

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**ESTUDIO DEL POTENCIAL DE SÓLIDOS
DE JÍCAMA (*Pachyrhizus erosus* L. Urban)
COMO AGENTE ESTABILIZANTE
DE EMULSIONES PICKERING ACEITE EN AGUA.**

Tesis que presenta:

Yazuri Araceli Carrera Tarela

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Asesor: Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter.

Jurado calificador:

Presidente: Dr. Francisco Cruz Sosa.

Secretario: Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez.

Vocal: Dr. César Pérez Alonso.

México, D.F. Enero 2014

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**ESTUDIO DEL POTENCIAL DE SÓLIDOS
DE JÍCAMA (*Pachyrhizus erosus* L. Urban)
COMO AGENTE ESTABILIZANTE
DE EMULSIONES PICKERING ACEITE EN AGUA.**

Tesis que presenta:
Yazuri Araceli Carrera Tarela
Para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

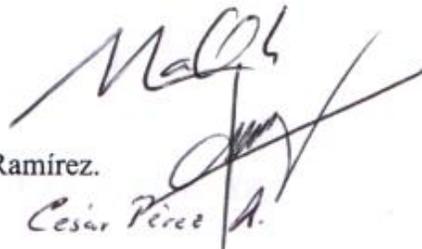
Asesor: Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter.

Jurado calificador:

Presidente: Dr. Francisco Cruz Sosa.

Secretario: Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez.

Vocal: Dr. César Pérez Alonso.



The image shows three handwritten signatures in black ink. The top signature is for Dr. Francisco Cruz Sosa, the middle one for Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez, and the bottom one for Dr. César Pérez Alonso. The signatures are written in a cursive style.

México, D.F. Enero 2014

AGRADECIMIENTOS.

A mis padres Josefina y Miguel que han sido mi mayor apoyo e inspiración. Gracias por su comprensión, paciencia y por todo el amor que siempre me han brindado. A mis hermanas, Ana y Yanelli a quienes admiro y quiero.

A David por su amor y apoyo, por inspirarme a seguir adelante y superarme.

A mi gran amigo Eduardo por escucharme y alentarme en todos esos buenos y malos momentos. A mis compañeros de laboratorio, Ezri, Héctor y Carmen por compartir sus conocimientos y amistad.

Al Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez por la dirección y consejos que me brindó para llevar a cabo este proyecto, por el “personal coaching” y las buenas pláticas. Le estaré agradecida siempre.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante mis estudios mediante la beca escolar 265497.

A los miembros de jurado Dr. Francisco Cruz Sosa, Dr. César Pérez Alonso y al Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez, por los comentarios y tiempo invertido en la revisión de esta tesis.

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	5
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. EMULSIONES	8
2.2. EMULSIONES PICKERING	9
2.3. JÍCAMA	13
3. HIPÓTESIS	16
4. OBJETIVOS	16
4.1. OBJETIVO GENERAL	16
4.2. OBJETIVOS PARTICULARES	16
5. MATERIALES Y MÉTODOS	18
5.1. MATERIALES	18
5.2. MÉTODOS	18
5.2.1. Elaboración de sólidos de jícama	18

5.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	19
5.2.3. Preparación de emulsiones	19
5.2.4. Potencial Zeta	20
5.2.5. Microscopía óptica	21
5.2.6. Distribución de tamaño de partícula y gota	21
5.2.7. Pruebas reológicas	21
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	23
6.1. Morfología de los sólidos de jícama	23
6.2. Potencial Z	25
6.3. Morfología de las emulsiones	28
6.4. Distribución de tamaño de partícula y gota	32
6.5. Reología de las emulsiones	36
7. CONCLUSIONES	41
8. REFERENCIAS	44

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto que tienen los sólidos obtenidos del tubérculo Jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) en la estabilización de emulsiones aceite en agua tipo Pickering.

Para lo cual se obtuvieron sólidos de Jícama con tamaños de partícula $<44 \mu\text{m}$ que fueron usados a concentraciones de 3, 5 y 7% p/p en la fase acuosa para estabilizar emulsiones aceite en agua con una fracción de volumen de fase dispersa de 0.15, las emulsiones fueron nombradas E₃, E₅ y E₇.

En las imágenes de microscopía electrónica de barrido se pudo observar que los sólidos de jícama contiene un alto contenido de almidón que presenta diferentes formas debido al proceso de secado, además de residuos de otros componentes de la jícama.

Se realizaron mediciones de Potencial Zeta en donde se apreció que al aumentar la concentración de sólidos en las emulsiones se obstaculizó la interacción de los grupos ionizables y los sólidos tienden a formar agregados.

Las imágenes de microscopía óptica de las emulsiones muestran que la fase acuosa de la emulsión se encuentra formada por una red compleja compuesta por los sólidos de jícama lo que inmoviliza las gotas, además de sólidos adsorbidos en la superficie de las gotas. Por

otro lado al aumentar la concentración de sólidos en la emulsión, las gotas tienen menor tamaño y se vuelven más irregulares.

Las pruebas de dispersión de luz mostraron que conforme aumenta la concentración de sólidos, las emulsiones presentan una menor distribución de tamaño de gota y de partícula, que puede deberse a la fricción entre los componentes de los sólidos.

Por otro lado, se evaluaron las propiedades reológicas de las emulsiones encontrándose que todas las emulsiones presentaron un comportamiento predominantemente elástico, puesto que $\tan(\delta) < 1$ a cualquier tiempo de almacenamiento. En las curvas de viscosidad aparente en función de la tasa de corte, se observó un comportamiento típico reoadelgazante que fue más pronunciado al aumentar la concentración de sólidos.

Basado en las propiedades reológicas, distribución de tamaño de partícula, potencial zeta e imágenes de microscopía de las emulsiones se concluyó que la estabilidad de las emulsiones incorporando sólidos de jícama se encuentra asociada a la formación de flóculos tridimensionales ubicados en la fase continua que da lugar a una estructura tipo red que inmoviliza las gotas de la emulsión y en menor medida a la adsorción de los sólidos en la interfase aceite-agua que provee una protección estérica.

1. INTRODUCCIÓN

Por varias décadas se han utilizado componentes con actividad superficial como emulsificantes sintéticos por las industrias de alimentos, cosméticos y farmacéuticas. Sin embargo estos agentes son altamente tóxicos, de difícil degradación y conllevan un alto costo de producción por lo cual actualmente se llevan a cabo trabajos de investigación que tienen como objetivo sustituirlos por emulsificantes naturales derivados de recursos naturales como plantas o microbios [Colin *et al.*, 2013], que a su vez sean sostenibles, biodegradables y no tóxicos.

Las emulsiones Pickering son formulaciones atractivas ya que poseen numerosas similitudes con las emulsiones clásicas estabilizadas con surfactantes [Chevalier y Bolzinger, 2013]. El desarrollo de emulsiones Pickering comestibles ha crecido recientemente por su potencial para encapsular y liberar controladamente componentes bioactivos, modificar la textura y reducir las calorías. En este sentido, las emulsiones Pickering están definidas como aquellas estabilizadas por partículas adsorbidas en la interfase que idealmente retardan y previenen la coalescencia y separación de fases en la emulsión [Rousseau, 2013].

Estabilizar Interfaces por mecanismos Pickering involucra partículas humedecidas parcialmente por cada uno de los fluidos que constituyen la emulsión, formando una protección mecánica con posibles efectos electrostáticos, lo cual requiere la presencia de

moléculas con actividad superficial. En este caso, la fuerza que impulsa la estabilización de la interfase es la preferencia de las partículas de permanecer en la interfase en lugar del seno de los fluidos [Aveyard *et al.*, 2003]. A pesar de tener una idea de los mecanismos de estabilización en emulsiones Pickering, la aplicación de estas a escalas industriales requiere de una compresión más amplia.

En la literatura se pueden encontrar diversas investigaciones sobre emulsiones Pickering destinadas al consumo humano en la cuales se marca la tendencia de buscar partículas provenientes de recursos botánicos. Más aun, en años recientes esta búsqueda se ha enfocado en la obtención de partículas obtenidas de recursos naturales regionales con el fin de ayudar al sostenimiento ambiental y las economías locales.

En regiones tropicales y subtropicales se consume comúnmente la jícama como fuente importante y económica de minerales, carbohidratos y fibra cruda [Bhandari *et al.*, 2003]. Existen múltiples investigaciones en donde se ha demostrado la viabilidad del almidón de jícama como un aditivo para productos alimenticios [Ramos-de-la-Peña *et al.*, 2013; Mali *et al.*, 2005; Amaya-Llano *et al.*, 2008, Vaillant *et al.*, 1995, Nindjin *et al.* 2011].

Sin embargo, el uso de almidón de jícama implica una etapa de extracción lo que produce un incremento importante en el costo y eficiencia del proceso. Estudios recientes indican que la harina de diferentes recursos botánicos pueden funcionar similarmente que los almidones, por ejemplo, películas de harina de arroz muestran propiedades mecánicas similares que las películas elaboradas a base de almidón de arroz [Dias *et al.*, 2010]. Dado que la composición de la harina de arroz es más rica, esta ofrece mayor flexibilidad bajo tratamiento hidrotérmico que el almidón de arroz [Puncha-arnon y Uttapap, 2013]. Del

mismo modo se han preparado películas biodegradables usando harina y almidón aislado provenientes de plátano, donde las películas elaboradas con la harina de plátano mostraron mayor flexibilidad que las elaboradas con almidón y una mayor temperatura de transición vítrea asociadas a la presencia de otros componentes (proteínas, lípidos y fibra) en la harina [Pelissari *et al.*, 2013].

Por tanto, un tema importante de investigación es evaluar la capacidad de harinas de diferentes fuentes naturales como aditivos de grado alimenticio y conocer su comportamiento aplicado a alimentos específicos.

Finalmente, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de sólidos de jícama del género *Pachyrhizus erosus* L. Urban en la morfología, distribución de tamaño de partícula, propiedades reológicas y estabilidad de emulsiones Pickering agua en aceite.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. EMULSIONES

Las emulsiones juegan un papel importante en la producción de diferentes alimentos. Aderezos de ensalada, mayonesa, margarina, salsas, helado son algunos ejemplos de emulsiones alimenticias.

Una emulsión es la mezcla de 2 líquidos inmiscibles (comúnmente aceite y agua) con uno de los líquidos disperso como pequeñas gotas (fase dispersa) en el otro (fase continua).

Las emulsiones son comúnmente clasificadas en dos tipos: i) emulsiones aceite en agua (O/W) que consiste en gotas de aceite dispersas en una fase acuosa; ii) emulsiones agua en aceite (W/O) que consisten de gotas de agua dispersas en una fase oleosa. Por ejemplo, el aderezo es un tipo de emulsión O/W y la mantequilla es W/O. Además de las emulsiones convencionales (O/W o W/O) es posible preparar dos tipos de emulsiones múltiples, agua en aceite en agua (W/O/W) y aceite en agua en aceite (O/W/O). Por otra parte, la concentración de gotas en una emulsión está descrita en términos de la fracción de volumen de fase dispersa (ϕ) [McClements (2005), Morrison y Ross (2002)].

Las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables debido a que el contacto entre las moléculas de agua y aceite no es favorable energéticamente, sin embargo, es posible formar emulsiones que son cinéticamente estables (metaestables) por un periodo de tiempo

mediante la incorporación de sustancias conocidas como agentes emulsificantes [McClements, 2005].

Los emulsificantes son moléculas superficialmente activas que se adsorben en la superficie de las gotas, formando una membrana protectora que retarda la aproximación de las gotas y su agregación. Para este propósito son comúnmente utilizados surfactantes, proteínas y polímeros. No obstante, los diferentes tipos de emulsificantes estabilizan las emulsiones a través de diferentes mecanismos de estabilización, por un lado los surfactantes generalmente contienen un grupo polar (hidrófilo) y uno no polar (hidrófobo), por lo que se adsorben en la interfase y como resultado reduce la tensión superficial interfacial. Por otro lado, los polímeros y proteínas controlan la estabilidad en gran medida a través de repulsión eléctrica y estérica controlada por el grado de desdoblamiento y la estructura formada alrededor de las gotas [Hunter *et al.*, 2008].

2.2. EMULSIONES PICKERING

El mecanismo de estabilización por partículas o estabilización Pickering es aquel donde las partículas se encuentran acumuladas en la interfase para formar una barrera mecánica que protege a las gotas de la emulsión contra la colaescencia [Dickinson, 2012]. Este mecanismo fue descubierto por el científico S. Pickering quien publicó el primer trabajo que reportaba la elaboración de una emulsión O/W estabilizada con partículas en el año 1907. Las emulsiones Pickering conservan las propiedades básicas de las emulsiones clásicas (estabilizadas por surfactantes) así que pueden sustituir en muchas de sus aplicaciones [Chevalier y Bolzinger, 2013]. Sumado a esto, las emulsiones Pickering

brindan propiedades específicas a las emulsiones dependiendo de la naturaleza funcional de las partículas, además de modificar la textura de los productos, liberar controladamente componentes bioactivos y reducir las calorías.

Las emulsiones Pickering pueden ser de cualquier tipo, O/W o W/O e incluso múltiple, dependiendo de si la naturaleza de las partículas sea predominantemente hidrofílica o hidrofóbica. De manera que el ángulo de contacto (θ) que forma la partícula con la interfase agua-aceite (Figura 1) define el tipo de emulsión que se forma, por ejemplo, cuando $\theta < 90^\circ$ (partículas hidrofílicas) la mayoría de las partículas reside en la fase acuosa por lo tanto produce emulsiones O/W, por el contrario cuando $\theta > 90^\circ$ (partículas hidrofóbicas) las partículas prefieren estar en la fase oleosa y se forman emulsiones W/O [Dickinson, 2012].



Figura 1. Partículas situadas en la interfase mostrando los ángulos de contacto según su afinidad.

Por otra parte, existen dos mecanismos en la estabilización de interfases con partículas, es decir, i) la formación de una película densa (monocapa o multicapa) adsorbida en las proximidades de la interfase como se muestra en la Figura 2a, en donde las partículas

adsorbidas forman una barrera estérica que inhibe la coalescencia, esta barrera es más efectiva cuando las partículas son preferentemente mojadas por la fase continua, ii) la adsorción de partículas agregadas como se muestra en la Figura 2b, en este caso las partículas forman redes tridimensionales ubicadas en la fase continua limitando la movilidad y coalescencia de las gotas [Dickinson, 2010; Aveyard *et al.*, 2003; Binks y Whitby, 2005].

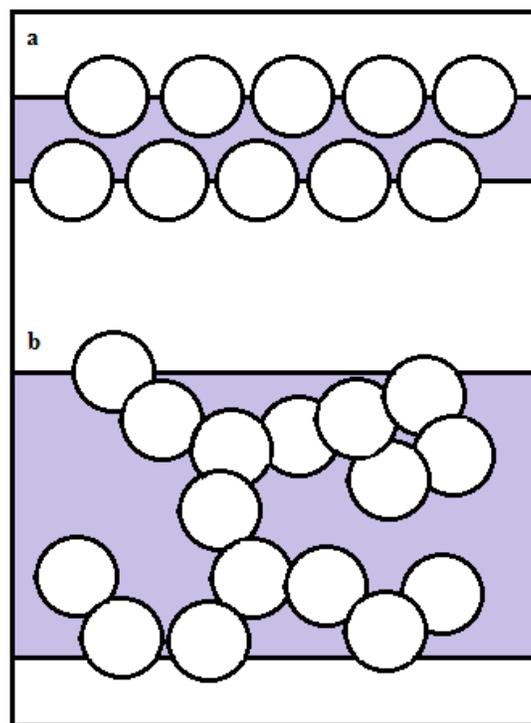


Figura. 2 Representación esquemática de los arreglos que presentan las partículas en la interfase en emulsiones Pickering [Dickinson, 2010].

Las interfases formadas pueden presentar propiedades reológicas y funcionales particulares para ser explotadas en la formulación sistemática de productos con características prescritas

[Pichot *et al.* (2009); Fouconnier *et al.* (2012); Golemanov *et al.* (2012)]. La reología de las capas interfaciales es un tema importante ya que el comportamiento del fluido está controlado por la presencia de las partículas sólidas induciendo cambios en la viscoelasticidad del sistema.

Una caracterización precisa de las propiedades reológicas de las interfases estabilizadas con sólidos puede proporcionar importantes nociones de los mecanismos físicos y químicos que se están llevando a cabo en la formación y evolución de las estructuras de la mono y multicapa. En principio, esta comprensión puede permitir tener control del mecanismo de estabilización a fin de definir sistemáticamente las propiedades del sistema interfacial [Kragel y Derkatch, 2010].

Por otro lado, la mayor parte de la literatura sobre emulsiones Pickering para consumo humano se ocupa de varios tipos de partículas orgánicas provenientes de diferentes recursos botánicos. Estabilizadores con estas propiedades han incluido proteínas [Dickinson, 2012], complejos de celulosa [Kalashnikova *et al.*, 2011], gránulos de almidón hidrofóticamente modificados [Murray *et al.*, 2011; Timgren *et al.*, 2011], nanopartículas sólidas lipídicas y cristales de grasa [Weiss *et al.*, 2011; Ghosh y Rousseau, 2011], nanopartículas de quitina [Tzoumaki *et al.*, 2011], entre otros.

Sumado a su procedencia orgánica, en años recientes, se ha producido una búsqueda para la obtención de partículas obtenidas de recursos naturales regionales con la esperanza de ayudar al sostenimiento ambiental y las economías locales. Algunos de los materiales que han sido considerados para estabilizar sistemas dispersos en aplicaciones alimentarias con esta característica son el puré de Fruta estrella (*Averrhoa carambola* L.) [Karim y Wai,

1999], gránulos de almidón de quínoa (*Chenopodium quinoa*) [Rayner *et al.*, 2012], celulosa microfibrilada de mangostino (*Garcinia mangostana* L.) [Winuprasith y Suphantharika, 2013].

2.3. JÍCAMA (*Pachyrhizus erosus* L. Urban)

La jícama es una leguminosa del género *Pachyrhizus*, las especies más consumidas son *P. erosus* y *P. tuberosa*, ambas originarias de América. La especie *Pachyrhizus erosus* L. Urban es nativa de México y se cultiva principalmente por su raíz. En México se cultiva en los estados de Nayarit, Morelos, Guerrero y Guanajuato. El estado de Nayarit es el productor más importante y aporta el 26.34% de la producción nacional con un valor de producción de 108 mdp [SAGARPA, 2012].

Existen variadas referencias en la literatura con relación a la composición química de la jícama, estas tienen diferencias según el material evaluado y las técnicas de análisis empleadas [Phillips-Mora *et al.*, 1993]. La composición química de la jícama se muestra en la Tabla 1, donde se observa que sus principales componentes son los carbohidratos (15%) y almidones (9%).

Al mismo tiempo, la jícama se considera una buena fuente de ácido ascórbico, tiamina, riboflavina, niacina y minerales. En general la jícama es clasificada como un alimento sano [Fernández *et al.*, 1997 y Noman *et al.*, 2007].

Composición	Porcentajes
Energía (kcal)	39 \pm 1.23
Humedad	82.01 \pm 2.24
Ceniza	0.5 \pm 0.12
Proteína	1.23 \pm 0.13
Carbohidratos	14.9 \pm 0.04
Lípidos	0.1 \pm 0.04
Almidón	9.04 \pm 0.11
Azúcar soluble total	2.13 \pm 0.11
Azúcares reductores	1.83 \pm 0.22
Fibra cruda	1.4 \pm 0.14
Cenizas	0.5

Tabla 1. Composición química aproximada de Jícama [Noman *et al.*, 2007].

Se han realizado diversos estudios en los cuales se ha utilizado la jícama en aplicaciones para consumo humano, por ejemplo, Hsu *et al.* (2003) determinaron la actividad antioxidante, la composición química y propiedades físicas de la jícama después de haber pasado por diferentes procesos para su conservación y aplicación medicinal. Mali *et al.* (2005) investigaron los almidones de jícama como un recurso para la producción de biopelículas comestibles. Amaya-Llano *et al.* (2008) llevaron a cabo la hidrólisis de almidones de jícama a condiciones suaves para emplearlos como un sustituto de grasa en el yogurt obteniendo resultados favorables. Ramirez-Santiago *et al.* (2010) observaron una mejora en la sinéresis, microestructura y propiedades reológicas del yogurt al adicionarle fibra dietética soluble de jícama. Vaillant *et al.* (1995) usaron almidones de jícama como

sustrato para enzimas amilolíticas para producir glucosa y posteriormente jarabes de fructosa. Los efectos de la sustitución de harina de trigo refinada por almidón de jícama en las propiedades reológicas de la masa y el pan fueron estudiadas por Nindjin *et al.* (2011). Qin y Yao (2010) estudiaron la licuefacción y sacarificación de almidones de jícama usando α -amilasa y glucoamilasa para obtener la mayor cantidad de azúcares reductores considerados para ser usados en la producción de vinos. La viscosidad del almidón de jícama es muy estable a altas temperaturas, de modo que puede ser usado como agente espesante y gelificante en alimentos [N'da Kouamé *et al.*, 2011].

En conjunto todos estos estudios prueban la viabilidad de los componentes de la jícama como aditivo para elaborar productos alimenticios mejorados.

3. HIPÓTESIS

Los componentes de los sólidos de Jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) como gránulos de almidón y fibra proporcionan estabilidad a emulsiones aceite en agua a través de mecanismos de estabilización Pickering.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto que tienen diferentes concentraciones de sólidos obtenidos de la Jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) en la estabilización de emulsiones aceite en agua.

4.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Formular emulsiones sencillas aceite en agua incorporando diferentes concentraciones de sólidos de jícama.

- Caracterizar la morfología y composición de los sólidos de jícama mediante microscopía electrónica de barrido.
- Caracterizar la morfología de las emulsiones mediante análisis de imágenes obtenidas por microscopía óptica.
- Determinar el Potencial Zeta de los sólidos de jícama y de las emulsiones.
- Determinar la distribución promedio de diámetro de gota de las emulsiones.
- Determinar las propiedades reológicas de las emulsiones mediante pruebas dinámicas y oscilatorias.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. MATERIALES

Los materiales que fueron utilizados son:

- Jícama (*Pachyrhizus Erosus* L. Urban) obtenidas de un mercado local (Iztapalapa, DF, México). La concentración de almidón se incrementa al madurar las raíces [Phillips-Mora, 1993], por lo que se adquirieron piezas grandes.
- Aceite de canola (AC), Alimentos Capullo S., de R.L. de C.V. (D.F., México).
- Alcohol etílico (grado industrial), J.T. Baker (Naucalpan, Estado de México, México).
- Agua desionizada.

5.2. MÉTODOS

5.2.1. Elaboración de sólidos de jícama

Las jícamas fueron lavadas con agua tibia y peladas con un pelador manual. Los tubérculos fueron molidos en un procesador de alimentos (Moulinex AR68, Bogota, Colombia). Posteriormente, los sólidos molidos fueron inmersos en una solución de etanol al 80% p/p

aplicando agitación constante durante 90 min, seguida por una inmersión en etanol puro y con agitación constante durante 90 min más. Los sólidos obtenidos fueron filtrados. Lotes de sólidos húmedos de 1.5 kg fueron secados en un secador de charolas (Armfield, UOP8, Inglaterra) a una temperatura de 48 ± 1 °C y un flujo de aire de 1.9 m/s hasta conseguir un peso constante (~3h). Las partículas secas fueron molidas en un molino de granos (Samap Ecosysteme SARL, F100, Francia) y los polvos resultantes fueron tamizados utilizando una malla #325 (<44 μm), los sólidos de jícama (SJ) que pasaron la malla fueron los utilizados en los experimentos.

5.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Los sólidos de jícama fueron montados en soportes de oro utilizando una cinta adhesiva de doble cara y fueron observados en el microscopio electrónico de barrido (Jeol 7600F, Japón) operado a 1kV bajo vacío (9.65×10^{-5} Pa). Se utilizaron diferentes aumentos con el fin de apreciar la morfología de los sólidos.

5.2.3. Preparación de emulsiones

Se prepararon fases acuosas con 3%, 5% y 7% p/p de sólidos de jícama y se dejaron reposar durante 12h para permitir la completa hidratación de los sólidos. Se prepararon emulsiones aceite en agua con una fracción de fase dispersa de 0.15 incorporando el aceite de canola gota a gota en la fase acuosa empleando un homogenizador de alto corte Silverson L4R

(Silverson Machines Ltd., Inglaterra) operado a 10 000 rpm durante 10 min a 25°C. Las emulsiones fueron codificadas como E₃, E₅, E₇.

5.2.4. Potencial Zeta

Se monitoreó el Potencial zeta del aceite de canola, de una dispersión de sólidos de jícama al 0.5% p/p y de las emulsiones E₃, E₅, E₇ inmediatamente después de su preparación utilizando el equipo Zetasizer Nano-ZS (Malvern Instruments Ltd, Inglaterra) y una celda tipo Dip (Zeta dip cell modelo DTS 1070). El equipo mide la dirección y velocidad de las partículas al aplicarle un campo eléctrico que le permite medir la movilidad electroforética de las partículas. El potencial zeta de una partícula se relaciona con la movilidad electroforética mediante la ecuación de Henry:

$$U_E = \frac{2 \varepsilon z}{3\eta} f(\kappa a)$$

Donde U_E se refiere a la movilidad electroforética, z es el Potencial z , ε es la constante dieléctrica del medio, η es la viscosidad del medio y $f(\kappa a)$ es la función de Henry.

La función de Henry es una medida de la relación del radio de la partícula y el espesor de la doble capa eléctrica. La aproximación de Smoluchowski es utilizada para partículas que no son consideradas puntuales y que se encuentran en un medio polar, para este caso, ya que las mediciones se realizan en un medio acuoso $f(\kappa a)$ toma el valor de 1.5, por lo que el cálculo del potencial zeta a partir de la movilidad electroforética es sencillo cuando el sistema se ajusta al modelo Smoluchowski [Malvern, 2013].

5.2.5. Microscopía óptica

Se utilizó un microscopio óptico modelo Olympus BX45 (Olympus Optical Co., Japón) con magnificación de 100x para examinar la morfología de las gotas de las emulsiones y la conformación de los sólidos que se encuentran en la fase continua. Para distinguir la fase dispersa de la fase continua, fue necesario agregar un colorante lipofílico en la fase dispersa (Rojo Nilo) y un colorante hidrofílico en la fase continua (Azul de metileno). Las imágenes fueron capturadas con la cámara digital Olympus E-620 (Olympus Optical Co., Japón).

5.2.6. Distribución de tamaño de partícula y gota

Se determinó la distribución de tamaño de partícula y gota de los sólidos en dispersión y de las emulsiones recién preparadas (1h) y después de 14 días de almacenamiento, mediante dispersión dinámica de luz con el equipo Mastersizer 2000 S (Malvern Instruments Ltd, R.U) utilizando la unidad Hydro 2000S, en la cual, la muestra se dispersa en un líquido, en este caso agua. El oscurecimiento que fue empleado estuvo en el intervalo de 10-20%.

5.2.7. Pruebas reológicas

Las propiedades reológicas de las emulsiones fueron determinadas utilizando el reómetro Paar Physica MCR 300 (Anton Para Messtechnik, Alemania), donde fue empleada una geometría tipo cono-plato (con ángulo de 2°, diámetro de 50 mm, gap de 0.05 mm). Las

muestras de emulsión fueron colocadas cuidadosamente en el sistema de medición y dejadas reposar durante 5 min para la recuperación de su estructura y llegar a la temperatura deseada. Todas las mediciones fueron llevadas a cabo a 25 °C. El comportamiento de flujo de las emulsiones se determinó aplicando un incremento en la tasa de corte de 0.01 a 1000 s⁻¹ y graficando la viscosidad aparente (η_{app}) en función de la tasa de corte ($\dot{\gamma}$).

Por otro lado, se llevaron a cabo curvas de amplitud de deformación con el fin de determinar la región viscoelástica lineal (RVL) a una frecuencia constante de 1Hz y en un intervalo de deformación de 0.1% a 10%.

Posteriormente se realizaron barridos de frecuencia de 0.01 a 10 Hz a una deformación de 0.5% (correspondiente a la RVL) obteniendo los módulos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') y derivado de los resultados se obtuvo el factor de pérdida $\tan(\delta) = G''/G'$ utilizando el software del equipo.

Las pruebas reológicas fueron realizadas en todas las emulsiones recién preparadas y después de 14 días de almacenadas.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Morfología de los sólidos de jícama

Como se mencionó, la jícama posee un alto contenido de almidón y se espera que después del proceso de secado los polvos de jícama mantengan un cantidad considerable de gránulos, esto se pudo comprobar a través de las imágenes de SEM, donde se observaron los gránulos de almidón de jícama (Figuras 3a y 3b), estos mostraron formas poligonales con diámetros transversales y longitudinales en el intervalo de 2.1 a 8.2 μm y de 2.5 a 9.6 μm , respectivamente. Estos resultados coinciden con los de Stevenson *et al.* (2007) quien reportó que los gránulos de almidón de jícama cultivada en Texas y México presentaron una morfología esférica y poligonal con diámetros de 1 a 13 μm .

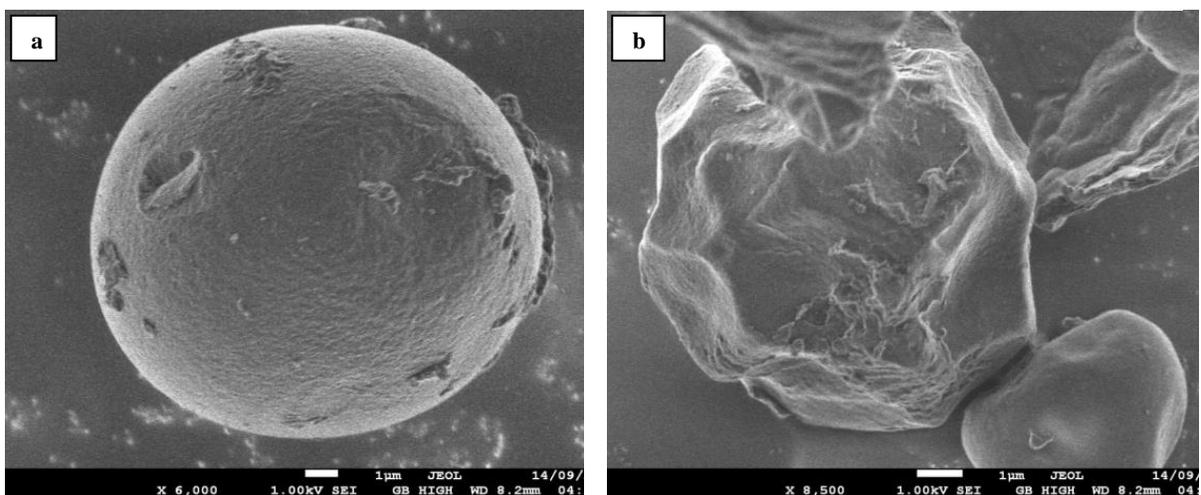


Figura 3. Imágenes SEM de los gránulos de almidón contenidos en los sólidos de jícama.

Ya que no se descartó ningún elemento de la jícama salvo la cáscara y en consecuencia que la composición química de la jícama es compleja, la morfología de los sólidos (Figuras 4a y 4b) mostraron, además de gránulos de almidón, una serie de residuos provenientes de la segmentación del tejido de la jícama al someterla a un proceso de secado-molienda, que pueden corresponder a fragmentos de cualquier componente de la jícama.

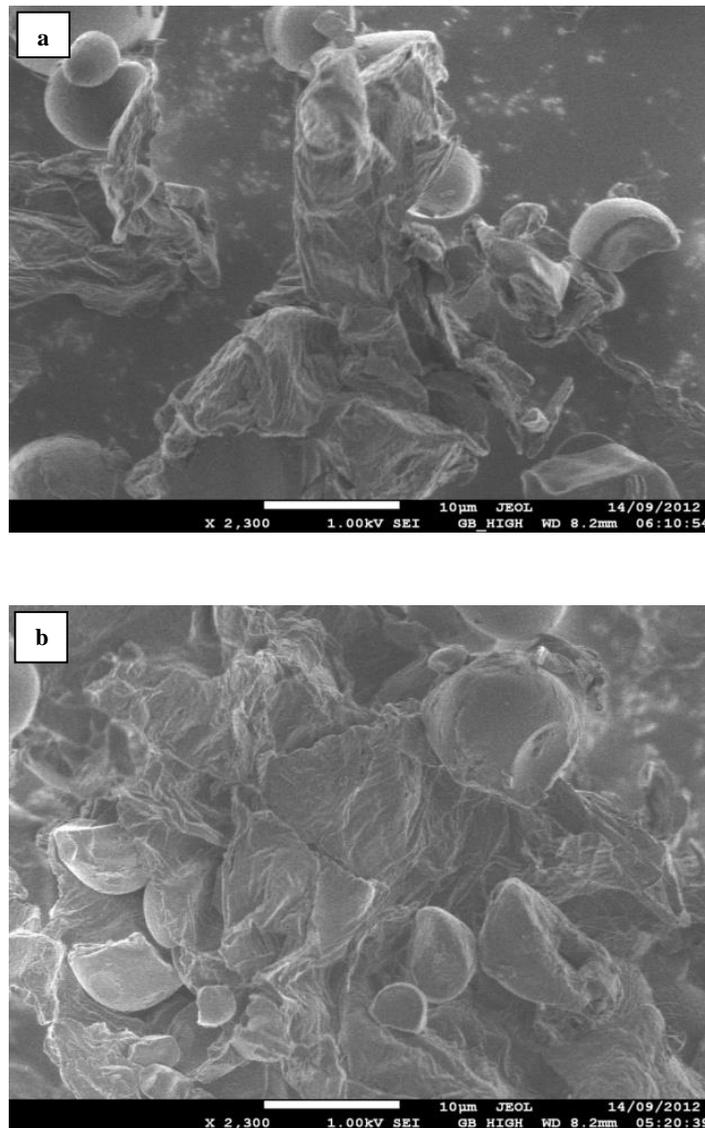


Figura 4. Imágenes SEM de los sólidos de jícama

6.2. Potencial Zeta

Dada la diversidad de componentes de los sólidos de jícama, es de esperarse que alguno de estos posea grupos funcionales ionizables que induzcan cargas electrostáticas. La Figura 5 muestra que una dispersión de sólidos de jícama (1% p/p) en agua presenta una carga efectiva negativa de -27.9 mV, mientras que el aceite de canola fue prácticamente neutro (0.1 mV). El valor del potencial zeta que presentó la dispersión de sólidos de Jícama se encuentra en el rango reportado para dispersiones de almidón de diferente origen botánico [Chanamai y McClements, 2002].

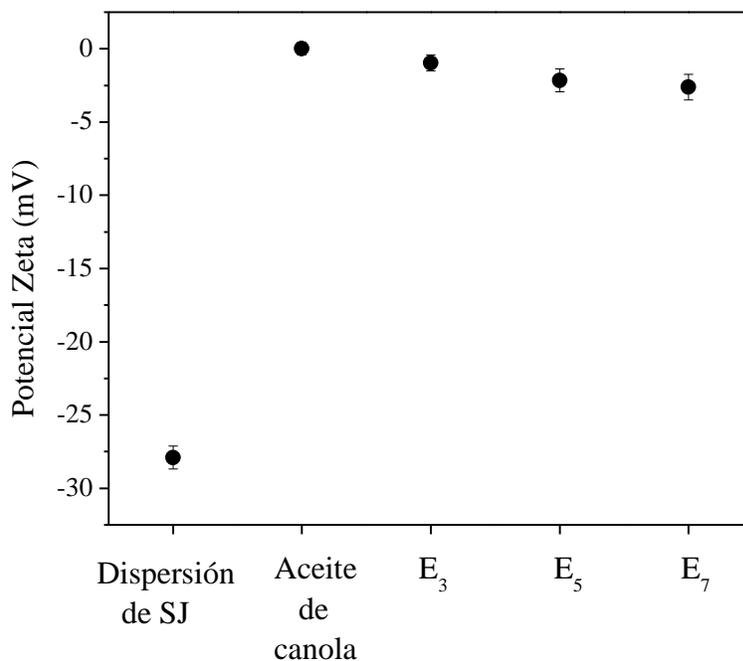


Figura 5. Potencial zeta en función de la concentración de sólidos de jícama.

Este resultado es de gran importancia ya que las interacciones partícula-partícula mediante efectos estéricos y/o electrostáticos, pueden tener efecto en la estabilidad de las emulsiones, propiedades reológicas y sobre la fijación de las partículas en la interfase [Hunter *et al.*, 2008].

El potencial zeta de las emulsiones E₃, E₅ y E₇ son reportadas también en la Figura 4. Por el contrario que la dispersión al 1%, las emulsiones presentan valores considerablemente menores, es decir, el potencial zeta de las emulsiones fue ligeramente negativo (alrededor de -1.0 mV) hasta un valor asintótico próximo a -2.2 mV conforme aumentó la concentración de sólidos de 3% a 7% p/p.

Esto sugiere que a medida que fue incrementada la concentración de sólidos de jícama, la ionización de grupos funcionales fue obstaculizada por el efecto de aglomeración de las partículas y por la falta de interacción de los grupos ionizables. Ya que los valores de potencial zeta proporcionan una noción de si las partículas en suspensión tienen a repelerse o a permanecer juntas, por ejemplo, cuando las partículas tienen valores de potencial zeta altos (negativo o positivo) tienden a repelerse y por lo tanto a permanecer separadas unas de otras y por el contrario, si los valores de potencial zeta son bajos (entre -30mV y +30mV) entonces no habrá una fuerza que prevenga que las partículas tiendan a juntarse y flocularse. Entonces, los valores de las emulsiones encontrados (-1.0 mV a -2.2 mV) nos permiten saber que los sólidos que se encuentran en la fase acuosa tienden a formar flóculos cuando se encuentran en concentraciones altas.

Como se mencionó en la introducción, existen dos tipos de estabilización que pueden presentarse cuando se trabaja con emulsiones Pickering, en la primera, las partículas son adsorbidas en la interfase formando monocapas o multicapas alrededor de las gotas, impidiendo la coalescencia. En la segunda la estabilización comprende la formación de redes tridimensionales de partículas en la fase continua que envuelve a las gotas de aceite y las inmovilizan [Binks, 2002; Aveyard *et al.*, 2003; Hunter *et al.*, 2008]. Los resultados que se encontraron de potencial zeta y de la formación de los sólidos en la fase acuosa, nos da una idea, aunque no es un resultado concluyente, de que el tipo de mecanismo de estabilización podría ser el mecanismo de inmovilización por redes.

6.3. Morfología de las emulsiones

Las imágenes de microscopía óptica de E₃, E₅ y E₇ se muestran en la Figura 6. La revisión de las micrografías revela que en la fase continua de las emulsiones se encuentran dispersos diferentes componentes incluyendo gotas de aceite de diferentes tamaños y formas (tienen un ligero tono rojo), gránulos de almidón enteros y fragmentados y hebras largas que podrían ser de hemicelulosa, celulosa o pectinas (Figuras 6b y 6c). En términos generales, el tamaño promedio de las gotas fue menor que el de los sólidos de jícama dispersos.

Conforme la concentración de sólidos de jícama se incrementó en las emulsiones, tomaron lugar dos fenómenos:

- (i) Se incrementan la irregularidad de la forma de las gotas de aceite. Estas deformaciones es típico en las emulsiones Pickering y es comúnmente atribuida a que las partículas no se encuentran adsorbidas uniformemente en la superficie de las gotas [Vignati *et al.*, 2003].
- (ii) El tamaño de los componentes dispersos en la fase continua tiende a disminuir y a ser más uniforme (Figura 6c). La reducción en el tamaño de los sólidos pudo haber ocurrido por la fricción entre sus componentes durante el proceso de homogeneización, esto a su vez incrementó la estabilidad de las emulsiones ya que indujo una mayor adsorción de sólidos de menor tamaño en la superficie de las gotas de aceite.

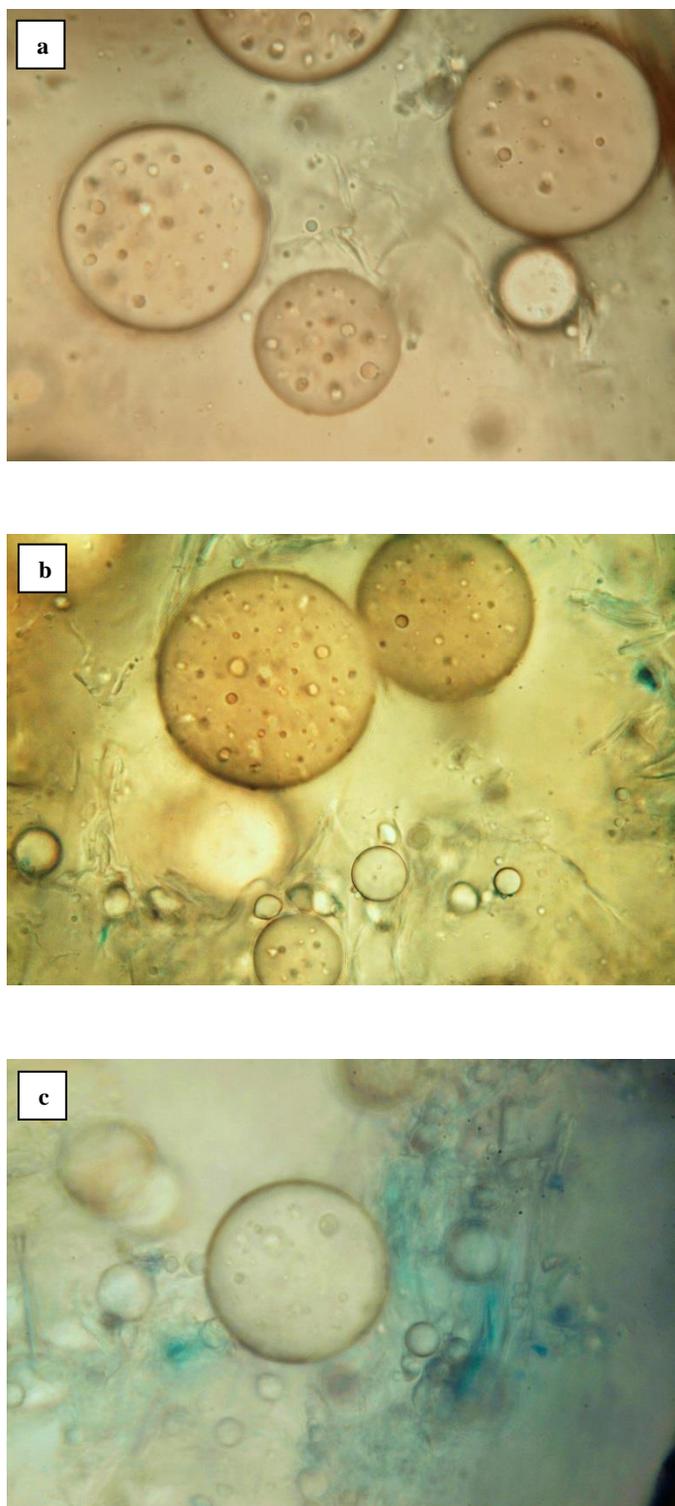


Figura 6. Imágenes de microscopía de luz de las emulsiones aceite en agua. Donde (a) corresponde E_3 , (b) E_5 y (c) E_7 , tomadas a 1h de su preparación.

La observación de las micrografías sugiere que la estabilización de las emulsiones incluye tanto la adsorción de partículas en la interfase proporcionando una barrera mecánica y estérica contra la coalescencia, así como por redes tridimensionales que se forman en la fase continua y que involucran a los diferentes componentes de los sólidos de jícama (en la Figura 6c se pueden distinguir claramente en tonos azules). Estas redes o sólidos entrecruzados obstaculizan la movilidad de las gotas de aceite, lo que impide que lleguen a tener contacto entre ellas y coalezcan.

Además del entrecruzamiento de partículas, ocurre otro fenómeno importante en la fase acuosa. Los almidones presentes en la fase continua experimentan un proceso de gelatinización parcial durante el proceso de formación de las emulsiones.

De la suma de la formación de redes y la gelatinización parcial de los almidones resulta una fase continua con una estructura de tipo gel, en este sentido, el sistema disperso puede ser considerado como gel emulsificado o gel relleno, ya que la fase continua de la emulsión es un semisólido [Dickinson, 2012; Lorenzo *et al.*, 2013].

Por otra parte, en la Figura 7, se muestran micrografías de las emulsiones después de 14 días de almacenamiento, se puede observar que la morfología de las gotas no tuvo un cambio significativo en ninguna de las emulsiones, esto es un indicativo de que las emulsiones son estables.

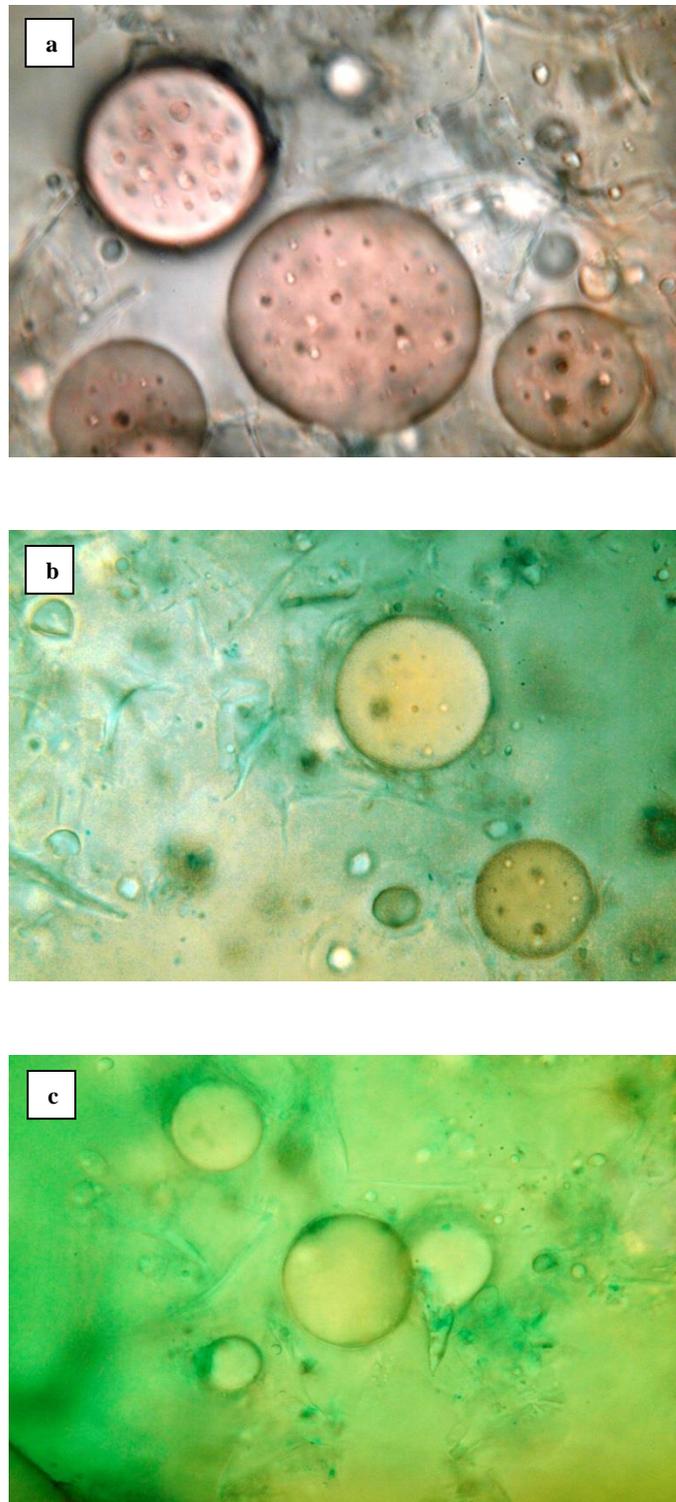


Figura 7. Imágenes de microscopía de luz de las emulsiones aceite en agua. Donde (a) corresponde E_3 , (b) E_5 y (c) E_7 , tomadas a 14 días de su preparación.

6.4. Distribución de tamaño de partícula y gota

En las secciones anteriores se mostró que la fase continua está compuesta por un arreglo complejo de los diferentes compuestos presentes en los sólidos de jícama que forman una red tridimensional. Este tipo de estructuras pueden enmascarar la determinación automática (a través del equipo Mastersizer 2000 analizador de tamaño de partícula) de la distribución de tamaño de gota real, por lo cual se realizó un paso preliminar a la determinación de la distribución de tamaño de gota, que fue medir las distribuciones de tamaño de partícula de las dispersiones al 3%, 5% y 7% p/p de sólidos.

Los resultados se exponen en la Figura 8a, donde las distribuciones de tamaño de partícula muestran un pico con un máximo alrededor de 115 μm y un hombro a la izquierda para tamaños menores a 30 μm . Aparentemente el hombro a la izquierda corresponde a sólidos de jícama aislados, por ejemplo los almidones no hidratados, este resultado concuerda con lo obtenido en las imágenes de microscopía electrónica de barrido en donde se observaron gránulos de almidón de longitud de 2.1 μm a 9,3 μm . Cabe mencionar que el tamaño máximo de los sólidos de jícama fue de aproximadamente 30 μm . Por otra parte, el pico corresponde a los agregados de partículas y a células de desecho de algún componente de la jícama.

Por otro lado, se obtuvieron las distribuciones de tamaño de gota de las emulsiones frescas (Figura 8b). En la que aparece nuevamente el pico que se encuentra aproximadamente en 115 μm y el hombro a la izquierda del pico (tamaños $<30\mu\text{m}$), lo que sugiere que pertenecen principalmente a los sólidos de jícama. En las distribuciones también puede observarse que el tamaño del pico máximo tiende a disminuir cuanto más alta fue la concentración de

sólidos en la emulsión, esto apoya la idea que a concentraciones más altas, las partículas tienden a formar partículas de menor tamaño debido al desgaste entre los componentes de los sólidos de jícama durante el proceso de homogeneización. Este resultado coincide con lo observado en las micrograffías (Figura 6), en donde se observaron sólidos de menor tamaño en la E₇ (Figura 6c).

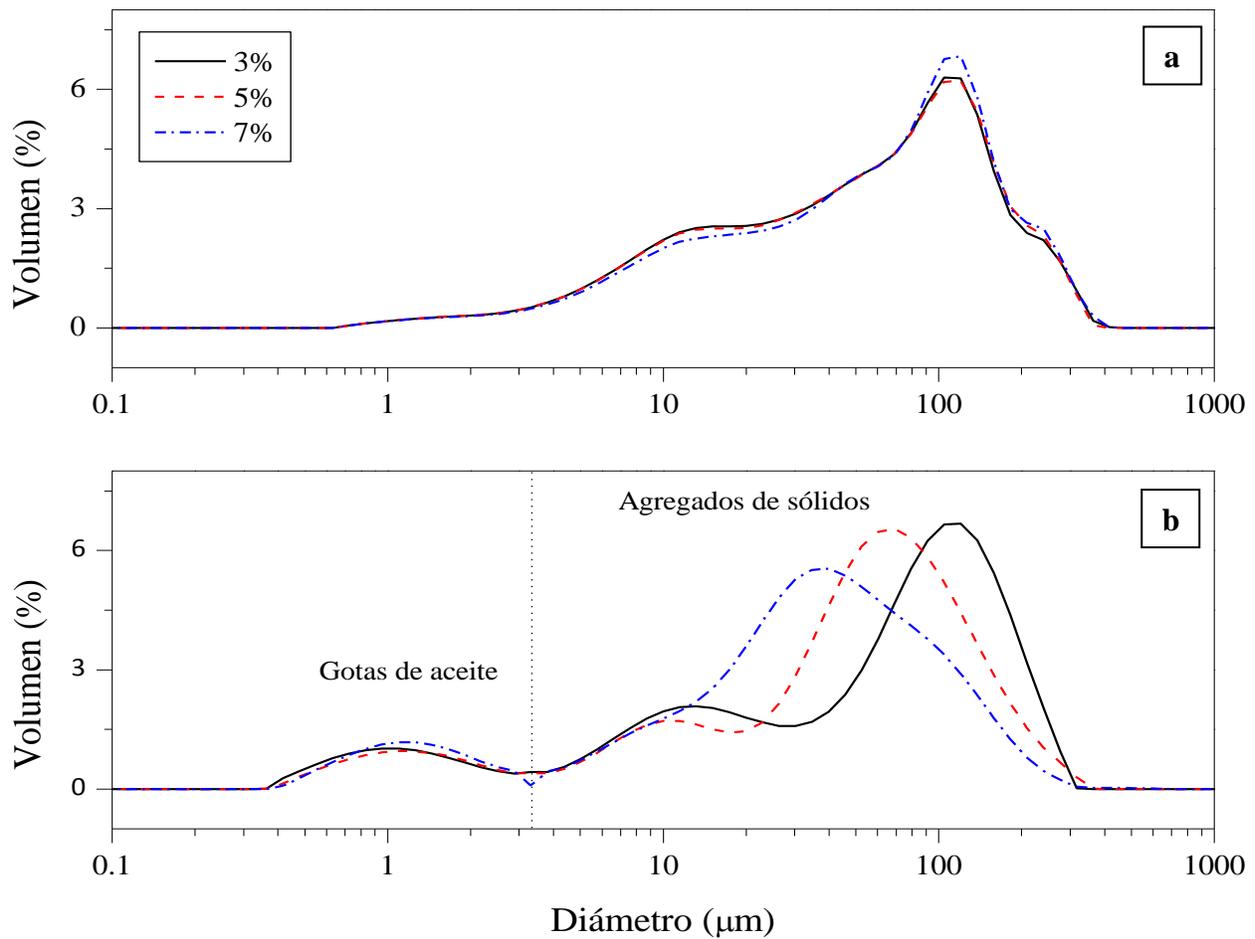


Figura 8. Distribución de tamaño de partícula de las emulsiones y dispersiones de sólidos de jícama.

En la Figura 8b, también se presenta un pequeño pico localizado alrededor de $1 \mu\text{m}$ que no se observó en la distribución de tamaño de partícula de las dispersiones (Figura 8a) por ello se deduce que pertenece a las gotas de aceite incrustadas en la fase continua. Posteriormente, al realizar una deconvolución Gaussiana de la distribución de tamaño de gota se obtuvo que el área del pico que se localiza en $1 \mu\text{m}$ es de alrededor del 12-19% que coincide con la fracción de volumen de fase dispersa. Al considerar sólo este pico para la determinación de la distribución de tamaño de gota se obtuvo el tamaño medio de gota, en la Figura 9 se presenta el tamaño medio de las gotas como función de la concentración de sólidos de jícama en la emulsión, después de 1 hora y 14 días de almacenamiento. Se puede observar que a mayor valor de concentración de sólidos de jícama se producen gotas más pequeñas y más estables, ya que el tamaño de gota inicial se mantiene razonablemente constante durante el tiempo de almacenamiento.

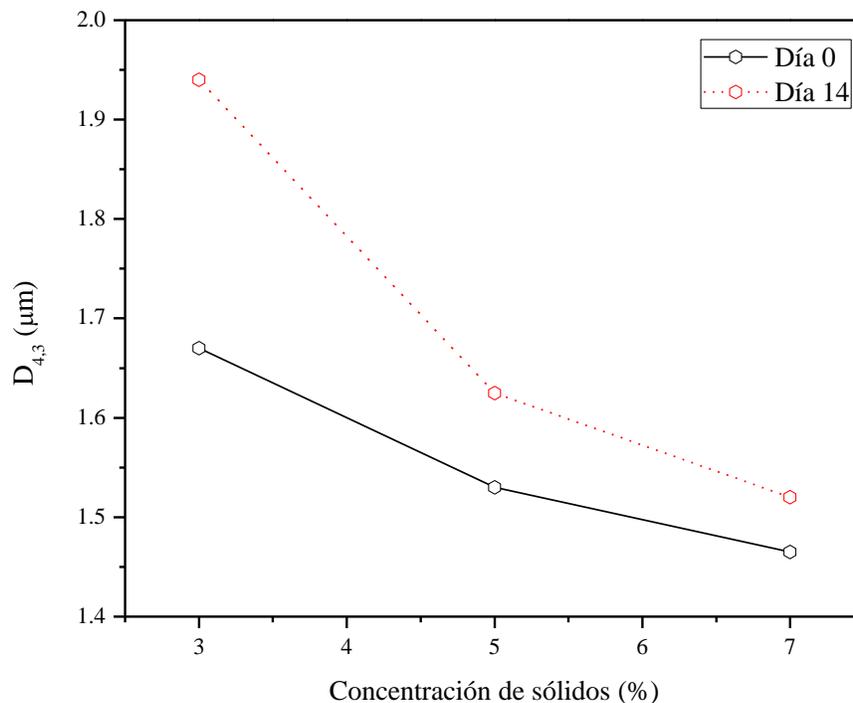


Figura 9. Tamaño medio de gota de las emulsiones después de 1h y 14 días.

Por otro lado, se dejaron en reposo las emulsiones E_3 , E_5 y E_7 para evaluar los mecanismos de desestabilidad. En la Figura 10 se puede observar que la emulsión E_3 presenta una fase de cremado en la parte superior del recipiente y sólidos sedimentados en la parte inferior, en general esta emulsión fue la más inestable. Del mismo modo, la emulsión E_7 tuvo un proceso de sedimentación. Por el contrario la emulsión E_5 a pesar de que no tuvo el menor tamaño de partícula, no presentó procesos de desestabilización por gravedad.



Figura 10. Mecanismos de desestabilización en las emulsiones después de 14 días de almacenamiento E_3 (izquierda), E_5 (centro) y E_7 (derecha).

6.5. Reología de las emulsiones

La viscosidad aparente de las emulsiones frescas y almacenadas por 14 días se presenta en la Figura 11. Todas las emulsiones presentaron un comportamiento estructural viscoelástico, caracterizado por presentar un plateau superior de viscosidad newtoniana a tasas bajas de corte (η_0), una zona reo-adelgazante a tasas de corte intermedias y otro plateau de viscosidad newtoniana a altas tasas de corte (η_∞). Todas las emulsiones mostraron este comportamiento estructural independientemente de la concentración de sólidos y del tiempo de envejecimiento.

En las curvas de flujo (Figura 11), las emulsiones frescas mostraron mayores valores de viscosidad aparente que las emulsiones con 14 días de almacenamiento, estos valores se fueron reduciendo conforme disminuye la concentración de sólidos en la emulsión. Asimismo se observó un gran decaimiento en los valores de η_{ap} cuando las emulsiones fueron envejeciendo.

Al tener en cuenta que la viscosidad refleja los mecanismos de fricción que se producen entre los componentes dispersos fluyendo uno con otro, la disminución de η_{ap} sugiere una reestructuración de las partículas (que fue mayor cuanto mayor fue la distribución de tamaño de partícula) que conduce a la formación de flóculos de tamaño más uniformes, causando una menor disipación de energía.

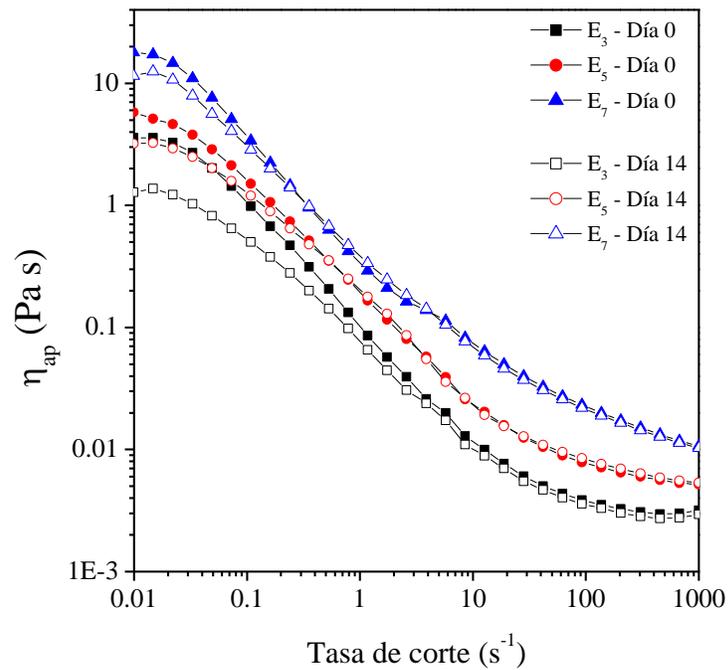


Figura 11. Curvas de flujo de las emulsiones frescas y después de 14 días de almacenadas

La región viscoelástica lineal se determinó a través de las curvas de deformación. La Figura 12 muestra la dependencia del módulo de almacenamiento G' en función del porcentaje de deformación al cual se sometieron las muestras. Para todas las emulsiones la RVL se ubicó a valores menores a 0.7%, después de este punto G' es dependiente de la deformación aplicada al material. Por lo tanto, para asegurar permanecer en la RVL, todos los barridos de frecuencia se realizaron a una deformación de 0.5%.

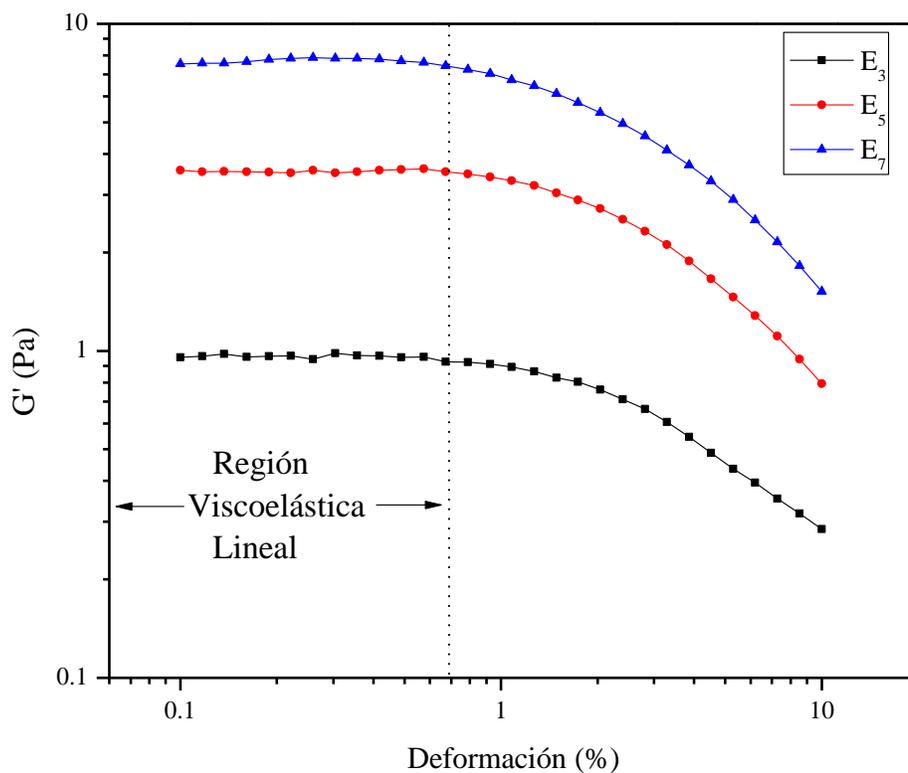


Figura 12. Barrido de deformación y ubicación de la región viscoelástica lineal (RVL) de las emulsiones.

Los barridos de frecuencia se llevaron a cabo para determinar la dependencia de los módulos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') con respecto a la frecuencia. En todas las emulsiones tanto G' como G'' se incrementaron al incrementar la frecuencia y presentaron un comportamiento predominantemente elástico. Además las curvas se caracterizaron por presentar valores de G' casi un orden de magnitud mayores que G'' dentro de todo el intervalo de frecuencias estudiado y en las diferentes concentraciones de sólidos utilizadas.

Los valores del módulo de almacenamiento y pérdida (Figura 13) se incrementaron cuando mayor fue la concentración de sólidos. Este incremento se explica porque al aumentar la concentración de sólidos hay un mayor empaquetamiento de estos, dando lugar a una red más fuerte, lo que provoca que las emulsiones tiendan a fluir con más dificultad.

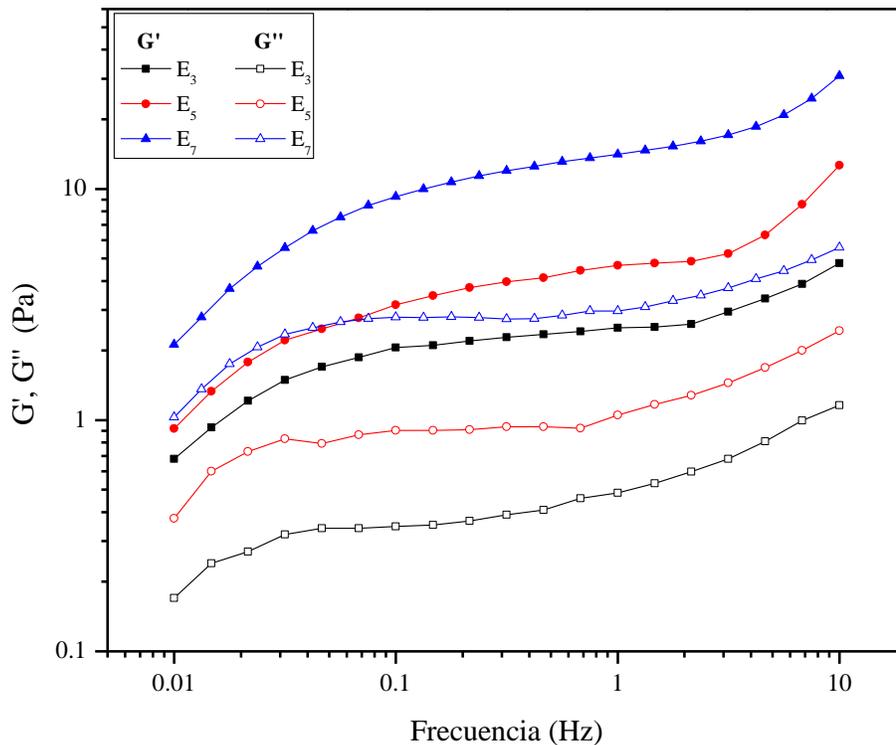


Figura 13. Dependencia de los Módulos de almacenamiento y pérdida con respecto a la frecuencia de las emulsiones a 1 hora de su preparación.

Este comportamiento es similar al observado en emulsiones que fueron estabilizadas por sólidos, donde una red tridimensional tipo gel proporciona estabilidad a las gotas de aceite

dispersas [Dickinson, 2010; Romero *et al.*, 2008]. En este sentido, los resultados sugieren que mientras que el impedimento estérico por la adsorción de sólidos de jícama puede contribuir a la estabilidad y al comportamiento reológico, es la red tridimensional altamente estructurada constituida por los sólidos en la fase continua la que controla la reología y la estabilidad de las emulsiones [Tesch, *et al.*, 2002].

Después de 14 días, la reología de las emulsiones fue dominada aún por un comportamiento predominantemente sólido, es decir $\tan(\delta) < 1$ en todo el tiempo de almacenamiento (Figura 14), aunque este dominio disminuyó, posiblemente al reacomodo de los sólidos en la fase continua.

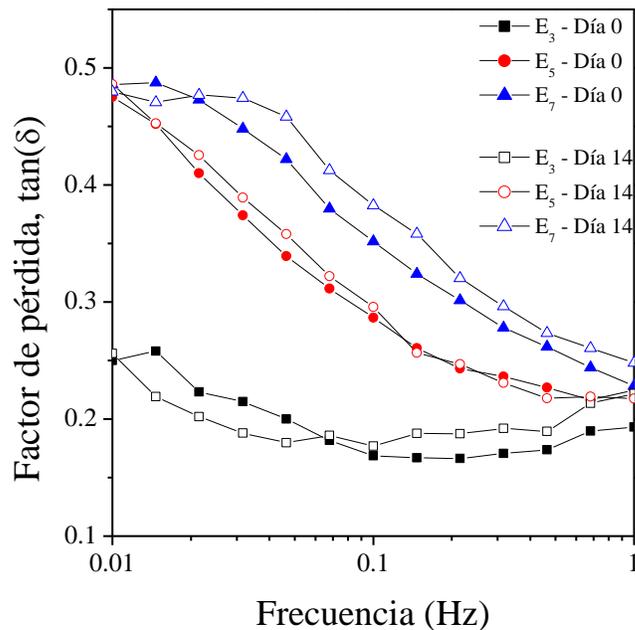


Figura 14. Factor de pérdida $\tan(\delta) = G''/G'$ de las emulsiones frescas y después de 14 días de almacenamiento.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se exploró la capacidad de los sólidos de Jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) como estabilizante de emulsiones aceite en agua.

Se obtuvieron sólidos de jícama con tamaño $<44 \mu\text{m}$, mediante un proceso de secado-molienda. En las imágenes SEM se pudo comprobar que los sólidos de jícama conservaron una cantidad alta de almidones después del proceso de secado, ya que se observaron gránulos de almidón y fragmentos de estos con diámetros longitudinales de 2.1 a 9.6 μm y de morfologías esféricas y poligonales. Igualmente se observaron una serie de residuos que pueden pertenecer a otros componentes de la jícama.

El análisis del potencial zeta indicó que una dispersión de sólidos al 1% p/p presentó una carga negativa de -27.9 mV, mientras que el aceite de canola es prácticamente neutro (0.1 mV). También fue medido el potencial zeta de las emulsiones que resultaron cargadas ligeramente negativas (-1.0 mV a -2.2 mV). Con estos resultados se puede concluir que el grado de interacciones electrostáticas entre los sólidos en las emulsiones dependió de la concentración de estos, ya que a medida que fue aumentando, la ionización se fue obstaculizando por la aglomeración de las partículas en la vecindad de los grupos ionizables provocando que las partículas tiendan a flocularse.

En las imágenes obtenidas de microscopía óptica, se observan partículas que permanecen en la interfase de las gotas que contribuye a la estabilidad de la emulsión, sin embargo las partículas no forman una monocapa o multicapa, por lo que no protegen completamente a las gotas. En las imágenes también se puede observar que los sólidos de jícama se encuentran mayormente en la fase dispersa, puesto que se observan una serie de componentes de la jícama, como gránulos de almidón enteros además de una serie de hebras largas que podrían ser de hemicelulosa o celulosa, que forman estructuras de agregados empacados densamente y que entranpan a las gotas de la emulsión impidiendo así su movilidad.

De las pruebas de distribución de tamaño de partícula de las fases acuosas se obtuvo el tamaño promedio de los agregados que se forman en la fase continua (alrededor de 115 μm) y también se observó que en la fase acuosa se encuentran presentes sólidos aislados con tamaños menores a 30 μm , estos sólidos pueden ser gránulos de almidón, ya que en las imágenes SEM de los sólidos se observó que los gránulos de almidón tienen diámetros de 2.1 μm a 9,3 μm . Por otro lado también se llevaron a cabo pruebas de distribución de tamaño de gota de las emulsiones en donde aparecen nuevamente los picos correspondientes a los sólidos de jícama, que se identificaron con las pruebas de distribución de tamaño de partícula de las fases acuosas. Se registra una menor polidispersión de los sólidos y agregados de sólidos cuanto mayor fue la concentración de estos en la emulsión, que se debió al desgaste de los sólidos durante el proceso de homogeneización. Además de los hombros generados por los sólidos, también pudo apreciarse un pequeño pico ubicado alrededor de 1 μm que corresponde a las gotas de aceite, al considerar solamente este pico para obtener el tamaño medio de gota dio como

resultado que al incorporar mayor cantidad de sólidos en las emulsiones, el tamaño de gota tiende a ser menor y tiene menor crecimiento a lo largo del tiempo de almacenamiento, por lo que se considera más estable la emulsión con formulación E₇.

Con respecto a las pruebas reológicas, las propiedades de flujo y viscoelásticas de las emulsiones aumentaron cuanto mayor fue la concentración de los sólidos y tuvieron una disminución conforme fueron envejeciendo, siendo E₇ la que sufrió menos cambios de estructura. La región viscoelástica lineal se encontró a valores menores a 0.5% de deformación para todas las emulsiones. En los barridos de frecuencia se observó que las emulsiones presentaron un comportamiento predominantemente sólido ya que en todo el rango de frecuencias y a cualquier tiempo de almacenamiento el factor de pérdida fue menor a 1 ($\tan(\delta) < 1$), es decir la red tridimensional formada por los sólidos en la fase continua es la que controla las propiedades reológicas. Sumado a esto, los módulos de almacenamiento fueron mayores al aumentar la concentración de sólidos en la fase acuosa, esto se debió a que al tener más sólidos, estos tienden a empacarse y se forma una red más fuerte, lo que impide que las emulsiones fluyan con facilidad.

Este trabajo de tesis demostró que es factible la estabilización de emulsiones Pickering aceite en agua con comportamiento tipo gel, lo que ha dado lugar a la preparación de un nuevo emulsionante de grado alimenticio que puede ser utilizado para estructurar alimentos funcionales complejos.

8. REFERENCIAS

Amaya-Llano, S., Martínez-Alegría, A., Zazueta-Morales, J., Martínez-Bustos, F. **Acid thinned jicama and maize starches as fat substitute in stirred yogurt.** LWT-Food Science and Technology, 41, 1274-1281 (2008).

Aveyard, R., Binks, B., Clint, J. **Emulsions stabilized solely by colloidal particles,** Advances in Colloid and Interface Science, 100-102, 503-546 (2003).

Binks, B. **Particles as surfactants – similarities and differences.** Current Opinion in Colloid & Interface Science, 7, 21-41 (2002).

Binks, B., Whitby, C. **Nanoparticle silica-stabilised oil-in-water emulsions: improving emulsion stability.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 253, 105-115 (2005).

Bhandari, M. R., Kasai, T., Kawabata, J. **Nutritional evaluation of wild yam (*Dioscorea spp.*) tubers of Nepal.** Food Chemistry, 82(4), 619-623 (2003).

Chanamai, R., McClements, D. **Comparison of gum Arabic, modified starch, and whey protein isolate as emulsifiers: influence of pH, CaCl₂ and temperature.** Journal of food science, 67(1), 120-125 (2002).

Chevalier, Y. y Bolzinger, M.A. **Emulsions stabilized with solid nanoparticles: Pickering emulsions.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects (2013).

Colin, V., Pereira, C., Villegas, L., Amoroso, M., Abate, C. **Production and partial characterization of bioemulsifier from a chromium-resistant actinobacteria.** Chemosphere, 90(4), 1372-1378 (2013).

Dias, A., Müller, C., Larotonda, F., Laurindo, J. **Biodegradable films based on rice starch and rice flour.** Journal of Cereal Science, 51, 213 (2010).

Dickinson, E. **Food emulsions and foams: Stabilization by particles.** Current Opinion in Colloid & Interface Science, 15(1), 40-49 (2010).

Dickinson, E. **Use of nanoparticles and microparticles in the formation and stabilization of food emulsions.** Trends in Food Science & Technology, 24(1), 4-12 (2012).

Dickinson, E. **Emulsion gels: The structuring of soft solids with protein-stabilized oil droplets.** Food Hydrocolloids, 28, 224 (2012).

Fernandez, M., Warid, W., Loaiza, J., Montiel, A. **Developmental patterns of jicama (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) plant and the chemical constituents of roots grown in Sonora, Mexico.** Plant Foods for Human Nutrition, 50, 279-286 (1997).

-
- Fouconnier, B., Roman-Guerrero, A., Vernon-Carter, E. **Effect of [CTAB]-[SiO₂] ratio on the formation and stability of hexadecane/water emulsions in the presence of NaCl.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 400, 10-17 (2012).
- Ghosh, S., Rousseau, D. **Fat crystals and water-in-oil emulsion stability.** Current Opinion in Colloid & Interface Science, 16(5), 421-431 (2011).
- Golemanov, K., Tcholakova, S., Denkov, N., Pelan, E., Stoyanov, S. **Surface shear rheology of saponin adsorption layers.** Langmuir, 28, 12071-12084 (2012).
- Hunter, T., Pugh, R., Franks, G., Jameson, G. **The role of particles in stabilising foams and emulsions.** Advances in Colloid and Interface Science, 137, 57–81 (2008).
- Hsu, C., Chen, W., Weng, W., Tseng, C. **Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods.** Food Chemistry, 83, 85-92 (2003).
- Kalashnikova, I., Bizot, H., Cathala, B., & Capron, I. **New Pickering emulsions stabilized by bacterial cellulose nanocrystals.** Langmuir, 27(12), 7471-7479 (2011).
- Karim, A., Wai, C. **Characteristics of foam prepared from starfruit (Averrhoa carambola L.) puree by using methyl cellulose.** Food Hydrocolloids, 13, 203-210 (1999).
- Kragel, J., Derkatch, S. **Interfacial shear rheology.** Current Opinion in Colloid & Interface Science, 15, 246-255 (2010).

Lorenzo, G., Zaritzky, N., Califano, A. **Rheological analysis of emulsion-filled gels based on high acyl gellan gum.** Food Hydrocolloids, 30, 672-680 (2013).

Mali, S., Grossmann, M., García, M., Martino, M., Zaritzky, N. **Mechanical and thermal properties of yam starch films.** Food Hydrocolloids, 19,157–164 (2005).

Malvern. **Technical note. Zeta potential – An introduction in 30 minutes.** 2013.

McClements, D.J. **Food Emulsions. Principles, Practices, and Techniques.** 2^a ed. Boca Raton: CRC Press (2005).

Morrison Ian D.; Ross S. **Colloidal Dispersions.** Wiley, 1a ed., Nueva York (2002).

Murray, B., Durga, K., Yusoff, A., Stoyanov, S. **Stabilization of foams and emulsions by mixtures of surface active food-grade particles and proteins.** Food Hydrocolloids, 25(4), 627-638 (2011).

N'da Kouamé, V., Handschin, S., Derungs, M., Amani, G., Conde-Petit, B. **Thermal properties of new varieties of yam starches.** Starch/Stärke, 63 (12), 747 (2011).

Nindjin C., Amani G.N., Sindic M. **Effect of blend levels on composite wheat doughs performance made from yam and cassava native starches and bread quality.** Carbohydrate Polymers 86: pp 1637-1645 (2011).

Noman, A., Hoque, A., Haque, M., Pervin, F., Karim, M. **Nutritional and anti-nutritional components in *Pachyrhizus erosus* L. tuber.** Food Chemistry 102, 1112–1118 (2007).

Pelissari, F., Andrade-Mahecha, M., Amaral, P., Menegalli, F. **Comparative study on the properties of flour and starch films of plantain bananas (*Musa paradisiaca*)**. Food Hydrocolloids, 30, 681-690 (2013).

Phillips-Mora, W., Morera, J., Sorensen, M. **Las jícamas silvestres y cultivadas (*Pachyrhizus spp.*)**. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza (CATIE), (1993).

Pichot, R., Spyropoulos, F., Norton, I. **Mixed-emulsifier stabilized emulsions: investigation of the effect of monoolein and hydrophilic silica particle mixtures on the stability against coalescence**. Journal Colloid Interface Sci., 329, 284-291 (2009).

Puncha-arnon, S., Uttapap, D. **Rice starch vs. rice flour: Differences in their properties when modified by heat–moisture treatment**. Carbohydrate Polymers, 91, 85 (2013).

Qin, J., Yao, M. **Study on technique of liquefaction and saccharification of *Pachyrhizus***. Journal of Jishou University, 31, 117-121 (2010).

Ramirez-Santiago, C., Ramos-Solis, L., Lobato-Calleros, C., Peña-Valdiva, C., Vernon-Carter, E., Alvarez-Ramirez, J. **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, 229–235 (2010).

Ramos-de-la-Peña, A., Renard, C., Wicker, L., Contreras-Esquivel, J. **Advances and perspectives of *Pachyrhizus spp.* In food science and biotechnology**. Trends in Food Science & Technology, 29, 44-54 (2013).

Rayner, M., Timgren, A., Sjöo, M., Dejmek, P. **Quinoa starch granules: a candidate for stabilising food-grade Pickering emulsions.** Journal of the Science of Food and Agriculture, 92(9), 1841-1847 (2012).

Romero, A., Cordobés, F., Puppo, M., Guerrero, A., Bengoechea, C. **Rheology and droplet size distribution of emulsions stabilized by crayfish flour.** Food Hydrocolloids, 22, 1033–1043 (2008).

Rousseau, D. **Trends in structuring edible emulsions with Pickering fat crystals.** Current Opinion in Colloid & Interface Science, 18(4), 283-291 (2013).

Stevenson, G., Jane, J., Inglett, G. **Characterisation of Jícama (Mexican Potato) (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) Starch From Taproots Grown in USA and Mexico.** Starch/Starke. 59, 132 (2007).

SAGARPA. **Información técnica de Jícama mexicana para exportación a la República Argentina** (2012).

Tesch, S., Gerhards, C., Schubert, H. **Stabilization of emulsions by OSA starches.** Journal of food engineering, 54(2), 167-174 (2002)..

Timgren, A., Rayner, M., Sjöo, M., Dejmek, P. **Starch particles for food based Pickering emulsions.** Procedia Food Science, 1, 95-103 (2011).

Tzoumaki, M., Moschakis, T., Kiosseoglou, V., Biliaderis, C. **Oil-in-water emulsions stabilized by chitin nanocrystal particles.** Food Hydrocolloids, 25(6), 1521-1529 (2011).

Vaillant, V., Desfontaines, L. **Assimilate partitioning in *Pachyrhizus erosus* tubers under short days.** *Plant Physiology*, 93, 558-562 (1995).

Vignati, E., Piazza, R., Lockhart, T. **Pickering emulsions: interfacial tension, colloidal layer morphology, and trapped-particle motion.** *Langmuir*, 19(17), 6650-6656 (2003).

Weiss, J., Decker, E., McClements, D., Kristbergsson, K., Helgason, T., Awad, T. **Solid Lipid Nanoparticles as Delivery Systems for Bioactive Food Components.** *Food Biophysics*, 3(2), 146-154 (2008).

Winuprasith, T., Suphantharika, M. **Microfibrillated cellulose from mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) rind: Preparation, characterization, and evaluation as an emulsion stabilizer.** *Food Hydrocolloids*, 32, 383-394 (2013).