Polifenoles Totales, Capacidad Antioxidante, Carotenos, Color y Ácido Ascórbico. *Información tecnológica*, 30, 91-100.
- Venica, C. I., Spotti, M. J., Pavon, Y. L., Molli, J. S., & Perotti, M. C. (2020). Influence of carrot fibre powder addition on rheological, microstructure and sensory characteristics of stirred-type yogurt [Article]. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1916-1923. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14415>
- Vit, P., Santiago, B., & Pérez-Pérez, E. M. (2014). Composición química y actividad antioxidante de pulpa, hoja y semilla de guanábana *Annona muricata* L. *Interciencia*, 39(5), 350-353.
- Vivar-Vera, M. A., Salazar-Montoya, J. A., Calva-Calva, G., & Ramos-Ramírez, E. G. (2007). Extraction, thermal stability and kinetic behavior of pectinmethylesterase from hawthorn (*Crataegus pubescens*) fruit. *LWT - Food Science and Technology*, 40(2), 278-284. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.10.005>
- Wang, X., Kristo, E., & LaPointe, G. (2019). The effect of apple pomace on the texture, rheology and microstructure of set type yogurt. In (Vol. 91, pp. 83-91): Elsevier Ltd.
- Wusigale, Liang, L., & Luo, Y. (2020). Casein and pectin: Structures, interactions, and applications. In (Vol. 97, pp. 391-403): Elsevier Ltd.

- Yousefi, M., & Jafari, S. M. (2019). Recent advances in application of different hydrocolloids in dairy products to improve their techno-functional properties [Review]. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 468-483. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.015>
- Zhang, S. (2011). Antioxidative activity of lactic acid bacteria in yogurt. *African Journal of Microbiology Research*, 5. <https://doi.org/10.5897/AJMR11.997>
- Zhao, L. L., Wang, X. L., Liu, Z. P., Sun, W. H., Dai, Z. Y., Ren, F. Z., & Mao, X. Y. (2017). Effect of α -lactalbumin hydrolysate-calcium complexes on the fermentation process and storage properties of yogurt. *LWT - Food Science and Technology*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.09.006>
- Zhao, Y. H., Fu, R. J., & Li, J. (2020). Effects of the beta-glucan, curdlan, on the fermentation performance, microstructure, rheological and textural properties of set yogurt [Article]. *Lwt-Food Science and Technology*, 128, 8, Article 109449. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109449>
- ŞEngül, M., Erkaya, T., & Yildiz, H. (2014). An investigation of the antioxidant activities and some physicochemical characteristics of strawberry added yogurt. *Italian Journal of Food Science*, 26(3).