



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**EFFECTO DEL TIPO DE EDULCORANTE SOBRE LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE YOGUR**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

PRESENTA:

Ing. Cecilia Salmerón Vázquez

Bajo la supervisión de: César Ramírez Santiago, Dr



Chapingo, Estado de México, febrero de 2017



**EFFECTO DEL TIPO DE EDULCORANTE SOBRE LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DEL YOGUR**

Tesis realizada por Cecilia Salmerón Vázquez bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestra en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria

Director: _____



Dr. César Ramírez Santiago

Asesor: _____



Dra. Ofelia Sandoval Castilla

Asesor: _____



Dra. Consuelo Silvia Olivia Lobato Calleros

DEDICATORIA

A mis familiares pero también a la Universidad Autónoma Chapingo, profesores y administrativos que conforman el equipo de trabajo del posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria los cuales han contribuido de manera sustancial en mi aprendizaje, además de su apoyo para lograr mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) por apoyar con la beca económica para mi formación como Maestra en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo otorgado para la realización de mi tesis.

A Dios y a mis padres +Adrián Salmerón Oliva y Catalina Vázquez de la Rosa por el apoyo incondicional que me han dado, sus consejos y enseñanzas.

Al Dr. César Ramírez Santiago, Dra. Ofelia Sandoval Castilla y Dra. Consuelo S.O. Lobato Calleros por su paciencia, sus asesorías y facilidades para la realización de la presente.

A la Dra. Diana Guerra Ramírez por su amistad, por darme ánimos y confianza para la realización de cualquier trabajo que me proponga.

A los compañeros y compañeras de laboratorio (Alex, Daniel, Lupita Crispín, Dulce Pedroza), Sinaí Alvarado Ambríz por sus consejos y apoyo en laboratorio, Dr. José, Dra. Landy por sus consejos y asesorías en la metodología y uso de equipo.

A mis amigas Mitzy, Olivia, Karla, Linda por escucharme y apoyarme en los peores y en los mejores momentos.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Cecilia Salmerón Vázquez

Fecha de nacimiento: 22 de noviembre de 1987

Lugar de nacimiento: Estado de México

CURP: CAUC871122MMCLZC05

Profesión: Ingeniero en Biotecnología

Desarrollo académico

Bachillerato: Escuela Preparatoria Oficial N° 79.

Licenciatura: Ingeniero en Biotecnología, Universidad Politécnica de Pachuca.

RESUMEN GENERAL

EFFECTO DEL TIPO DE EDULCORANTE SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DEL YOGUR

La aplicación de edulcorantes en los alimentos tiene como objetivo disminuir su índice calórico; sin embargo, algunos autores reportan que la modificación en alguno de los componentes, altera la estructura del alimento y por ende su aceptación por el consumidor. Por lo anterior, en el presente trabajo se planteó evaluar el efecto de la sustitución de sacarosa por edulcorantes, en las propiedades fisicoquímicas, texturales y reológicas de yogur. Los edulcorantes acesulfame K, sucralosa y rebaudiósido A fueron adicionados a yogur, codificados como Ya, Ys y Ye respectivamente. Se evaluó la composición proximal (pH, acidez, humedad, proteína, cenizas), las propiedades texturales (firmeza, fracturabilidad, cohesividad, adhesividad y elasticidad), sinéresis y, las propiedades reológicas a través de pruebas dinámicas oscilatorias y el comportamiento de flujo de los tratamientos de yogur. La adición de los diferentes edulcorantes no afectó los tiempos de incubación, lográndose valores de pH 4.6 y 90°D; sin embargo, presentaron mayor porcentaje de liberación de lactosuero (sinéresis). Los parámetros texturales de Ya mostraron los valores más bajos en comparación con el resto de los tratamientos, Ye por su parte, mostró valores comparables de fracturabilidad, cohesividad, y elasticidad a Ya. Las pruebas dinámicas oscilatorias mostraron que en todos los tratamientos hay un carácter predominantemente elástico, siendo comparables Yc, Ye y Ya, mientras que Ys mostró valores menores del G' ; las curvas de flujo reflejaron que los yogures presentaron un comportamiento de reoadelgazamiento al corte, siendo Ye el tratamiento comparable al control.

Palabras clave: edulcorantes, yogur, textura, propiedades reológicas.

GENERAL ABSTRACT

EFFECT SWEETENER TYPE ON THE PHYSICOCHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF YOGURT

The application of sweeteners in foods aims at decreasing their caloric value; However, some authors report that the modification in some of the alters components the structure of the food and therefore its acceptance by the consumer. Therefore, in the present work we tried to evaluate the effect of substitution of sucrose by sweeteners, in the physicochemical, textural and rheological properties of yogurt. The sweeteners acesulfame K, sucralose and rebaudioside A were added to yogurt, coded as Ya, Ys and Ye respectively. The proximal composition (pH, acidity, moisture, protein, ash), textural properties (firmness, fracturability, cohesivity, adhesiveness and elasticity), synaesis and rheological properties through oscillatory dynamic tests and flow behavior yogurt treatments. The addition of the different sweeteners did not affect the incubation times, obtaining values 4.6 pH and 90°D; however, it resulted in yogurts presented higher percentage of whey release (syneresis). The textural parameters of Ya showed the lowest values in comparison to the rest of the treatments, in the other hand Ye showed comparable values of fracturability, cohesiveness, and elasticity to Ya. The oscillatory dynamic tests showed that in all the treatments there is a predominantly elastic character, with Yc, Ye and Ya being comparable, whereas Ys showed smaller values of G; The flow curves showed that the yogurts presented a behavior of decrease of the viscosity to the cut, being Ye the treatment compare to the control.

Keywords: sweeteners; yogurt; texture; rheological properties

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2.1. Generalidades de los edulcorantes	2
2.2. Clasificación de los edulcorantes.....	2
2.3. Edulcorantes artificiales	3
2.3.1. Acesulfame K	3
2.3.2. Glucósidos de esteviol de <i>Stevia rebaudiana</i> Bertoni (Rebaudiósido A)	3
2.3.3. Sucralosa	4
2.4. Edulcorantes nutritivos.....	5
2.4.1. Sacarosa	5
2.5. Propiedades reológicas de sistemas alimenticios.....	6
2.6. Literatura citada	7
3. “COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE YOGUR ENDULZADO CON CUATRO DIFERENTES EDULCORANTES”	9
3.1. Resumen	9
3.2. Abstract.....	10
3.3. Introducción	11
3.4. Materiales y métodos.....	11
3.4.1. Materiales.....	11

3.4.2. Determinación de la equivalencia de dulzor sensorial entre edulcorantes	12
3.4.3. Estandarización de leche y elaboración de yogur	12
3.4.4. Cinética de fermentación de leche con distintos edulcorantes.....	13
3.4.5. Determinación de la composición química proximal y sinéresis.....	13
3.4.6. Análisis de perfil textura de los yogures	13
3.4.7. Determinación de las propiedades reológicas de los yogures	14
Barrido de amplitud.....	14
Comportamiento de flujo.....	14
3.4.8. Análisis de datos	14
3.5. Resultados y discusión	15
3.5.1. Determinación de la equivalencia de dulzor sensorial entre edulcorantes.....	15
3.5.2. Cinética de fermentación de leche con distintos edulcorantes	16
3.5.3. Determinación de la composición química proximal y sinéresis	21
3.5.4. Sinéresis de los tratamientos de yogur.....	23
3.5.5. Parámetros texturales de los tratamientos de yogur	25
3.5.6. Comportamiento reológico de los tratamientos de yogur	32
Barrido de amplitud.....	32
Comportamiento de flujo.....	36
3.6. Conclusiones	39
3.7. Literatura citada	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición química proximal de los tratamientos de yogur (\pm DE)...	22
Cuadro 2. Acidez y pH de los tratamientos de yogur (\pm DE).....	23
Cuadro 3. Sinéresis de los tratamientos de yogur (\pm DE).	24
Cuadro 4. Valores medios (\pm DE) de los parámetros instrumentales de textura de los tratamientos de yogur.....	31
Cuadro 5. Valores del módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\text{Tan } \delta$) de los yogures después de tres días de su almacenamiento (\pm DE).	35
Cuadro 6. Valores medios de los parámetros del modelo de Ellis que obedecieron los diferentes yogures.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura molecular de Acesulfame K (O'Brien, 2001).	3
Figura 2. Estructura química del rebaudiosido A (Soto & Del Val, 2002).....	4
Figura 3. Estructura química de la sucralosa (O'Brien, 2001).	5
Figura 4. Estructura química de la sacarosa (Desrosier, 1982).....	6
Figura 5. Cinética de pH a través del tiempo de incubación para la elaboración de yogur. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.	17
Figura 6. Variación de pH en el tiempo de fermentación de los yogures con diferentes edulcorantes. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.	19
Figura 7. Cinética de acidez titulable (°D) a través del tiempo de incubación para la elaboración de yogur. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.	20
Figura 8. Sinéresis de los diferentes tratamientos de yogur (+DE), Yc: Yogur control, Ya: Yogur con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiosido A	25
Figura 9. Fracturabilidad de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A	26
Figura 10. Firmeza de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.	27

Figura 11. Adhesividad de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A. 28

Figura 12. Cohesividad de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A. 29

Figura 13. Elasticidad de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A. 30

Figura 14. Variación del módulo G' de los diferentes tratamientos de yogur Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A. 33

Figura 15. Variación del módulo G'' de los diferentes tratamientos de yogur. Yc: Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A 34

Figura 16. Variación del módulo $\tan \delta$ de los diferentes tratamientos de yogur. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A. 36

Figura 17. Variación de la viscosidad aparente como función de la tasa de corte y el tiempo de almacenamiento. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A. 37

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La introducción de los alimentos funcionales al mercado ha ido en aumento constantemente y con ello el uso de edulcorantes naturales con bajos contenidos calóricos debido a la preocupación del consumidor por su salud y la alta prevalencia de enfermedades como diabetes e hipertensión, relacionadas con el consumo de alimentos con alto contenido calórico. Así mismo, la Organización Mundial de la Salud (2015), estimó que la prevalencia de sobrepeso va en aumento (Elnaga, Massoud, Yousef & Mohamed, 2016), por lo que los agroindustriales consideran importante el desarrollo de alimentos que minimice estos problemas. Una de las alternativas viables es la sustitución de sacarosa por edulcorantes no calóricos, obteniendo un alimento saludable al mismo tiempo que se satisfacen las exigencias del consumidor ya que el dulzor en los alimentos es una característica importante de aceptación (Han *et al.*, 2016); sin embargo, la sustitución de sacarosa por edulcorantes no calóricos puede alterar la estructura y por efecto sobre las propiedades mecánicas; sobre la aceptación sensorial de los sistemas alimenticios en los cuales se adicione (Han *et al.*, 2016); por lo que en el presente trabajo se evaluó el efecto de la sustitución de sacarosa por edulcorantes no calóricos (acesulfame K y sucralosa), sobre la cinética de fermentación de los yogures, la composición química, las propiedades texturales (TPA) y reológicas a través de barridos de amplitud y curvas de flujo de yogur a fin de caracterizar el comportamiento reológico y predecir con modelos matemáticos el efecto de la sustitución.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

En la actualidad el interés por ofrecer al mercado alimentos funcionales con bajos contenidos calóricos ha ido aumentando exponencialmente y con ello el uso de edulcorantes no calóricos naturales en diferentes sistemas alimenticios de gran aceptación por parte del consumidor (Zahur, 2002).

2.1. Generalidades de los edulcorantes

Los edulcorantes son aditivos alimentarios que tienen la capacidad de proporcionar sabor dulce en el alimento al que se incorpora, pudiendo o no que el consumidor obtenga un aporte calórico tras su consumo. Los edulcorantes desempeñan un papel importante en la estimulación del apetito, pues el amor a la dulzura es un gusto biológico básico, además, actualmente se le ha dado gran importancia debido a que se le relaciona como factor primordial de riesgo para la generación de enfermedades como obesidad y sobrepeso (Diekman, MEd., RD., LD & Fand, 2012).

2.2. Clasificación de los edulcorantes

La industria alimenticia ha clasificado a los edulcorantes en naturales y artificiales, dentro de los naturales se encuentran principalmente extractos de vegetales como sacarosa, glucosa, fructosa, sorbitol, entre otros (FAO, 2016). Mientras que los edulcorantes artificiales, también conocidos como no nutritivos son una variedad de compuestos sintéticos que no proporcionan valor energético, su poder edulcorante es mucho más alto que el de los edulcorantes naturales por lo que se utilizan en cantidades muy pequeñas (Diekman *et al.*, 2012).

2.3. Edulcorantes artificiales

2.3.1. Acesulfame K

Es un edulcorante no nutritivo, conocido como una sal de potasio, es 200 veces más dulce que la sacarosa y no aporta energía a la dieta. Tiene un ligero sabor amargo si se utiliza a altas concentraciones y alta solubilidad en agua. También es estable a pH de 2 a 8 y a altas temperaturas durante el procesamiento de alimentos (FAO, 2016). La Figura 1 muestra la estructura química:

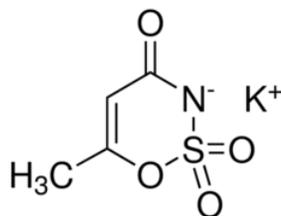


Figura 1. Estructura molecular de Acesulfame K (O'Brien, 2001).

El *CODEX ALIMENTARIUM* aprobó su uso en alimentos en 1992 para la producción de gomas y productos lácteos, después de seis años, también se aprobó para su uso en alimentos líquidos, pero su aplicación en alimentos es más común en productos horneados, bebidas frías, postres congelados, refrescos y dulces. El nivel máximo de acesulfame K permitido en alimentos lácteos es de 350 mg Kg⁻¹, mientras que su ingesta diaria admisible (IDA) es de 15 mg/ kg de peso corporal (Calvo-Carillo, 2013).

El límite de seguridad de los aditivos alimentarios o las condiciones de uso se expresan como IDA, es decir, la cantidad estimada por kilogramo de peso corporal que una persona puede consumir con seguridad todos los días durante toda su vida sin riesgo alguno (Di Pasquale, 2004).

2.3.2. Glucósidos de esteviol de *Stevia rebaudiana* Bertoni (Rebaudiósido A)

Los edulcorantes de Stevia o esteviósidos son glicósidos diterpénicos. Se extraen de las hojas de la planta de *Stevia rebaudiana* Bertoni (familia

Asteraceae), la cual es nativa de Sur América, es 200 a 300 veces más dulce que el azúcar (Elnaga, Massoud, M.I., Yousef, M.I. & Fand, 2016). Los principales constituyentes del sabor dulce son el esteviósido y el Rebaudiósido A (Figura 2).

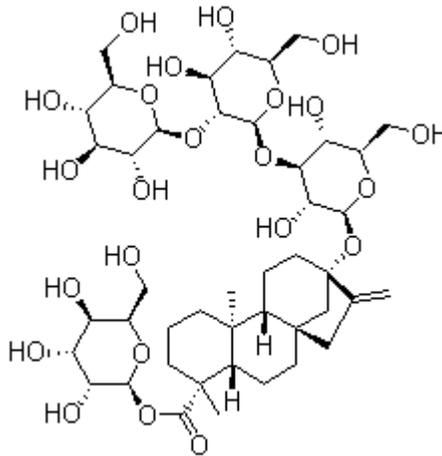


Figura 2. Estructura química del rebaudiosido A (Soto & Del Val, 2002).

Su principal aplicación en los alimentos, es en bebidas de agua con aroma, limonadas, té, helados, productos de fruta, verduras en escabeche, alimentos marinos, refrescos, salsa de soja y productos de confitería completamente dietéticos. Además, proporciona beneficios que le permite ser utilizada como una planta medicinal para la prevención de hipertensión, obesidad, apósitos para heridas, antifúngico, antiinflamatorio y para el tratamiento de trastornos de la piel (Brahmachari, Mandal, Roy, Mondal & Brahmachari, 2011).

2.3.3. Sucralosa

La sucralosa es un polvo de flujo libre blanco, cristalino, no higroscópico. Este edulcorante es altamente soluble en agua y es muy estable a pH de 3 a 7, así como a altas temperaturas. Tiene un agradable sabor dulce (600 veces más dulce que el azúcar) y no presenta resabio (O'Brien, 2001).

Se utiliza comúnmente en alimentos horneados, bebidas, gomas de mascar, gelatinas y postres congelados (U.S. Food & Drug Administration, 2015). A continuación se muestra la estructura química de la misma (Figura 3).

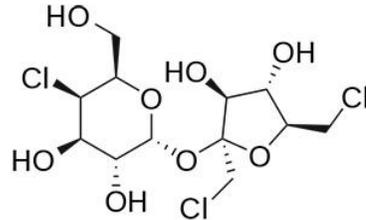


Figura 3. Estructura química de la sucralosa (O'Brien, 2001).

El *CODEX ALIMENTARIUS* menciona que el nivel máximo de sucralosa permitido en alimentos lácteos es de 400 mg Kg^{-1} mientras que su IDA es de 15 mg/ kg de peso corporal.

2.4. Edulcorantes nutritivos

Los edulcorantes nutritivos se dividen en dos grupos: azúcares naturales y azúcares añadidos y son también conocidos como edulcorantes calóricos. Los azúcares naturales son los que se encuentran en frutas, verduras y productos lácteos. Por su parte, los azúcares añadidos son todos aquellos que se adicionan a los alimentos durante el procesamiento; la sacarosa o azúcar de caña es probablemente el azúcar más reconocido dentro de los edulcorantes nutritivos. Otros azúcares añadidos son el néctar de agave, el jarabe de maíz, la dextrosa, la fructosa, la miel y la melaza (USDA, 2017).

2.4.1. Sacarosa

La sacarosa es un disacárido formado por una molécula de glucosa y una de fructosa (Figura 4), que se obtiene principalmente de la caña de azúcar o de la remolacha azucarera y provee aproximadamente 4 Kcal/g (Di Pasquale, 2004).

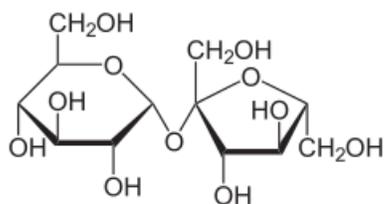


Figura 4. Estructura química de la sacarosa (Desrosier, 1982).

El poder de los diferentes edulcorantes varía con las propiedades de cada sistema alimentario tales como el estado físico, temperatura y la presencia de otros sabores (Di Pasquale, 2004).

2.5. Propiedades reológicas de sistemas alimenticios

Las mediciones reológicas son muy relevantes en la industria alimentaria como herramienta para la caracterización física de la materia prima antes de la elaboración, para los productos intermedios durante la fabricación y para los alimentos terminados. Existen varios enfoques para llevar a cabo estas caracterizaciones reológicas, y la técnica seleccionada depende en gran medida del alimento, de las características funcionales que necesitan ser analizadas o bien de los cambios ocasionados en la composición; diseño u optimización del sistema alimenticio (Tabilo-Munizaga & Barbosa-Cánovas, 2005).

Los alimentos líquidos y semisólidos presentan un comportamiento reológico que varía desde newtoniano a un tiempo dependiente hasta viscoelástico. Los alimentos líquidos que contienen compuestos disueltos de bajo peso molecular, por ejemplo, azúcares y ninguna cantidad de biopolímeros o sólidos insolubles se puede esperar que muestren un comportamiento Newtoniano (Rao, 2010).

Las propiedades reológicas se basan en las respuestas de deformación y de flujo cuando los alimentos son sometidos a un esfuerzo. El estudio de la reología de los alimentos requiere un conocimiento básico de los principios de flujo y comportamiento ante los esfuerzos aplicados que permiten inferir sobre la interacción de los componentes del alimento (Rao, 2010).

El yogur se comporta como un fluido no newtoniano, caracterizado por una estructura lábil, que es destruida por la deformación aplicada. Las propiedades de flujo del yogur se encuentran correlacionadas con las condiciones del proceso de elaboración, la composición, incluyendo a los edulcorantes, quienes modifican en menor o mayor grado las interacciones que generan la estructura del gel y otorgan las propiedades mecánicas texturales que se perciben cuando se consume el yogur como fracturabilidad, firmeza, elasticidad, cohesividad o bien a través de las propiedades de flujo cuando se aplica cizalla durante la deglución, que nos permiten esclarecer el estado estructural del material como función del esfuerzo y el tiempo (Castillo, Borregales & Sánchez, 2004).

2.6. Literatura citada

- Brahmachari, G., Mandal, L. C., Roy, R., Mondal, S., & Brahmachari, A. K. (2011). Stevioside and related compounds—molecules of pharmaceutical promise: a critical overview. *Archiv der Pharmazie*, 344 (1), 5 - 19.
- Calvo-Carrillo, C., M. (2013). *Toxicología de los alimentos*. McGraw Hill México.
- Castillo, M. I. R. I. A. N., Borregales, C., & Sánchez, M. (2004). Influencia de la pectina sobre las propiedades reológicas del yogur. *Revista de la Facultad de Farmacia*, 46 (2), 12 - 16.
- Desrosier, W.N. (1982). *Conservación de Alimentos*. CECSA. México.
- Di Pasquale, M. (2004). Use Of Nutritive And Nonnutritive Sweeteners. *J Am Diet Assoc*, 98, 580 - 587.
- Diekman, C., MEd., RD., LD., & Fand. (2012). Sweeteners: Facts and Fallacies. *Today's Dietitian*, 9, 42.
- Elnaga, N. A., Massoud, M. I., Yousef, M. I., & Mohamed, H. H. (2016). Effect of stevia sweetener consumption as non-caloric sweetening on body weight gain and biochemical's parameters in overweight female rats. *Annals of Agricultural Sciences*. 61 (1), 155 - 166.
- FAO/ WHO (2016). Summary of Evaluations Performed by the Joint FAO/ WHO Expert Committee on Food Additives. Recuperado el 22 de septiembre de 2016. http://www.inchem.org7documents/jecfa/jeceval/jec_1.htm.

- Han, X., Yang, Z., Jing, X., Yu, P., Zhang, Y., Yi, H., & Zhang, L. (2016). Improvement of the texture of yogurt by use of exopolysaccharide producing lactic acid bacteria. *Biomed research international*, 2016 (16), 1 - 15.
- Norma del *CODEX ALIMENTARIUS* para leches fermentadas. CODEX STAN 243 - 2003. 2003.
- Rao, M. A. (2010). *Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications: principles and applications*. Springer Science & Business Media.
- Soto, A. E., & Del Val, S. (2002). Extracción de los principios edulcorantes de la *Stevia rebaudiana*. *Revista de Ciencias Agrarias y Tecnología de los Alimentos.*, 20, 1 - 6.
- Tabilo-Munizaga, G., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, 67 (1), 147 - 156.
- O'Brien, L. (2001). *Alternative Sweeteners*. EEUUA: Marcel Dekker.
- Organización Mundial de la Salud. Estadísticas sanitarias mundiales (2012). Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- U.S. Food & Drug Administration (2015). Additional information about high - intensity sweeteners permitted for use in food in the United States. Recuperado el 11 de enero de 2017, de <http://www.fda.gov/Food/IngredientsPackagingLabeling/FoodAdditivesIngredients/ucm397725.htm>.
- United States Depart of Agriculture (2017). United States Depart of Agriculture Recuperado el 11 de Enero de 2017, de <https://www.nal.usda.gov/fnic/nutritive-and-nonnutritive-sweetener-resources>.
- Zahur, Z. H. (2002). Effect of sweeteners on the microestructure of yogurt. *Food Science Technology Research*, (8), 21 - 23.

3. “COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE YOGUR ENDULZADO CON CUATRO DIFERENTES EDULCORANTES”

3.1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de yogur endulzado con sacarosa en comparación con acesulfame K, rebaudiósido A y sucralosa. Acidez titulable, pH, composición química proximal, sinéresis, propiedades texturales y reológicas fueron evaluadas. Tres tratamientos de yogur fueron preparados utilizando los edulcorantes antes mencionados en sustitución de la sacarosa.

La adición de diferentes edulcorantes no afectó los tiempos de incubación, logrando 4.6 de pH y 90 °D; sin embargo, resultó en yogures con mayor porcentaje de liberación de lactosuero (2.5 - 3.0 %). Los parámetros texturales de Ya mostraron los valores más bajos en comparación con el resto de los tratamientos (fracturabilidad (419.44 ± 20.06 mN), firmeza (440.64 ± 4.52 mN), adhesividad (425.87 ± 25.89 mN), cohesividad (0.059 ± 0.01), y elasticidad (76.67 ± 0.004 mN). Las pruebas dinámicas oscilatorias mostraron que en todos los tratamientos hay un carácter predominantemente elástico, siendo comparables Yc, Ye y Ya, mientras que Ys mostró valores menores del G' (102.97 ± 4.42 Pa); las curvas de flujo reflejaron que los yogures presentaron un comportamiento de reoadelgazamiento al corte, siendo Ya (λ : 58.66 ± 5.28 s, p : 0.078 ± 0.00 , n_0 : 527.28 ± 6.68 Pa s) el tratamiento comparable al control (Yc) (λ : 60.73 ± 5.55 s, p : 0.089 ± 0.01 , n_0 : 543.45 ± 6.45 Pa s).

Palabras claves: edulcorantes, yogur, textura, propiedades reológicas

COMPARISON OF PHYSICOCHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF YOGURT ENDED WITH FOUR DIFFERENT SWEETENERS

3.2. Abstract

The objective of this work was to evaluate the effect of the physicochemical and mechanical properties of yogurt sweetened with sucrose compared to acesulfame K, rebaudioside A and sucralose. Titratable acidity, pH, chemical composition, syneresis, textural and rheological properties were evaluated. Three treatments were prepared using the aforementioned sweeteners in place of sucrose.

The addition of different sweeteners did not affect the incubation times, obtaining values of pH 4.6 and 90 °D; However, resulted in yogurts with higher percentage of whey release (2.5 - 3.0%). The textural parameters of Ya treatment showed the lowest values of (compared to the other treatments) fracturability (419.44 ± 20.06 mN), firmness (440.64 ± 4.52 mN), adhesiveness (425.87 ± 25.89 mN), cohesiveness (0.059 ± 0.01) and elasticity (76.67 ± 0.004 mN). The oscillatory dynamic tests showed that in all the treatments there is a predominantly elastic character, being comparable Yc, Ye and Ya, whereas Ys showed lower values of G' (102.97 ± 4.42 Pa); The flow curves reflected that the yogurts presented a behavior of decrease of the viscosity to the cut, being Ya (λ : 58.66 ± 5.28 s, p : 0.078 ± 0.00 , n_o : 527.28 ± 6.68 Pa s), the treatment compare to the control (Yc) (λ : 60.73 ± 5.55 s, p : 0.089 ± 0.01 , n_o : 543.45 ± 6.45 Pa s).

Keywords: sweeteners; yogurt; texture; rheological properties.

3.3. Introducción

Cambios en la alimentación de la población se han visto reflejados en problemas de salud como la obesidad, diabetes e hipertensión lo que ha llevado a los consumidores a reducir el consumo de alimentos con altos contenidos en azúcar, grasa o sal, debido a ello la industria alimentaria ha optado en el desarrollo de alimentos saludables mediante la sustitución de la grasa o los azúcares por otros ingredientes como los edulcorantes no calóricos (Swithers, 2015). Sin embargo, estas modificaciones alteran de manera directa la estructura del alimento y por ende el sabor y su aceptabilidad por el consumidor (Han *et al.*, 2016); por lo que en el presente trabajo se evaluó el efecto de la sustitución de sacarosa por edulcorantes no calóricos como glucósidos de esteviol obtenidos de *Stevia rebaudiana* Bertoni (rebaudiosido A), acesulfame K y sucralosa, sobre la cinética de fermentación, la composición química, las propiedades texturales (ATP) y reológicas a través de barridos de amplitud y curvas de flujo de yogur a fin de caracterizar el comportamiento reológico y predecir con modelos matemáticos el efecto de la sustitución.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Materiales

Leche entera en polvo (Alpura®, Alpura México S.A. de C.V., México, D.F.), leche descremada en polvo (American Dairy®, México), edulcorantes (sucralosa 99 % pureza, acesulfame K 98-99 % pureza, ambos de la marca Niutang®, Amfher foods S.A. de C.V., México), glucósidos de esteviol de *Stevia rebaudiana* Bertoni (Rebaudiósido A, 99 % pureza, Life stevia®, Danisco, S.A. de C.V., México) y azúcar refinada, Great Value®, Walmart, México, cultivo láctico para yogur MY800-5DCU, Danisco, S.A. de C.V., México (conteniendo *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subs. *bulgaricus* y subs. *lactis*).

3.4.2. Determinación de la equivalencia de dulzor sensorial de edulcorantes

Para establecer el valor de equivalencia de dulzor sensorial entre edulcorantes, se siguió la metodología descrita por Ramírez-Santiago (2008), en la cual se tomó como referencia a la sacarosa, y se confirmó mediante pruebas sensoriales discriminativas “Pruebas de A- no es A”, si el valor de equivalencia comercial para cada edulcorante (acesulfame K, glucósidos de esteviol de *Stevia rebaudiana* Bertoni (rebaudiósido A) y sucralosa) correspondía a la magnitud de dulzor de la sacarosa.

3.4.3. Estandarización de leche y elaboración de yogur

Se prepararon cuatro tratamientos de yogur a partir de leche descremada (0.1 g de grasa láctea L⁻¹) y leche entera (26 g de grasa láctea L⁻¹) y se realizó una estandarización del contenido de grasa y sólidos totales a 26 g grasa y de 120 g L⁻¹ leche respectivamente; así mismo la cantidad de edulcorante fue establecida de acuerdo con el dulzor equivalente respecto al de sacarosa; siendo adicionado para el yogur control (Yc), 60 g sacarosa; yogur con acesulfame (Ya), 0.4 g de acesulfame; yogur con glucosidos de esteviol de *Stevia rebaudiana* Bertoni (rebaudiosido A) (Ye), 0.2 g de glucósidos de esteviol como rebaudiósido A (99 % pureza) y Ys, 0.1 g de sucralosa g·L⁻¹ leche.

Lotes de 1 L de leche fueron preparados para cada tratamiento de yogur con 3 repeticiones. La leche estandarizada rehidratada se mantuvo en refrigeraron a 4 °C por 24 h, para permitir la hidratación completa, se solubilizó en ella el edulcorante correspondiente y se sometió a 85 °C por 15 min, posteriormente se enfrió a 45 °C y se inoculó con 0.03 g de cultivo láctico L⁻¹ leche. Posteriormente se mantuvo en incubaron a 45 ± 1 °C hasta alcanzar 90 ± 0.5 °D (Sandoval-Castilla, Lobato-Calleros, Aguirre-Mandujano, & Vernon-Carter, 2004).

3.4.4. Cinética de fermentación de leche con distintos edulcorantes

Con la finalidad de analizar el comportamiento de fermentación de la base de leche para yogur adicionada con los diferentes edulcorantes, se evaluó el pH y acidez durante el tiempo de fermentación, estableciendo intervalos de 30 min entre cada medición hasta alcanzar los 90 °D. El pH de los tratamientos de yogur se determinó utilizando un potenciómetro (HANNA Edge, Michigan, EUA) con ajuste de temperatura. La acidez titulable se determinó por titulación volumétrica con NaOH 0.1 N y fenolftaleína como indicador.

3.4.5. Determinación de la composición química proximal y sinéresis

Los yogures se sometieron a determinaciones de proteína (método Kjeldahl), grasa (método Gerber) y humedad (método de secado a la estufa) (AOAC, 1998).

Para la determinación de sinéresis de las muestras de yogur se utilizó el método propuesto por Keogh y O'Kennedy (1998) con ligeras modificaciones. 10 g de muestra a temperatura de 4 °C de cada yogur contenidos en tubos se centrifugaron a 1800 rpm durante 10 min. El lactosuero liberado se decantó y el grado de sinéresis se determinó por diferencia de peso respecto al peso inicial. Las determinaciones se realizaron por triplicado después de tres días de la elaboración de los yogures.

3.4.6. Análisis de perfil textura de los yogures

El análisis de perfil textura se llevó a cabo usando un texturómetro universal TA-XT2i (Texture Technologies Corp., White Plains, NY, USA), en todos los casos las muestras de yogur en contenedores cilíndrico de plástico, se sometieron a 50 % de deformación con una sonda de extrusión inversa de 40 mm de diámetro a una velocidad de $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ y una celda de carga de 25 Kg. Los gráficos obtenidos se analizaron en el programa Texture Expert para la obtención de los datos de fracturabilidad, firmeza, adhesividad, cohesividad y elasticidad. Todos los análisis se realizaron por triplicado y después de tres días de la elaboración de los yogures.

3.4.7. Determinación de las propiedades reológicas de los yogures

Barrido de amplitud

Los diferentes tratamientos de yogur se sometieron a pruebas oscilatorias dinámicas en un reómetro Physica MCR 301 Dynamic Shear Rheometer (Antón Para Messtechnik, Stuttgart, Alemania) utilizando una geometría tipo cono-plato de 50 mm de diámetro y un ángulo de 1° (CP50-1-SN5550) y un gap de 0.05 mm. Las determinaciones reológicas se realizaron por triplicado a los tres días de almacenamiento a 5 ± 1 °C. A partir de estas pruebas, se determinó la región viscoelástica lineal en un rango de deformación de 0.01 a 100 % y una frecuencia de 1 Hz y $5 \text{ °C} \pm 0.1 \text{ °C}$. Se obtuvieron los valores del módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\tan \delta$) de los yogures.

Comportamiento de flujo

Las curvas de flujo de los yogures fueron obtenidas variando la tasa de corte ($\dot{\gamma}$) de 1 a 300 s^{-1} y los valores correspondientes de esfuerzo de corte (σ) y viscosidad aparente (η_{ap}) fueron determinados. Los datos de las curvas de flujo se analizaron con el software Rheoplus/32 V. 62 al modelo reológico Ellis, que permite describir el comportamiento de los fluidos de sistemas alimenticios como emulsiones, yogur, entre otros. Las determinaciones reológicas se realizaron por triplicado a los yogures después de tres días de almacenamiento a $5^\circ\text{C} \pm 0.1 \text{ °C}$.

3.4.8. Análisis de datos

Los análisis se sometieron a un análisis de varianza, aplicado a un diseño completamente al azar ($p \leq 0.05$) y se aplicó comparación de medias utilizando la prueba de Tukey en los casos pertinentes. Se utilizó el paquete estadístico SAS 9.0.

3.5. Resultados y discusión

3.5.1. Determinación de la equivalencia de dulzor sensorial entre edulcorantes

Los valores de magnitud media de dulzura de los yogures conteniendo diferentes edulcorantes Ya conteniendo acesulfame K, Ys conteniendo sucralosa y Ys conteniendo rebaudiosido A, y fueron comparados con la media de dulzura exhibida por el yogur Yc conteniendo sacarosa a través de pruebas sensoriales de “A” - “no es A”, encontrando que las concentraciones equivalentes en magnitud de dulzor fueron comparables entre si y los consumidores no pudieron diferenciar entre los yogures endulzados con los distintos edulcorantes; así mismo, las concentraciones utilizadas fueron similares a las recomendadas por el proveedor, así entonces, se establecieron las concentraciones de edulcorante para cada tratamiento.

Cardoso, Battochio, Cardello y André (2004), reportaron que la percepción del sabor dulce de los edulcorantes en sistemas alimenticios depende de la composición del medio dispersante, la temperatura de consumo y la concentración de los edulcorantes. Para el caso de Ys, yogur adicionado con rebaudiosido A, Goto y Clemente, (1998), obtuvieron que su dulzor es de 250 a 400 veces mayor que el de sacarosa, lo que coincide con lo reportado en las pruebas sensoriales en este estudio en el cual se obtuvo que la adición de 0.2 g. L⁻¹ de glucósidos de esteviol obtenido de *Stevia rebaudiana* Bertoni (rebaudiosido A) a yogur proporcionó una dulzura comparable ($p > 0.05$) a la del yogur endulzado con sacarosa. La concentración de edulcorantes establecida para acesulfame K y sucralosa fue de 0.4 y 0.1 L⁻¹ yogur respectivamente, los cuales proporcionaron una dulzura semejante ($p > 0.05$) a la de sacarosa en yogur.

De la Cruz Huamán y Gómez (2012), elaboraron leches fermentadas edulcoradas con stevia, encontrando un dulzor equivalente mediante análisis sensorial a 10 % de sacarosa con 0.003 % de glucósidos de *Stevia rebaudiana*

Bertoni, encontrando una concentración equivalente similar (0.018 g de glucósidos de esteviol) a lo reportado en nuestros resultados.

3.5.2. Cinética de fermentación de leche con distintos edulcorantes

En la Figura 5 se puede observar el cambio de pH conforme transcurre el proceso de fermentación de la leche a través del tiempo. Cuando el pH disminuye de pH 6.7 a 5.2, se observa un cambio importante en la viscosidad de la leche, debido a la desestabilización de las micelas de caseína por la disminución de la repulsión electrostática y estérica, este proceso continua hasta la completa floculación - agregación de las micelas de caseína pH de 4.7 y 4.6 (Rodríguez-Bernal, Serna-Jiménez, Uribe-Bohórquez, Klotz, & Quintanilla-Carvajal, 2014). Así mismo se puede observarse, que de manera general el comportamiento del proceso tecnológico de acidificación de las diferentes bases para yogur adicionadas con los distintos edulcorantes no se encuentra afectado por el tipo de edulcorante utilizado en el desarrollo de pH, de manera particular para el Yc, Ya y Ys mostraron el máximo cambio de pH durante la acidificación de la leche, no así para Ye, que mostró un retraso de 30 min (Figura 5); los tiempos de fermentación necesarios para alcanzar un valor de próximo a 4.6 a 45°C fueron de entre 300 y 330 min para Ye.

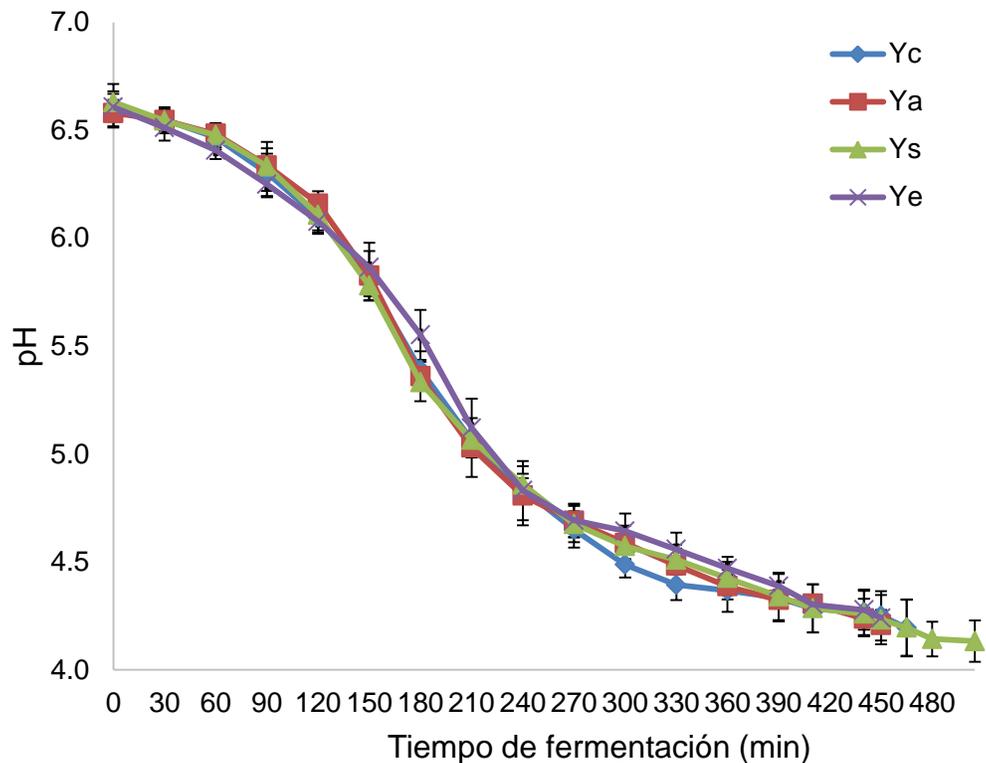


Figura 5. Cinética de pH a través del tiempo de incubación para la elaboración de yogur. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

Este comportamiento concuerda con lo reportado por Guggisberg, Piccinali, & Schreier, (2011) cuando adicionaron glucósidos de esteviol. Sin embargo, en la segunda etapa mostraron el mismo comportamiento (Figura 6).

Los cambios estructurales ocurridos en la leche a pH de 4 - 6, ocasionan la formación de una red proteica continua que forma un gel débil, el cuál exhibe propiedades reológicas de un líquido no newtoniano, de naturaleza predominantemente elástica a pequeños porcentajes de deformación, pero que se conforme se incrementa la deformación, produce la ruptura de enlaces, ocasionando que predomine entonces la naturaleza viscosa (Castillo *et al.* 2004).

Las variables más relevantes en el proceso de fermentación son: el tipo y cantidad de cultivo iniciador, la composición y características fisicoquímicas de la leche y la temperatura a la cual se lleve el proceso con lo que respecta a la composición, los carbohidratos fermentables es el sustrato para que los microorganismos iniciadores transformen la lactosa en ácido láctico y en otros productos (Rodríguez-Bernal *et al.* 2014); por lo que el cambio en la composición de estos sustratos puede afectar de manera significativa la cinética de fermentación e incluso llegar a inhibir a los cultivos iniciadores.

Denina, Semjonovs, Fomina, Treimane y Linde, (2014) reportaron que los glucósidos de esteviol muestran una nula capacidad de fermentación en cepas del género *Lactobacillus* y demostraron que el crecimiento de cepas de *Lactobacillus reuteri* es inhibido en presencia glucósidos de stevia y del rebaudiósido A. Así mismo, Pérez Salazar, y Carrasco Loyola (2006), reportaron que sacarosa, la sucralosa y el aspartame son edulcorantes que estimulan el crecimiento del *Streptococcus mutans* y *Lactobacillus acidophilus*, pero que xylitol y la sacarina sódica reducen su crecimiento. Nabors y Gelardi (2001) establecieron que el uso de acesulfame k como edulcorante en una bebida láctea fermentada no tiene efecto sobre el desempeño del cultivo iniciador.

En la Figura 6 se puede observar el desarrollo de acidez conforme incrementa el tiempo de fermentación, esto debido a la acidificación progresiva derivada de la transformación de lactosa a ácido láctico por los microorganismos iniciadores.

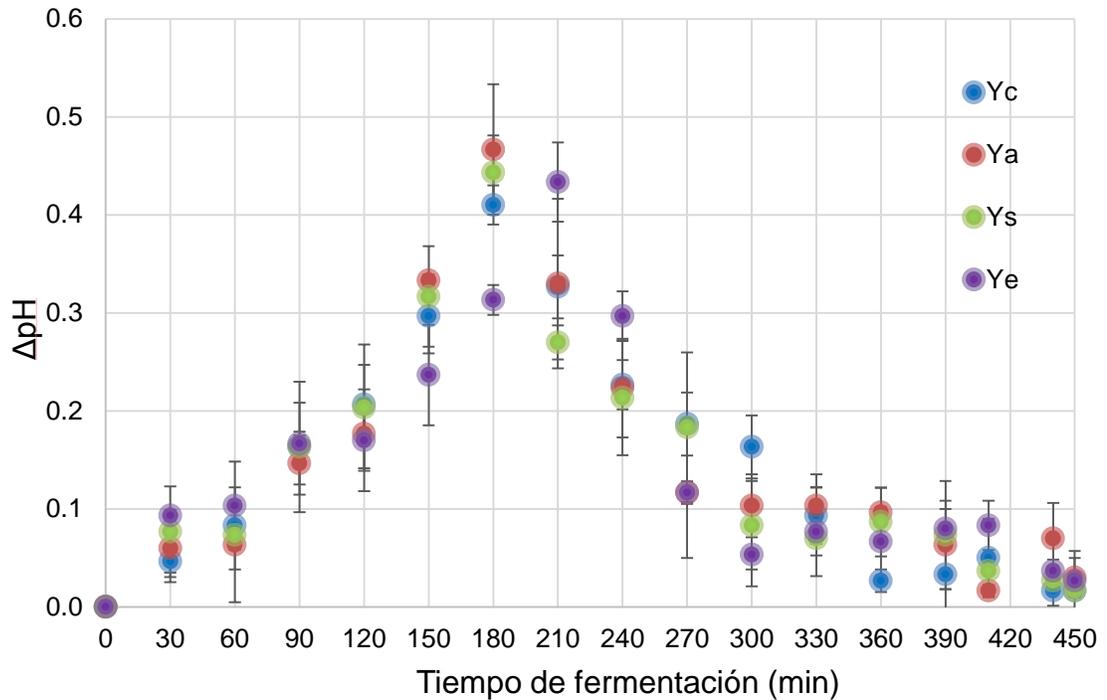


Figura 6. Variación de pH en el tiempo de fermentación de los yogures con diferentes edulcorantes. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

De manera general para todos los yogures se muestra al inicio de la fermentación un bajo desarrollo de acidez, caracterizado por un periodo de adaptación y multiplicación de los microorganismos iniciadores hasta el minuto 90 aproximadamente para todas los tratamientos de yogur, posteriormente, se observa (Figura 7) un cambio de la tasa de conversión de lactosa a ácido láctico más o menos constante. Conforme aumenta la acidez de la leche, en todos los casos se observan cambios importantes en la viscosidad de la leche, promovida por la desestabilización de las micelas de caseína por la disminución de la repulsión electrostática y estérica originando la formación de un gel débil. Así mismo se observa claramente, que hasta 480 min no hay un descenso de tasa de acidificación, que pudiera manifestarse por limitación de sustrato en todos

los casos. La caracterización de la cinética de fermentación de los tratamientos de yogur, permitió definir que no hay afectación de los diferentes edulcorantes sobre el tiempo de fermentación que permite llegar a 90 °D.

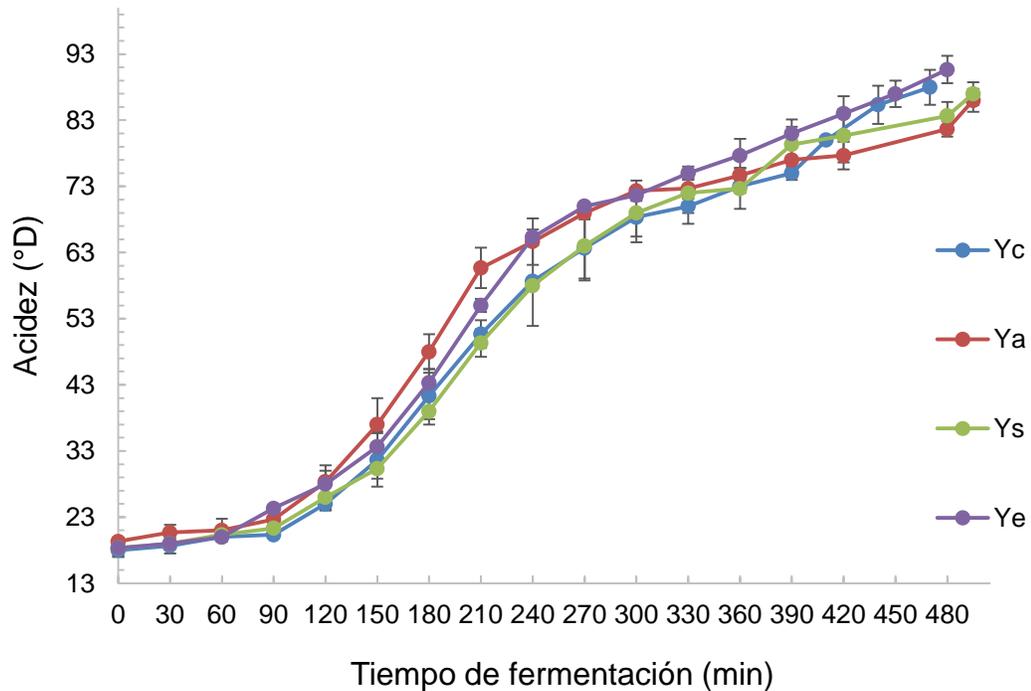


Figura 7. Cinética de acidez titulable (°D) a través del tiempo de incubación para la elaboración de yogur. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

El desarrollo de acidez en un yogur debe oscilar entre 80 y 180 °D, debido a que a esta acidez se expresan las propiedades adecuadas de sabor, textura y cuerpo, relacionadas con el nivel de estructuración de los componentes a nivel microestructura; así mismo relacionadas con la fortaleza de la misma cuando es sometida a esfuerzos de deformación como cizalla durante el batido, que ocasionan cambios en la estabilidad estructural y fenómenos que promueven la

expulsión de lactosuero (sinéresis) durante el periodo de almacenamiento debidos a una reestructuración de la red caseínica.

3.5.3. Determinación de la composición química proximal y sinéresis

La composición química proximal de los yogures elaborados en este estudio se muestra en el Cuadro 1. Para el contenido de humedad, se puede observar que existieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los diferentes tratamientos, y estos se encontraron correlacionados inversamente con los sólidos totales debido a que los valores medios para Y_c fueron menores ($p \leq 0.05$) con respecto a los tratamientos Y_a , Y_s y Y_e , en parte puede deberse a que la cantidad de edulcorante adicionado fue menor y, así mismo, no existió diferencia significativa ($p > 0.5$) en el contenido humedad entre los tratamientos adicionados con edulcorantes no artificiales (Y_a , Y_s y Y_e). Díaz-Jiménez, Sosa-Morales y Vélez-Ruiz (2004) mencionan que varias de las características fisicoquímicas de un producto lácteo, tales como acidez, color, consistencia, humedad, pH, sólidos totales y viscosidad son modificados en función de su composición.

En el caso del contenido de proteína, los valores exhibidos por el tratamiento Y_e fueron mayores ($p \leq 0.05$) al resto de los yogures; los glucósidos de esteviol no se encuentran puros, pudiendo estar asociadas a grupos nitrogenados y cenizas como impurezas, afectando la cuantificación por Kjeldahl. Así mismo, podemos mencionar que el tratamiento Y_s , adicionado con acesulfame K es el yogur con un menor ($p \leq 0.05$) contenido de cenizas con respecto al resto de los tratamientos.

Cuadro 1. Composición química proximal de los tratamientos de yogur (\pm DE).

Tratamiento	Humedad (%)	Proteína (%)	Cenizas (%)	*Carbohidratos (%)	Grasa (%)
Yc	83.16 \pm 0.05 ^a	2.84 \pm 0.20 ^a	0.68 \pm 0.01 ^{ab}	10.11 ^b	2.25 \pm 0.07 ^a
Ya	88.59 \pm 0.53 ^b	2.89 \pm 0.17 ^{ab}	0.83 \pm 0.08 ^b	5.62 ^a	2.45 \pm 0.07 ^b
Ys	88.69 \pm 0.43 ^b	2.78 \pm 0.17 ^{ab}	0.81 \pm 0.04 ^b	5.72 ^a	2.30 \pm 0.00 ^{ab}
Ye	88.24 \pm 0.12 ^b	2.93 \pm 0.17 ^b	0.77 \pm 0.02 ^{ab}	5.52 ^a	2.45 \pm 0.00 ^{ab}

^{a,b} Superíndices distintos en la misma columna indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$). *Obtenido por diferencia de los cuatro componentes del yogur. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

A pesar de realizar la estandarización del contenido de grasa y sólidos totales, los valores obtenidos para grasa en el Yc fueron menores ($p \leq 0.05$) respecto al resto de los yogures (Cuadro 1). Finalmente, y como se esperaba, el contenido de carbohidratos en Yc, conteniendo sacarosa fue significativamente mayor ($p \leq 0.05$) debido al aporte de la misma sobre la composición del yogur; puesto que en los demás tratamientos el mayor aporte de carbohidratos es impartido por la lactosa contenida en la leche de manera natural.

Los valores de acidez reportados después del almacenamiento por tres días de los yogures en condiciones de refrigeración (Cuadro 2), aumentaron ligeramente ($p \leq 0.05$) después de haber logrado llegar a una acidez de 90 °D durante la incubación de los yogures Yc, Ys, y Ye; a diferencia del tratamiento Ya, el cual se observó mantiene durante ese periodo los valores de acidez. La variación de acidez de los yogures se debe básicamente a la formación de ácido láctico durante el periodo de almacenamiento. Los valores de pH en los distintos yogures a los tres días del análisis fueron similares variaron de 4.19 a 4.22 (Cuadro 2), sin encontrar diferencia estadística significativa ($p > 0.05$).

Cuadro 2. Acidez y pH de los tratamientos de yogur (\pm DE).

Tratamiento	Acidez(°D)	pH
Yc	94 \pm 1.52 ^b	4.19 \pm 0.02 ^a
Ya	90 \pm 1.15 ^a	4.20 \pm 0.01 ^a
Ys	93 \pm 1.00 ^{ab}	4.20 \pm 0.05 ^a
Ye	93 \pm 0.57 ^{ab}	4.22 \pm 0.02 ^a

^{a,b} Superíndices distintos en la misma columna indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiosido A.

3.5.4. Sinéresis de los tratamientos de yogur

Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) (Cuadro 3), en los porcentajes de sinéresis para los diferentes yogures, exhibiendo los valores más altos ($p \leq 0.05$) los yogures Ya, seguido de Ys y Ye, quienes mostraron

valores de sinéresis intermedios y finalmente, los valores más bajos ($p \leq 0.05$) de sinéresis fueron mostrados por el Yc, yogur adicionado con sacarosa. Esto en parte puede ser explicado por un mayor contenido de sólidos en Yc, con respecto al resto de los tratamientos, lo que permite un mayor entrapamiento de la humedad contenida por la capacidad de retención de los sólidos no grasos, exhibiendo además una textura más firme ($p \leq 0.05$).

Cuadro 3. Sinéresis de los tratamientos de yogur (\pm DE).

Tratamiento	Sinéresis (%)
Yc	1.55 ± 0.30^a
Ya	3.01 ± 0.30^c
Ys	2.44 ± 0.20^b
Ye	2.86 ± 0.10^b

^{a,b} Superíndices distintos en la misma columna indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

Este comportamiento (Figura 8), muestra que la naturaleza del edulcorante adicionado para edulcorar en la base de yogur, afecta de manera significativa el comportamiento de la estructura proteica para mantener el suero retenido en ella, trabajos anteriores han informado que los yogures con bajo contenido de sólidos totales, sufren una mayor separación de suero.

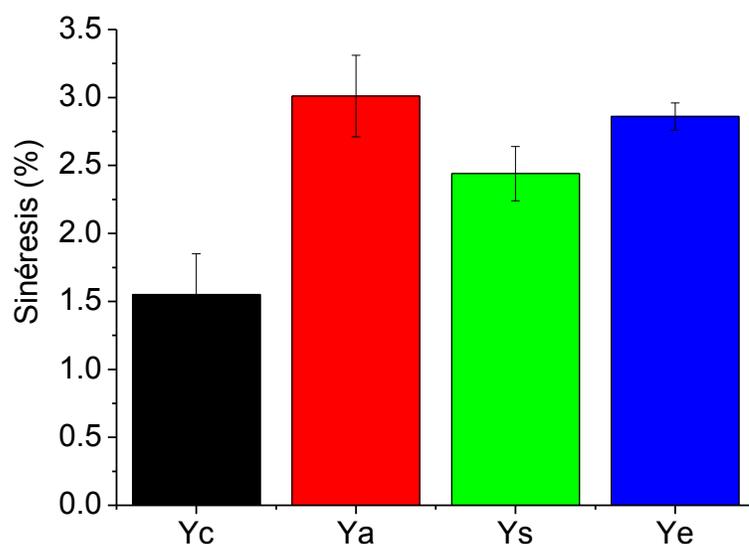


Figura 8. Sinéresis de los diferentes tratamientos de yogur (+DE), Yc: Yogur control, Ya: Yogur con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiosido A

3.5.5. Parámetros texturales de los tratamientos de yogur

Uno de los atributos más importantes del yogur es la textura el cual se puede analizar mediante un análisis instrumental, este procedimiento es importante para evaluar la calidad de un alimento (Sodini, Remeuf, & Haddad, 2004); así mismo es importante para la industria, conocer el comportamiento del producto cuando es sometido a diferentes procesos, por ejemplo agitación, batido, bombeo, por lo que el estudio de la textura permite realizar reformulaciones sin afectar en gran medida la aceptación por el consumidor.

La fracturabilidad de las muestras de yogur mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) (Cuadro 4). La muestra Ya presenta un valor promedio menor ($p \leq 0.05$) en comparación con Yc (Figura 9), con lo que se puede inferir que el gel formado muestra poca resistencia a la penetración en comparación con el resto de los tratamientos, mientras que Ye exhibió una fracturabilidad comparable ($p > 0.05$) a Yc y Ys.

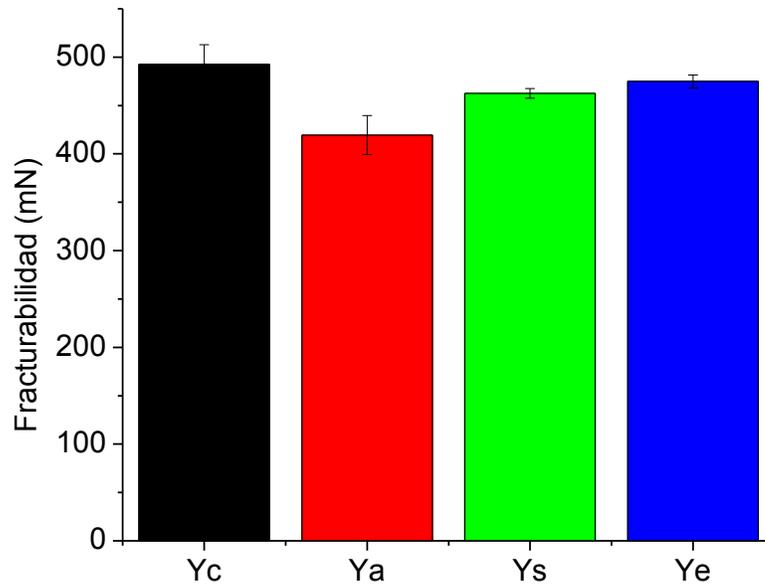


Figura 9. Fracturabilidad de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A

Los valores medios de firmeza para los yogures muestran una relación con los mostrados para fracturabilidad (figuras 9 y 10), la firmeza de los distintos tratamientos mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) (Cuadro 4), como respuesta a la sustitución de sacarosa por otro tipo de edulcorante, así encontramos que yogur control Yc, fue el que mostró una mayor firmeza de gel ($p \leq 0.05$) seguida de Ys, mientras que Ys y Ye mostraron una firmeza comparable ($p > 0.05$) y el yogur más suave ($p \leq 0.05$) fue Ya (Figura 10). Los valores bajos de firmeza de los yogures confirman una estructura poco estructurada, con mayor grado de inestabilidad del gel mientras que los yogures con mayor firmeza muestran un gel con mayor nivel de estructuración, que puede mantenerse hidratada y evitar el desuerado o sinéresis, pudiendo también resistir altas tasas de corte y reestructurarse. Con los resultados obtenidos (Cuadro 5), muestran que la firmeza de la red del gel podría estar afectada positiva o negativamente por la adición de los diferentes tipos de

edulcorantes a pesar que las cantidades de adicionadas son muy bajas (0.1 a 0.4) como para influir en las propiedades texturales. Guggisberg *et al.* (2011), reportaron que la adición de glucósidos de esteviol ($0.4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), en yogures, mostraron valores de firmeza menores a la adición de sacarosa al ($80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$).

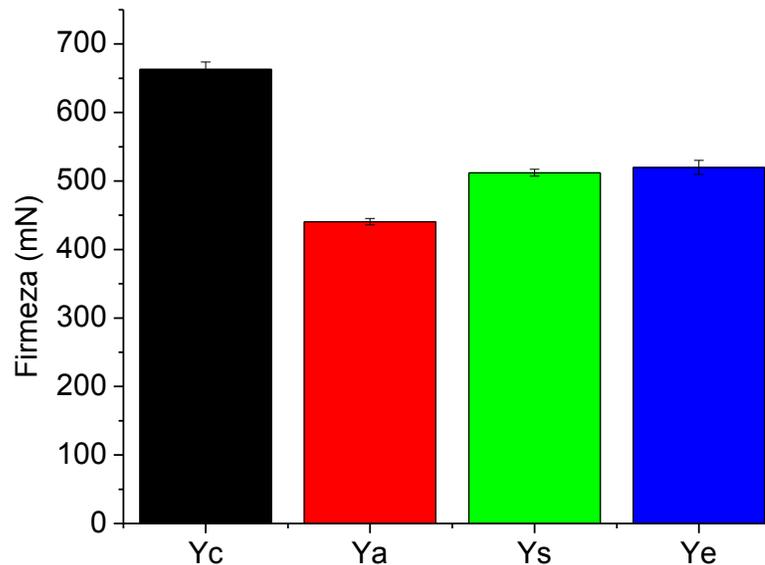


Figura 10. Firmeza de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

La adhesividad de los yogures se relaciona directamente con la dureza de los yogures; por ejemplo, los yogures más blandos, presentan una red proteica poco densa y débiles, requieren de poco trabajo para vencer las fuerzas de atracción entre la superficie y la del material de la geometría, se conoce que tanto la dureza como la adhesividad se ve influenciadas en algunos yogures comerciales por la adición de diferentes tipos de estabilizantes (Cheng *et al.*, 2017).

Los valores de adhesividad mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), (Cuadro 4), el yogur más adhesivo ($p \leq 0.05$) fue Ys, posteriormente Yc, Ye y Ya (Figura 11).

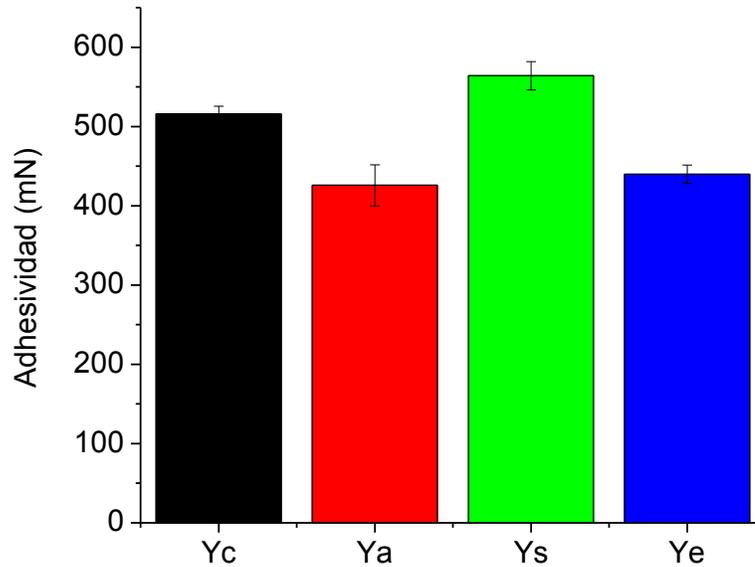


Figura 11. Adhesividad de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

Cohesividad es la propiedad textural mediante la que podemos inferir el nivel de interacción intermolecular entre los componentes del alimento y su facilidad o dificultad para desintegrarse; los yogures Yc y Ye exhibieron los valores más altos ($p \leq 0.05$) de cohesividad (Cuadro 4), a diferencia de los yogures Ya y Ys ($p \leq 0.05$), (Figura 12), mediante lo cual podemos deducir que las interacciones entre las cadenas de caseínas son menos fuertes y una desestructuración por efecto de esfuerzos mecánicos puede afectar el grado de recuperación del gel.

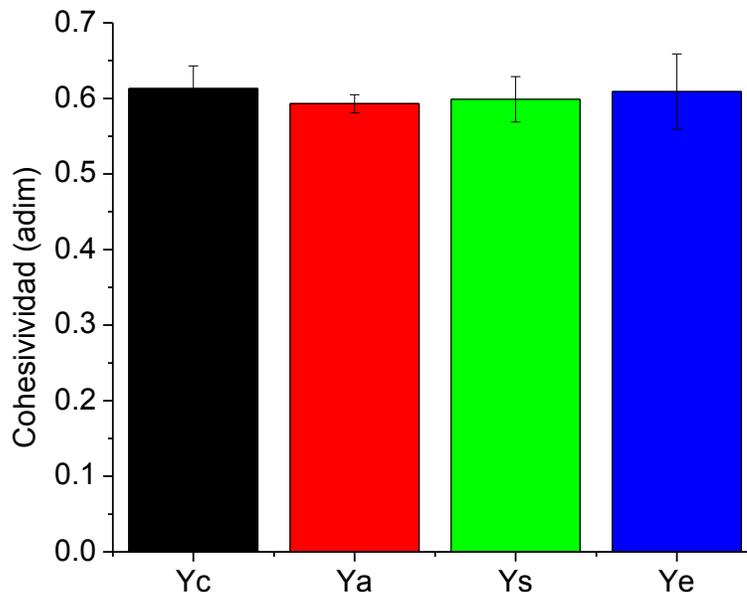


Figura 12. Cohesividad de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

Los resultados mostrados para sinéresis (Cuadro 3, Figura 8), muestran un comportamiento de relación directa con la cohesividad, que infiere sobre la fortaleza o debilidad de la red para soportar las pérdidas estructurales y la expulsión de lactosuero contenido, tras la aplicación de esfuerzos como el batido y lo que concuerda con lo reportado por Mokoonlall, Nöbel, y Hinrichs (2016), quien menciona que a mayores tasas de cizallamiento, la estructura del gel se destruye completamente dando lugar a una disminución de la viscosidad, así como una mayor predisposición a la sinéresis.

Así mismo los resultados arrojados por los análisis de las propiedades reológicas de los yogures adicionados con diferentes edulcorantes, muestran una relación con las propiedades cohesivas y de firmeza de los yogures (Cuadro 4).

Los valores de elasticidad de Yc fueron más altos ($p \leq 0.05$) en comparación con los yogures con edulcorantes no calóricos (Cuadro 4), que Ya, Ys y Ye mostraron valores de elasticidad menores ($p \leq 0.05$) (Figura13), esto en parte

puede ser debido a que Yc contuvo mayor contenido de sólidos totales, principalmente proteína lo que condujo a reforzar la red proteica y exhibir un comportamiento elástico mayor.

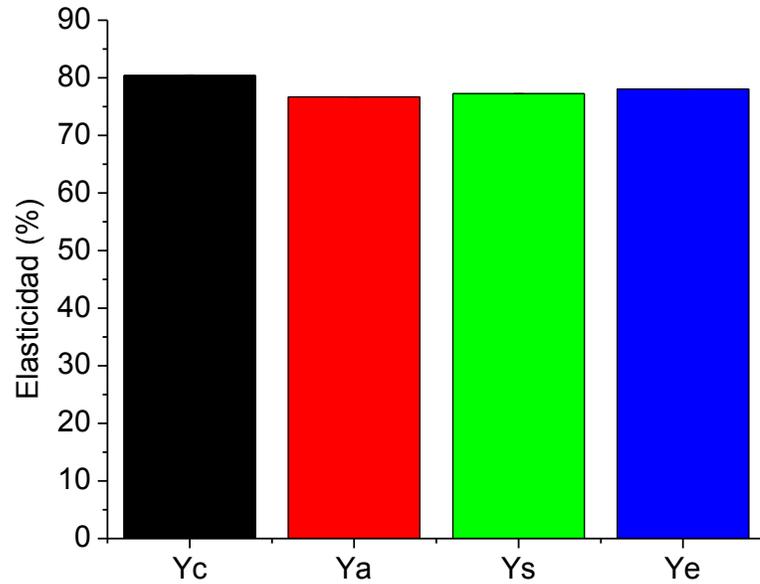


Figura 13. Elasticidad de los diferentes tratamientos de yogur (\pm DE). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

Cuadro 4. Valores medios (\pm DE) de los parámetros instrumentales de textura de los tratamientos de yogur.

Tratamiento	Fracturabilidad (mN)	Firmeza (mN)	Adhesividad (mN)	Cohesividad (adim)	Elasticidad (%)
Yc	492.67 \pm 20.25 ^b	662.93 \pm 10.7 ^c	516.10 \pm 9.37 ^b	0.61 \pm 0.03 ^b	80.40 \pm 0.02 ^b
Ya	419.44 \pm 20.06 ^a	440.64 \pm 4.52 ^a	425.87 \pm 25.89 ^a	0.59 \pm 0.01 ^a	76.67 \pm 0.00 ^a
Ys	462.49 \pm 4.97 ^c	519.09 \pm 5.03 ^b	564.03 \pm 17.96 ^c	0.59 \pm 0.03 ^{ab}	77.25 \pm 0.02 ^{ab}
Ye	474.83 \pm 6.62 ^{cb}	512.88 \pm 10.1 ^b	439.87 \pm 11.45 ^a	0.60 \pm 0.05 ^b	78.05 \pm 0.01 ^{ab}

^{a,b,c} Superíndices distintos en la misma columna indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$). *Obtenido por diferencia de los cuatro componentes del yogur. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionada con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

3.5.6. Comportamiento reológico de los tratamientos de yogur

Barrido de amplitud

El yogurt es un material viscoelástico, cuyas propiedades reológicas pueden ser descritas mediante ensayos dinámicos los cuales son adecuados para caracterizar con el tiempo este tipo de materiales viscoelásticos no alterados. La ventaja principal es que se puede determinar en un intervalo de escalas de tiempo, la contribución de los componentes, modulo viscoso (G''), modulo elástico (G') y factor de cedencia ($\tan \delta = G'' / G'$), esta determinación debe realizarse en la denominada zona viscoelástica lineal; es decir, en la región donde el esfuerzo es proporcional a la deformación, para que los datos puedan ser interpretados correctamente (Rosenthal, 2001; Tabilo-Munizaga y Barbosa-Cánovas, 2005).

En las figuras 14 y 15 se puede observar una zona viscoelástica lineal en donde los distintos tratamientos de yogur fueron independientes de la magnitud de deformación a los que fueron sometidos, produciendo valores de G' y G'' proporcionales, en esta zona si la deformación fuera eliminada o suprimida la estructura de los yogures puede recuperarse a un estado relativamente original (Norton, Spyropoulos y Cox, 2011).

Los valores de G' de los Yc, Ya, Ys y Ye indicaron que en todos los tratamientos la zona viscoelásticas lineal se encontró en un porcentaje de deformación de 0.08 y 0.1, los resultados indican que las sustituciones de sacarosa por los distintos edulcorantes contribuyen de manera similar al desarrollo de una zona extendida y estructurada de la matriz proteica, que puede ser observada en la Figura 14.

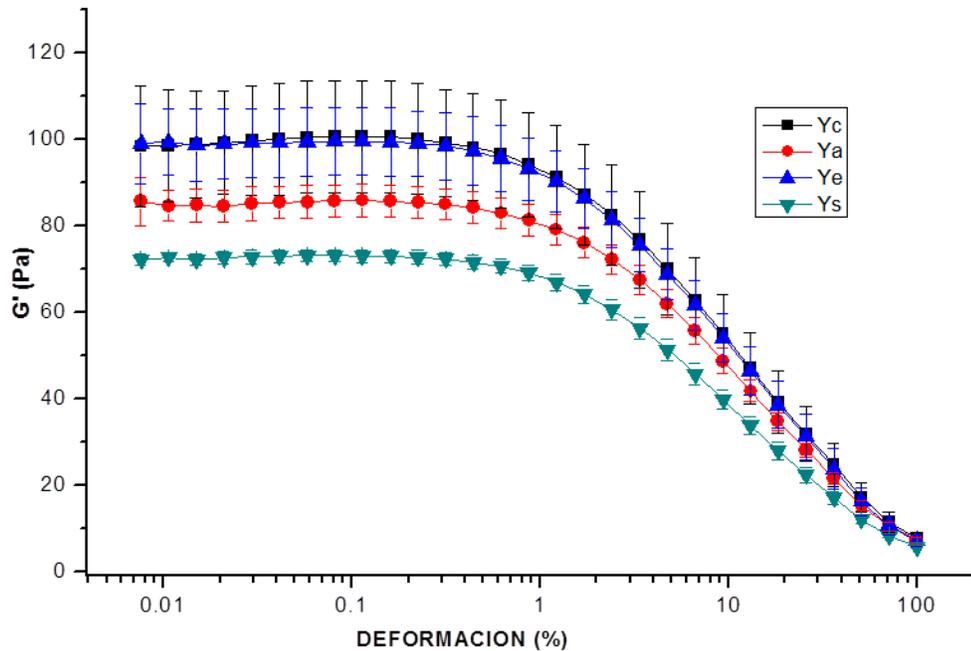


Figura 14. Variación del módulo G' de los diferentes tratamientos de yogur Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

Si el valor de G' es mayor que el de G'' , el comportamiento mecánico del alimento es predominantemente sólido; es decir, la deformación puede ser esencialmente elástica o recuperable; por el contrario, si el valor de G'' es mayor al de G' , la energía usada para deformar el material es disipada viscosamente y el alimento se comporta predominantemente como líquido (Tabilo-Munizaga & Barbosa-Cánovas, 2005).

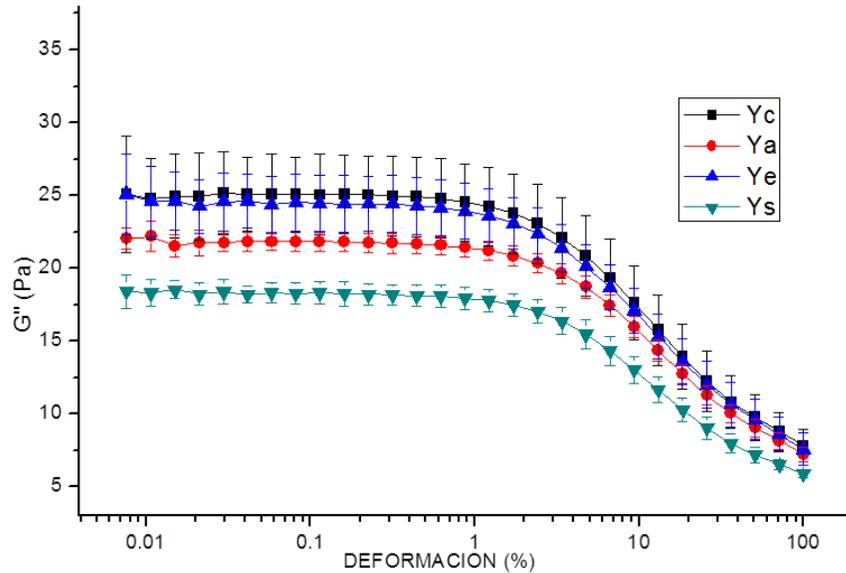


Figura 15. Variación del módulo G'' de los diferentes tratamientos de yogur. Yc: Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

Se puede observar (Cuadro 5) que los valores de G' fueron mayores ($p \leq 0.05$) que los de G'' indicando con ello que los yogures Yc, Ya, Ys, y Ye mostraron un comportamiento reológico predominantemente elástico, el Yc presento valores de G' y G'' mayores ($p \leq 0.05$) que aquellos exhibidos por Ya y Ys, la sustitución de sacarosa por glucósidos de esteviol (rebaudiosido A) resulto en un yogur Ye con valores similares de G' y G'' que el Yc, con estos resultados podemos deducir que los arreglos estructurales del Ye no se ven modificados con la sustitución en su formulación, a diferencia de los Ya y Ys en los cuales se observa una disminución en los valores de G' y G'' (Cuadro 5) infiriendo con ello que los arreglos estructurales de estos se ven modificados, viéndose debilitadas las estructuras del gel del yogur cuando la sacarosa es sustituida por acesulfame k y sucralosa como edulcorantes en la formulación, al respecto Lobato-Calleros, Aguirre-Mandujano, y Vernon-Carter (1999), mencionan que la respuesta de un alimento ante la aplicación de un esfuerzo está directamente

relacionada con el arreglo estructural de las moléculas de sus componentes, comprobándose que la sustitución de sacarosa por glucósidos de esteviol (rebaudiosido A) al yogur Ye aumento el número de agentes de interacción y la fuerza de los geles (Knudsen, Karlsson, Ipsen & Skibsted, 2006) obteniéndose así valores similares de G' y G'' que el Yc.

Cuadro 5. Valores del módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\tan \delta$) de los yogures después de tres días de su almacenamiento (\pm DE).

Tratamiento	G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$ (adim)
Yc	102.97 \pm 4.42 ^c	26.13 \pm 0.85 ^c	0.25 \pm 0.00 ^a
Ya	87.60 \pm 1.15 ^b	22.17 \pm 0.38 ^b	0.25 \pm 0.00 ^a
Ys	73.73 \pm 1.01 ^a	18.63 \pm 0.25 ^a	0.25 \pm 0.00 ^a
Ye	95.80 \pm 5.04 ^{bc}	25.07 \pm 0.69 ^c	0.26 \pm 0.01 ^a

^{a,b,c} Superíndices distintos en la misma columna indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

El parámetro $\tan \delta$ (G'' / G') es una medida adimensional y revela la proporción del comportamiento viscoso al elástico ante la deformación (Figura 16). El valor de $\tan \delta = 0$ corresponde a una respuesta elástica; si $\tan \delta = \infty$ se trata de una respuesta viscosa y si $0 < \tan \delta < \infty$ el material muestra respuesta viscoelástica (Tabilo-Munizaga & Barbosa-Cánovas, 2005). Las variaciones de yogures Yc, Ya, Ys y Ye, no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en sus valores de $\tan \delta$ (Cuadro 5); mostrando valores menores de la unidad por lo que su comportamiento reológico fue predominantemente sólido o elástico

Las variaciones de los módulos de G' y G'' de los yogures Yc, Ya, Ys y Ye mostraron una tendencia similar en función de la deformación, identificándose de manera general tres zonas de comportamiento: Zona I, a bajas deformaciones (0.02 hasta 0.11 %) los valores de ambos módulos permanecieron prácticamente constantes por lo que, fue referida como la región

viscoelástica lineal en donde los valores de ambos módulos fueron independientes de la deformación. Zona II, a deformaciones mayores de 0.11 hasta aproximadamente 5.0 %, en la que los valores de ambos módulos disminuyeron de forma no lineal, indicando con ello una ruptura parcial de la estructura elástica del yogur (atribuida a la red proteínica) y Zona III, a valores de deformación mayores de 5.0 % en la que los valores de G' y G'' sufrieron disminución pronunciada. Las curvas de ambos módulos intersectaron y G'' supero los valores de G' , comportamiento típico de un fluido viscoelástico (Keogh & O'Kennedy, 1998; Ramírez-Santiago, 2008).

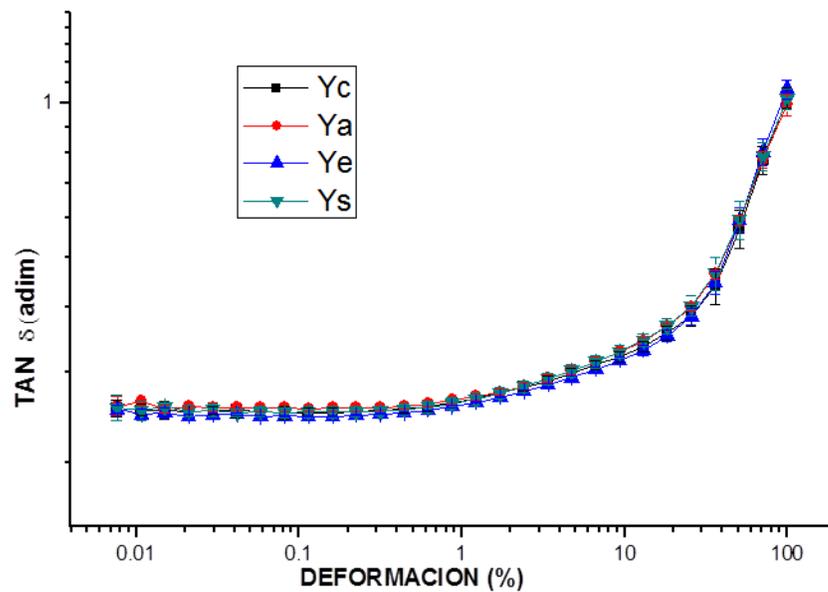


Figura 16. Variación del módulo $Tan \delta$ de los diferentes tratamientos de yogur. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

Comportamiento de flujo

La Figura 17 muestra las variaciones en la viscosidad aparente (η_{ap}) de los yogures batidos Yc, Ya, Ys y Ye en función de la tasa de corte y el tiempo de almacenamiento. Los datos de esfuerzo cortante (σ) contra tasa de corte ($\dot{\gamma}$) de

los yogures fueron ajustados a diferentes modelos matemáticos. El modelo que ajustó mejor los datos experimentales ($R^2 = 0.98 - 0.99$) fue en todos los casos el de Ellis (Ecuación 1).

$$\eta_{ap} = \frac{\eta_0}{[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^p} \quad (1)$$

Donde η_{ap} = viscosidad aparente; η_0 = viscosidad de corte cero o límite Newtoniano, en el que la viscosidad se aproxima a una constante a muy bajas tasas de corte; λ = tiempo constante asociado al tiempo de relajación de polímeros en solución para recuperarse del estiramiento y deformación provocados por el esfuerzo aplicado en todo el rango de tasa de corte; $\dot{\gamma}$ = tasa de corte y p = es el índice de comportamiento de flujo de la Ley de la Potencia (Steffe, 1996).

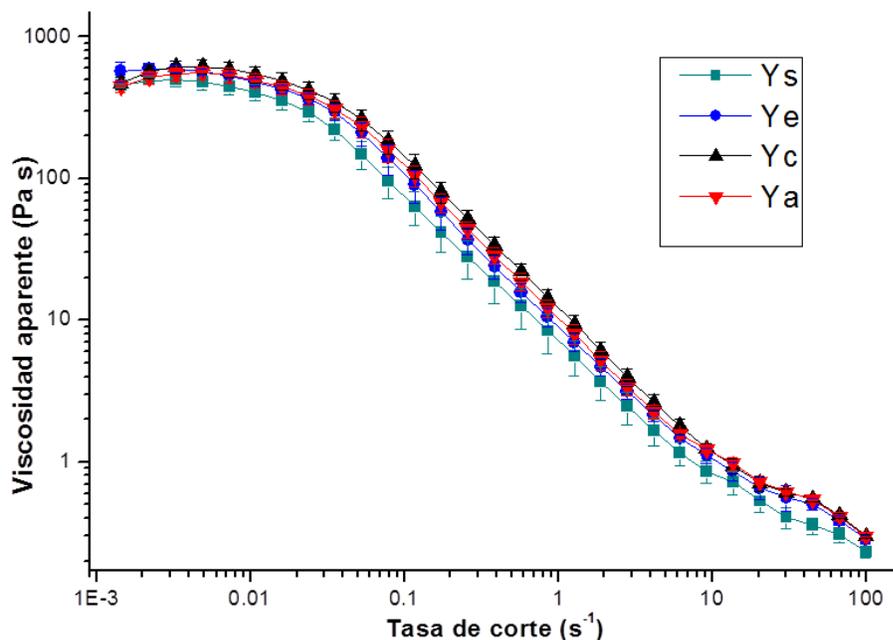


Figura 17. Variación de la viscosidad aparente como función de la tasa de corte y el tiempo de almacenamiento. Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa y Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A.

Así mismo, en la Figura 17 se puede observar que todos los tratamientos de yogur estuvieron caracterizados por exhibir dos zonas importantes: a) una

región Newtoniana a bajas tasas de corte, la cual es típica de materiales que exhiben una viscosidad estructural, como consecuencia de la formación de una estructura reversible en estado de reposo o estado de equilibrio del sistema (Darby, 1996) y b) una región de adelgazamiento al corte, es decir, una reducción de la viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla; comportamiento característico de los yogures (Sah, Vasiljevic, McKechnie & Donkor, 2016).

Los valores de los parámetros reológicos de la ecuación de Ellis para los yogures se presentan en el Cuadro 6. Como podemos observar, no se presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) los tratamientos de yogur Yc, Ya y Ys en sus valores de η_0 (Cuadro 6). El valor más elevado de η_0 , exhibido por Ye indica una mayor interacción entre la adición de los glucósidos de esteviol (rebaudiosido A) obtenidos de la *Estevia rebaudiana* Bertoni y de los componentes de la leche, en la estructuración y propiedades mecánicas del yogur. Se ha informado que la adición de esteviósidos actúan como agentes estructurantes junto con las micelas de caseína en el yogur, provocando geles más resistentes con una mayor resistencia a la deformación (Ramírez-Santiago, 2008).

Estos resultados concuerdan a los observados en los módulos viscoelásticos de los yogures (Cuadro 5); reafirmando la teoría de que la adición de glucósidos de esteviol (rebaudiosido A) en contacto con la red proteínica reforzó la estructura de la red del yogur.

El valor de λ proporciona un orden de la tasa de corte crítica que marca el final de la región Newtoniana y el establecimiento de la región adelgazante al corte (Rao, 1999); así, valores bajos de λ en los yogures indican que su estructura sufrió ruptura a tasas de corte menores. Los yogures Ys y Ye presentaron valores significativamente más elevados de λ que él Yc y Ya, (Cuadro 6). A partir de estos resultados, se puede inferir que las adiciones de distintos edulcorantes contribuyeron de forma diferente a la formación y estructura de la red de caseína del yogur.

La aplicación de pequeños esfuerzos provoca rupturas y deformaciones en las estructuras ordenadas; las interacciones cadena - cadena se rompen y se reforman llegando a un equilibrio; el resultado es que la viscosidad permanece constante (Trujillo-Ramírez, 2013). A tasas de corte mayores, la ruptura sufre cambios irreversibles, asociados con la fluidez de sus partículas unas sobre otras.

Cuadro 6. Valores medios de los parámetros del modelo de Ellis que obedecieron los diferentes yogures.

Tratamiento	λ (s)	P (adim)	η_0 (Pa s)
Yc	60.73 ± 5.55^a	0.089 ± 0.01^{ab}	543.45 ± 6.45^a
Ya	58.66 ± 5.28^a	0.078 ± 0.00^a	527.28 ± 6.68^a
Ys	98.40 ± 6.72^b	0.095 ± 0.01^{ab}	531.83 ± 6.91^a
Ye	95.75 ± 6.62^b	0.110 ± 0.02^b	582.34 ± 6.93^b

^{a,b,c} Superíndices distintos en la misma columna indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$). Yc: Yogur control, Ya: Yogur adicionado con acesulfame K, Ys: Yogur adicionado con sucralosa, Ye: Yogur adicionado con rebaudiósido A, η_0 : viscosidad de corte cero; λ : tiempo de relajación; p : índice de adelgazamiento al corte.

Los valores de p de los tratamientos de yogur Yc, Ya y Ys no difirieron significativamente ($p > 0.05$), el tratamiento que presento mayor valor de p fue el Ye, se puede observar que todos los tratamientos de yogur presentaron valores de p menores a la unidad, evidenciando su carácter pseudoplástico. A partir de estos datos puede inferirse que la adición de edulcorantes le confiere un comportamiento pseudoplástico menor al yogur.

3.6. Conclusiones

Concentraciones de 0.1 g. L^{-1} de sucralosa, 0.4 g. L^{-1} de acesulfame K y 0.19 g. L^{-1} de glucósidos de esteviol obtenidos de *Stevia rebaudiana* Bertoni (Rebaudiosido A) confirieron un dulzor equivalente al conferido por 60 g.L^{-1} de sacarosa en la elaboración de yogur.

Las incorporaciones de edulcorantes artificiales en sustitución de sacarosa resultaron en yogures con mayor porcentaje de liberación de lactosuero (sinéresis).

Los parámetros texturales de Ya mostraron los valores más bajos en comparación con el resto de los tratamientos, Ye por su parte, mostró valores comparables de fracturabilidad, cohesividad, y elasticidad con el tratamiento control, Yc.

Los diferentes yogures adicionados con distintos edulcorantes presentaron un comportamiento de reoadelgazamiento al corte, siendo Ye el tratamiento comparable al control (Yc).

Las pruebas dinámicas oscilatorias mostraron que en todos los tratamientos hay un carácter predominantemente elástico, siendo comparables Yc, Ye y Ya, mientras que Ys mostró valores menores del módulo de almacenamiento.

3.7. Literatura citada

AOAC (1998). In P. Cunniff (Ed.), Official methods of analysis (16th ed.). USA: Association of Official Analytical Chemists.

Cardoso, J. M. P., Battochio, J. R., Cardello, H. M. A. B., & André, B. (2004). Equivalência de dulçor e poder edulcorante de edulcorantes em função da temperatura de consumo em bebidas preparadas com chá-mate em pó solúvel. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 24 (3), 448 - 452.

Castillo, M. I. R. I. A. N., Borregales, C., & Sánchez, M. (2004). Influencia de la pectina sobre las propiedades reológicas del yogur. *Revista de la Facultad de Farmacia*, 46 (2).

Cheng, J., Xie, S., Yin, Y., Feng, X., Wang, G., Guo, M., y otros. (2017). Physiochemical, texture properties, and the microstructure of set yogurt using whey protein-sodium tripolyphosphate aggregates as thickening agents. *Journal of the Science of food and agriculture*, 1 - 26.

- Darby, R. (1996). *Chemical Engineering Fluid Mechanics*. Nueva York: Marcel Dekker, Inc
- De la Cruz Huamán, E. D., & Gómez, E. S. O. (2012). Elaboración de leche fermentada edulcorada con stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Revista Investigación y Amazonía*,1 (2), 59 - 63.
- Deniņa, I., Semjonovs, P., Fomina, A., Treimane, R., & Linde, R. (2014). The influence of stevia glycosides on the growth of *Lactobacillus reuteri* strains. *Letters in applied microbiology*, 58 (3), 278 - 284.
- Díaz, B., Sosa, M., & Vélez, J. (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.
- Goto, A., & Clemente, E. (1998). Influência do rebaudiosídeo A na solubilidade e no sabor do esteviosídeo. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 18 (1), 3 - 6.
- Guggisberg, D., Piccinali, P., & Schreier, K. (2011). Effects of sugar substitution with Stevia, Actilight™ and Stevia combinations or Palatinose™ on rheological and sensory characteristics of low-fat and whole milk set yoghurt. *International Dairy Journal*,21 (9), 636 - 644.
- Han, X., Yang, Z., Jing, X., Yu, P., Zhang, Y., Yi, H., & Zhang, L. (2016). Improvement of the texture of yogurt by use of exopolysaccharide producing lactic acid bacteria. *Biomed research international*, 2016(16), 1 - 15.
- Keogh, M. K., & O'kenedy, B. T. (1998). Rheology of stirred yogurt as affected by added milk fat, protein and hydrocolloids. *Journal of Food Science*,63(1), 108 - 112.
- Knudsen, J. C., Karlsson, A. O., Ipsen, R., Skibsted, L. H. (2006). Rheology of stirred acidified skim milk gels with different particle interactions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, 274, 56 - 61.

- Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E. y Vernon-Carter, E. J. (1999). Propiedades reológicas de análogos de queso: efectos de sustituto de grasa y humedad. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 2(3): 119 - 124.
- 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.
- Nabors, L. O., & Gelardi, R. C. (2001). Alternative sweeteners: an overview. *Alternative sweeteners*, 2, 1 - 10.
- Norton, Ian. T., Spyropoulos, Fotios., y Cox (2011). *Practical food rheology: An Interpretive approach*. Wiley-Blackwell, UK.
- Pérez Salazar, R. C., & Carrasco Loyola, M. B. (2006). Crecimiento in Vitro de *Streptococcus mutans* y *Lactobacillus acidophilus* en medios que contengan edulcorantes artificiales. *Kiru*, 3 (1), 2 - 6.
- Ramírez Santiago, C. (2008). Propiedades estructurales, reológicas y sensoriales de yogur al sustituir la grasa láctea por emulsiones múltiples y la sacarosa por un esteviósido. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.
- Rao, M. A. (1999). *Rheology of Fluid and Semisolid Foods*. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc.
- Rodríguez-Bernal, J. M., Serna-Jiménez, J. A., Uribe-Bohórquez, M. A., Klotz, B., & Quintanilla-Carvajal, M. X. (2014). Aplicación de la metodología de superficie de respuesta para evaluar el efecto de la concentración de azúcar y de cultivos iniciadores comerciales sobre la cinética de fermentación del yogurt. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13 (1), 213 - 225.
- Rosenthal, A. J. (2001). *Textura de los alimentos, medida y percepción*. Editorial Acribia. Zaragoza, España.

- Sah, B. N. P., Vasiljevic, T., McKechnie, S., & Donkor, O. N. (2016). Physicochemical, textural and rheological properties of probiotic yogurt fortified with fibre-rich pineapple peel powder during refrigerated storage. *LWT-Food Science and Technology*, 65, 978 - 986.
- 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.
- Sodini, I., Remeuf, F., & Haddad, S. (2004). The relative effect of milk base, starter, and process on yogurt texture: A Review. *Critical Reviews in food Science and nutrition*, 113 - 137.
- Steffe, J. (1996). *Rheological Methods in food process engineering*. USA: Michigan State University.
- Swithers, S. E. (2015). Artificial sweeteners are not the answer to childhood obesity. *Appetite*, 93, 85 - 90.
- Tabilo-Munizaga, G. y Barbosa-Cánovas, V. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of food Engineering* 67, 147 - 156.
- Trujillo-Ramirez, D., (2013). Estabilidad y propiedades reológicas de micro y nano emulsiones aceite en agua preparadas con complejos solubles hidrolizados de proteína de lactosuero- pectina de tejocote. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.