

CARACTERIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA ENTRE
UN AGENTE ACONDICIONADOR Y TRES SURFACTANTES IÓNICOS CON EL FIN
DE MEJORAR LAS PROPIEDADES ACONDICIONADORAS

Jorge Emilio Reyes Moreno

UNIVERSIDAD ICESI

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES

MAESTRÍA EN FORMULACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y DERIVADOS

Santiago de Cali

2017

CARACTERIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA ENTRE
UN AGENTE ACONDICIONADOR Y TRES SURFACTANTES IÓNICOS CON EL FIN
DE MEJORAR LAS PROPIEDADES ACONDICIONADORAS

Jorge Emilio Reyes Moreno

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE MAGISTER EN
FORMULACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y DERIVADOS

Constain Hugo Salamanca

UNIVERSIDAD ICESI

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES

MAESTRÍA EN FORMULACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y DERIVADOS

Santiago de Cali

2017

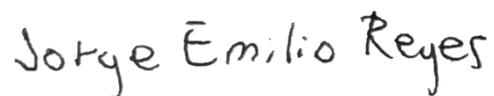
**FIRMAS AVAL DEL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL PROYECTO
DE GRADO II**

Firma Aval del Asesor:



Constain Hugo Salamanca Mejía, Ph.D

Firma del estudiante:



Jorge Emilio Reyes Moreno

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	13
3.	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	15
3.1.	MARCO TEÓRICO.....	15
3.1.1.	Surfactantes	15
3.1.2.	Agentes acondicionadores.....	17
3.1.3.	Teoría de coacervado	20
3.1.4.	Coacervado en formulaciones de champú	20
3.1.5.	Potencial zeta.....	23
3.1.6.	Transmitancia	25
3.2.	ESTADO DEL ARTE.....	26
4.	OBJETIVOS	27
4.1.	Objetivo general.....	27
4.2.	Objetivos específicos	27
5.	METODOLOGÍA	28
5.1.	Materiales	28
5.2.	Diseño experimental	28
5.3.	Determinación del potencial zeta en mezclas binarias	29
5.4.	Determinación de la turbidez en mezclas binarias	29
5.5.	Determinación de la viscosidad en mezclas binarias	29
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
6.1.	Determinación del potencial zeta en mezclas binarias	30
6.2.	Determinación de la turbidez en mezclas binarias	36
6.3.	Determinación de la viscosidad en mezclas binarias	39
6.4.	Análisis estadístico.....	41

7.	CONCLUSIONES.....	44
8.	RECOMENDACIONES.....	44
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	45
10.	ANEXOS.....	50
10.1.	Anexo 1 – Datos obtenidos	50
10.1.1.	Determinación del potencial zeta en mezclas binarias	50
10.1.2.	Determinación de la turbidez en mezclas binarias	51
10.1.3.	Determinación de viscosidad en mezclas binarias.....	53
10.1.4.	Análisis estadístico	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Niveles por factor a evaluar	28
Tabla 2. Tratamientos empleados	29
Tabla 3. Efectos de los factores en las respuestas	41
Tabla 4. Potencial zeta mezclas PQ-10/LESS.....	50
Tabla 5. Potencial zeta mezclas PQ-10/LSSS	50
Tabla 6. Potencial zeta mezclas PQ-10/CAPB.....	51
Tabla 7. Transmitancia mezclas PQ-10/LESS	51
Tabla 8. Transmitancia mezclas PQ-10/LSSS	52
Tabla 9. Transmitancia mezclas PQ-10/CAPB	52
Tabla 10. Viscosidad mezclas PQ-10/LESS	53
Tabla 11. Viscosidad mezclas PQ-10/LSSS	53
Tabla 12. Viscosidad mezclas PQ-10/CAPB	53
Tabla 13. Análisis de varianza de potencial zeta mezclas PQ-10/LESS	54
Tabla 14. Análisis de varianza de potencial zeta mezclas PQ-10/LSSS	54
Tabla 15. Análisis de varianza potencial zeta mezclas PQ-10/CAPB	54
Tabla 16. Análisis de varianza de transmitancia mezclas PQ-10/LESS	55
Tabla 17. Análisis de varianza transmitancia mezclas PQ-10/LSSS	55
Tabla 18. Análisis de varianza transmitancia mezclas PQ-10/CAPB	55
Tabla 19. Análisis de varianza de viscosidad mezclas PQ-10/LESS	56
Tabla 20. Análisis de varianza viscosidad mezclas PQ-10/LSSS	56
Tabla 21. Análisis de varianza viscosidad mezclas PQ-10/CAPB.....	56

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/LESS	31
Gráfica 2. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/LSSS	32
Gráfica 3. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/CAPB	33
Gráfica 4. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/LSSS	37
Gráfica 5. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/LESS	38
Gráfica 6. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/CAPB	39
Gráfica 7. Viscosidad mezclas binarias	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del Lauril Éter Sulfato de Sodio (LESS).....	15
Figura 2. Estructura del Lauril Sarcosinato de Sodio (LSSS).....	16
Figura 3. Estructura de la Cocoamido Propil Betaína (CAPB).....	17
Figura 4. Estructuras monoméricas del Policuaternio 7 (izquierda) y Policuaternio 10 (derecha)	18
Figura 5. Coacervado y polímero disuelto	20
Figura 6. Coacervado y polímero solubilizado.....	21
Figura 7. Coacervado y precipitación del polímero.....	22
Figura 8. Doble capa eléctrica	24
Figura 9. Luz transmitida a través de una celda	25

RESUMEN

La necesidad del sector cosmético para responder a la continua demanda, por parte de los consumidores, de beneficios adicionales en los productos para el cuidado capilar ha hecho más complejo lograr formular un champú que cumpla con las expectativas del mercado actual. Para aportar estos beneficios, se debe incluir en la formulación un agente acondicionador que se adhiera a las fibras capilares y genere los efectos deseados. Sin embargo, estos componentes pueden formar un complejo aniónico-catiónico o coacervado, con surfactantes presentes en el champú. Debido a esto, su caracterización instrumental permite tener un mayor conocimiento sobre el funcionamiento del producto. Consecuentemente, este proyecto busca establecer la relación óptima entre la concentración de tres surfactantes y un agente acondicionador que maximicen su adherencia a las fibras capilares. Para lograr esto, se evaluó la formación del coacervado en mezclas binarias polímero-surfactante por medio de potencial zeta, turbidimetría y viscosimetría. Las mezclas binarias contenían diferentes concentraciones de lauril éter sulfato de sodio, lauril sarcosinato de sodio, cocoamidopropil betaína y policuaturnio 10. Se encontró formación de un coacervado con lauril sarcosinato de sodio, el cual estaba favorecido por concentraciones bajas del surfactante. También se encontró el coacervado no dependía de las concentraciones de polímero evaluadas. Adicionalmente, no se encontró formación de coacervado con cocoamidopropil betaína.

Palabras clave: coacervado, lauril éter sulfato de sodio, lauril sarcosinato de sodio, cocoamidopropil betaína.

ABSTRACT

The raising demands of additional benefits made by consumers has made hair care products more complex to formulate. In today shampoo formulations some of these benefits can be achieved by the addition of a conditioning agent in the formulation. This conditioning agent can adhere to hair fibers to generate de desired effect. However, the conditioning agent can also adhere to surfactants present in the formulation, thus forming a cationic-anionic complex or coacervate. Due to this, an instrumental characterization of this process can provide essential knowledge about the product behavior. Consequently, this project aims to maximize the conditioning agent deposition on hair by stablishing the optimum concentration between three surfactants and one conditioning agent to maximize this deposition. In order to achieve this, the coacervate developed between polymer-surfactant mixtures was studied by zeta potential, turbidity and viscosity measurements. The binary mixtures contained different concentrations of sodium lauryl ether sulfate, sodium lauryl sarcosinate, cocamidopropyl betaine and polyquaternium 10. The formation of a coacervate between sodium lauryl sarcosinate and polyquaternium 10 was observed. This coacervate was greatly favored by lower concentrations of the surfactant. However, no dependency of polyquaternium 10 concentration was observed for the coacervate. Additionally, with cocamidopropyl betaine no coacervate formation was found.

Keywords: coacervate, sodium lauryl ether sulfate, sodium lauryl sarcosinate, cocamide propyl betaine.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad del sector cosmético para responder a la continua demanda, por parte de los consumidores, de beneficios adicionales en los productos para el cuidado capilar ha hecho más complejo el lograr formular un champú que cumpla con las expectativas del mercado actual. Para aportar estos beneficios, es necesario incluir en la formulación un agente acondicionador que se adhiera a las fibras capilares y genere los efectos deseados(1,2).

Estos componentes también pueden formar un complejo aniónico-catiónico o coacervado(3), debido a interacciones electrostáticas con otros componentes de la formulación, como surfactantes aniónicos, lo cual puede impedir o mejorar la deposición del polímero en el cabello(4).

La formación de este complejo y su estructura cristalina dependen de diferentes factores que pocas veces son tomados en cuenta. Bungenberg de Jong *et al.* (1949) encontraron que estos complejos de coacervado tienden a depender del peso molecular del polímero, concentración y proporción de los surfactantes o poli-iones, además de la fuerza iónica, pH y temperatura del medio(5)

Haciendo uso del coacervado se puede lograr la precipitación del polímero dependiendo de los diferentes factores, mencionados anteriormente. La precipitación puede ocurrir cuando el champú es diluido(4,6–9). Esta etapa de dilución se presenta cuando el consumidor usa el agua de la ducha para retirar el champú aplicado, durante el enjuague del cabello.

Debido a esto, su caracterización instrumental permite al formulador tener un mayor conocimiento sobre el funcionamiento de su producto, adquiriendo así un mejor panorama para la toma de decisiones para la selección de las materias primas que serán usadas en la formulación de un champú acondicionador.

En la industria cosmética nacional, el uso de técnicas instrumentales durante la etapa de diseño y formulación de productos es muy escaso. Esto se debe a los altos costos de adquisición de estos equipos y a una metodología de diseño y formulación empírica que se encuentra fuertemente arraigada en las empresas de este sector.

El presente proyecto busca establecer la relación óptima entre la concentración de tres surfactantes y un agente acondicionador que maximicen su adherencia a las fibras capilares. Para lograr este objetivo se evaluará la interacción electrostática entre mezclas binarias del agente acondicionador y los surfactantes a diferentes concentraciones mediante la medición de potencial zeta, transmitancia y viscosidad. Adicionalmente, se evaluará la agregación de partículas en diluciones sucesivas de las mezclas binarias. Las técnicas de análisis que se emplearán son: medición de transmitancia mediante espectroscopia, medición de potencial zeta mediante movilidad electroforética y medición de viscosidad con viscosímetro de Brookfield.

Se espera que este proyecto permita establecer cómo las concentraciones de agente acondicionador y surfactantes afectan la formación del coacervado. También, se espera establecer la relación óptima entre la concentración de agente acondicionador y surfactantes que garanticen las propiedades deseadas. Adicionalmente, se espera que la industria cosmética nacional pueda verse beneficiada al usar este estudio como una aproximación al diseño y formulación de champús empleando el diseño de experimentos y técnicas instrumentales disponibles con prestadores de servicios de análisis locales.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La necesidad del sector cosmético para responder a la continua demanda de beneficios adicionales en los productos para el cuidado capilar, por parte de los consumidores, ha hecho más complejo el lograr formular un champú que cumpla con las expectativas del mercado actual. Entre los beneficios adicionales se encuentran el acondicionamiento, suavidad, fácil peinado, entre otros(9).

Para aportar estos beneficios adicionales al producto, es necesario incluir en la formulación un agente acondicionador que logre contrarrestar la repulsión electrostática que genera el surfactante aniónico sobre el cabello. Dentro del grupo de ingredientes acondicionadores capilares, se encuentran los polímeros catiónicos, que tienen en su estructura múltiples cargas positivas, las cuales mediante interacciones electrostáticas, se adhieren a las fibras capilares, cargadas negativamente, y generan los efectos deseados(1). Estos componentes también pueden formar un complejo aniónico-catiónico, debido a interacciones electrostáticas, con otros componentes de la formulación, como surfactantes aniónicos, lo cual puede impedir la deposición del polímero en el cabello(6).

Sin embargo, este complejo, también llamado coacervado(3), puede ser aprovechado para la deposición del polímero en el cabello y mejorar la deposición de otros componentes de la formulación como siliconas o aceites esenciales(2,4,10).

La formación de este complejo y su estructura cristalina dependen de diferentes factores que pocas veces son tomados en cuenta. Bungenberg de Jong *et al.* (1949) encontraron que estos complejos de coacervado tienden a depender del peso molecular del polímero, concentración y proporción de los surfactantes o poli-iones, además de la fuerza iónica, pH y temperatura del medio(5).

La caracterización instrumental de cómo los factores anteriores afectan la formación del coacervado, permite al formulador tener un mayor conocimiento sobre el funcionamiento de su producto, y cómo estos factores influyen en este, adquiriendo así un mejor panorama para la toma de decisiones para la selección de las materias primas que serán usadas en la formulación de un champú acondicionador.

En la industria cosmética nacional, el uso de técnicas instrumentales durante la etapa de diseño y formulación de productos es muy escaso. Esto se debe a los altos costos de adquisición de estos equipos y a una metodología de diseño y formulación empírica que se encuentra fuertemente arraigada en las empresas de este sector.

El presente proyecto busca establecer la relación óptima entre la concentración de tres surfactantes y un agente acondicionador que maximicen su adherencia a las fibras capilares. Para lograr este objetivo se evaluará la interacción electrostática entre mezclas binarias del agente acondicionador y los surfactantes a diferentes concentraciones mediante la medición de potencial zeta, transmitancia y viscosidad. Las técnicas de análisis que se emplearán son: medición de transmitancia mediante espectroscopia, medición de potencial zeta mediante movilidad electroforética y medición de viscosidad con viscosímetro de Brookfield.

Se espera que el proyecto permita establecer cómo las concentraciones de agente acondicionador y surfactantes afectan la formación del coacervado. También, se espera establecer la relación óptima entre la concentración de agente acondicionador y surfactantes que garanticen las propiedades deseadas. Adicionalmente, se espera que la industria cosmética nacional pueda verse beneficiada al usar este estudio como una aproximación al diseño y formulación de champús empleando el diseño de experimentos y técnicas instrumentales disponibles con prestadores de servicios de análisis locales.

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1. MARCO TEÓRICO

3.1.1. Surfactantes

Un surfactante es una molécula orgánica que en su estructura presenta un carácter dual de polaridad, es decir, tiene una parte polar o hidrófila y otra parte apolar o hidrófoba; además se le confiere la propiedad de afectar la tensión superficial a muy bajas concentraciones(11).

Los surfactantes se pueden dividir en cuatro grupos, dependiendo de su carga: aniónicos, catiónicos, anfóteros o zwitteriónicos y neutros(12). Los surfactantes aniónicos se denominan así porque tienen una carga negativa, y son utilizados principalmente como agentes de limpieza fuertes. Los catiónicos, reciben el nombre por tener una carga positiva en su estructura y se utilizan principalmente como agentes acondicionadores o de suavidad. Los anfóteros, poseen los dos tipos de cargas en su estructura, y se usan como agentes de limpieza suaves y generadores de espuma abierta. Por último, los surfactantes no iónicos o neutros, son los que no tienen ninguna carga en su estructura y se utilizan como agentes de limpieza muy suaves y como generadores de espumas cerradas o cremosas.

3.1.1.1. Lauril éter sulfato de sodio

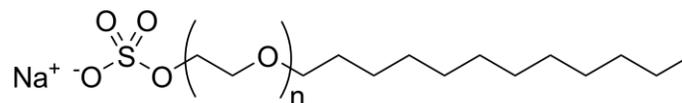


Figura 1. Estructura del Lauril Éter Sulfato de Sodio (LESS)

Es uno de los surfactantes aniónicos más empleados por la industria cosmética debido a su bajo costo, detergencia, su baja afinidad por la piel y alta formación de espuma. A diferencia

del lauril sulfato de sodio, es menos afín por la piel debido a la presencia de unidades de óxido de etileno.

El efecto del pH en su comportamiento en solución es despreciable debido al grupo sulfato. Este grupo le otorga un comportamiento de ácido fuerte, razón por la cual siempre se encontrará disociado en solución(13).

Se ha estudiado su interacción en solución con algunos agentes acondicionadores como los policuaternos 4, 6, 7, 10, 11, 16 y 44, el cloruro de guar hidroxipropiltrimonio y otras gomas cuaternizadas(4,9,14,15).

3.1.1.2. Lauril sarcosinato de sodio

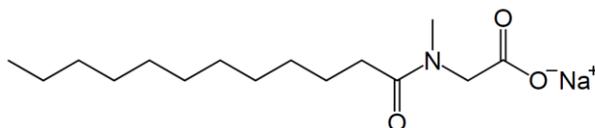


Figura 2. Estructura del Lauril Sarcosinato de Sodio (LSSS)

Es un surfactante aniónico empleado en la industria cosmética en productos destinados a uso facial o para bebés. Esto se debe a que posee una menor afinidad por la piel que el LESS aportando un sensorial suave a las formulaciones que lo incluyen. También es un buen formador de espuma.

Teniendo en cuenta que su pKa es de 3.6 (16), se espera que se encuentre principalmente disociado en formulaciones de champú, pues estos tienen pH mayor a 5.

3.1.1.3. Cocoamidopropil betaína

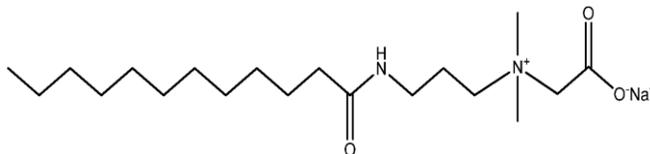


Figura 3. Estructura de la Cocoamido Propil Betaína (CAPB)

Es un surfactante anfotérico empleado por la industria cosmética para potenciar la formación de espuma en productos de aseo personal. Su baja detergencia le da una alta compatibilidad con la piel.

La interacción en solución de la cocoamidopropil betaína u otras betaínas con agentes acondicionadores son poco estudiadas(8,15). Probablemente porque contienen principalmente dos grupos funcionales que les confieren un carácter anfotérico: un grupo amonio cuaternario y un grupo carboxilato(13,17). El grupo amonio cuaternario es incapaz de donar protones y el efecto del pH sobre este es despreciable(13,17). Por otro lado, el grupo carboxilato se encontrará protonado por debajo del pKa y desprotonado por encima del pKa, el cual es menor a 5.5 para CAPB(18). Teniendo en cuenta el comportamiento de estos dos grupos funcionales es de esperar que las betaínas tengan un carácter aniónico despreciable, pues dependiendo del pH se encontraran en forma zwitteriónica o catiónica(13,17).

3.1.2. Agentes acondicionadores

Los agentes acondicionadores usados en la formulación de champús se limitan casi que exclusivamente a los polímeros catiónicos. Dentro de este grupo de polímeros, los más utilizados son el cloruro de guar hidroxipropiltrimonio y la familia de los denominados policuaternios(19).

Las estructuras de estos polímeros difieren mucho entre sí, incluso en los polímeros de una misma familia como los policuaternos, pues a pesar que todos tienen los mismos nombres, difieren en sus unidades monoméricas. Adicionalmente, dependiendo de las condiciones de su elaboración, estos pueden diferir en el peso molecular promedio, la polidispersidad, la densidad de carga y el grado de sustitución(19). A continuación, se muestran las estructuras monoméricas de dos de los policuaternos más utilizados.

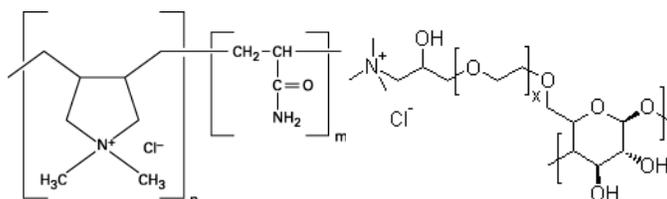


Figura 4. Estructuras monoméricas del Policuaterno 7 (izquierda) y Policuaterno 10 (derecha)

Existen dos mecanismos por los cuales estos polímeros catiónicos pueden adherirse sobre las fibras capilares. El primer mecanismo, ocurre debido a las interacciones entre las cargas catiónicas del polímero y las cargas negativas del cabello provenientes de la queratina, proteína que conforma la mayor parte del cabello. El segundo mecanismo, ocurre debido a la separación de fase del polímero como resultado de la formación de un complejo de agregación con un componente de carga opuesta, principalmente surfactantes aniónicos(20,21), tal como ocurre en champús acondicionadores.

Ambos mecanismos pueden ocurrir simultáneamente debido al dinamismo de las interacciones iónicas. Sin embargo, la prevalencia de uno o del otro de los mecanismos dependerá de los componentes presentes en cada formulación de champú.

Mediante la medición del potencial zeta y usando dispersión de luz dinámica, es posible determinar si la adsorción de estos polímeros en el cabello se debe al primer o segundo mecanismo. Esto se realiza midiendo el cambio del potencial zeta del cabello antes y después

de la aplicación y enjuague de un champú. Si el potencial zeta cambia de negativo a positivo, entonces la deposición ocurre por el primer mecanismo. Por otro lado, si el potencial zeta se hace menos negativo, pero sin volverse positivo, entonces la deposición ocurre por el segundo mecanismo(9,14,19).

Miyake y Kakizawa (2010) estudiaron por esta técnica los complejos formados entre una celulosa catiónica y un dextrano catiónico con el lauril éter sulfato de sodio, y concluyeron que es de vital importancia el control de las cargas de ambas especies y la estructura del polímero para obtener excelentes efectos acondicionadores(4). Diferentes autores también han utilizado dispersión de luz dinámica y potencial zeta para estudiar este tipo de complejos(1,9,12,14,22–24).

3.1.2.1. Policuaternio 10

El éter de cloruro de hidroxipropil trimetilamonio de hidroxietilcelulosa, mejor conocido como policuaternio 10 (PQ-10), es obtenido de la reacción de hidroxietilcelulosa con epiclorhidrina, seguido de una cuaternización con trimetilamina. Es un polímero soluble en agua formador de película que imparte buena peinabilidad en húmedo y manejabilidad al cabello(19).

Goddard (1998) determinó que este polímero tiene una tendencia a precipitar cuando se encuentra en presencia del surfactante aniónico lauril sulfato de sodio (SDS), esto es debido a la formación de un complejo de coacervación entre el polímero y el surfactante. La solubilidad de este complejo es dependiente tanto de la concentración del polímero como de la concentración de surfactante(20,21).

3.1.3. Teoría de coacervado

Un coacervado o complejo de coacervación es el resultado de mezclar iones de carga opuesta en un medio acuoso. Este se forma por interacciones electrostáticas de atracción entre las cargas opuestas de ambas especies (generalmente un surfactante iónico con un polímero iónico de carga opuesta) (3–5,8,10,12,23,25–27).

El coacervado formado entre un agente acondicionador y un surfactante de carga opuesta altera las interacciones electrostáticas del agente acondicionador con el cabello, reduciendo la cantidad de polímero disponible para unirse al cabello.

Estos complejos de coacervado tienden a depender del peso molecular, concentración y proporción de los surfactantes o poli-iones, además de la fuerza iónica, pH y temperatura del medio(1,5,20,28). Adicionalmente, la formación y morfología del coacervado dependen del polímero catiónico y los surfactantes iónicos empleados(4).

3.1.4. Coacervado en formulaciones de champú

El coacervado juega un papel muy importante para el desempeño de un champú acondicionador, pues este fenómeno puede ser aprovechado para lograr una mejor deposición del agente acondicionador en el cabello(2,4,7–9). Si no hay formación de coacervado, las cargas catiónicas del polímero lo hacen soluble en agua, lo cual disminuye la deposición del polímero al cabello. Para que haya una completa deposición del polímero este debe separarse de la solución, es decir, debe precipitar(6).

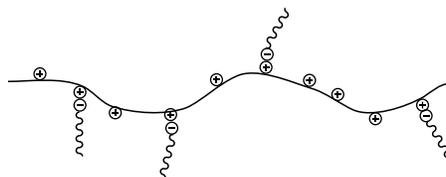


Figura 5. Coacervado y polímero disuelto

Haciendo uso del coacervado se puede lograr la precipitación del polímero dependiendo de los diferentes factores, mencionados anteriormente. La precipitación puede ocurrir cuando el champú es diluido(4,6–9). Esta etapa de dilución se presenta cuando el consumidor usa el agua de la ducha para retirar el champú aplicado, durante el enjuague del cabello.

La precipitación no ocurre en el champú cuando se supera la concentración micelar crítica del surfactante, porque la micelas formadas no solo interactúan de manera atractiva con el polímero catiónico, sino que también interaccionan atractivamente con el agua del medio mediante fuerzas de ion-dipolo, justo como se ilustra en la siguiente figura(8,26,29):

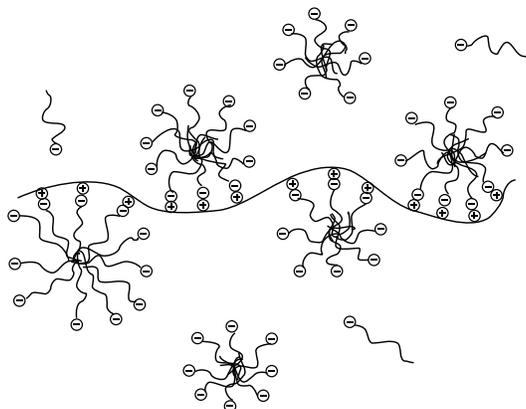


Figura 6. Coacervado y polímero solubilizado

A medida que el champú es diluido, la concentración de surfactante va disminuyendo. Esto lleva a una pérdida de las micelas y a la neutralización del complejo por la pérdida de las fuerzas de ion-dipolo que proporcionaban las mismas. Lo anterior da como resultado un aumento de la repulsión hidrófoba del complejo y su posterior agregación para disminuir la repulsión y así aumentar su estabilidad termodinámica.

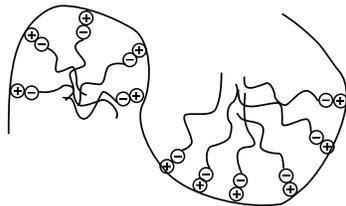


Figura 7. Coacervado y precipitación del polímero

Lo anterior se evidencia en los resultados obtenidos por Hossel *et al.* (1998; 2000). Al estudiar, mediante potencial zeta, los policuaternos 7, 10, 11 y 44 con el surfactante aniónico lauril éter sulfato de sodio encontraron que los polímeros evaluados se adhieren fácilmente a la superficie del cabello mediante la formación de un complejo de carga neutra. Adicionalmente, encontraron que el PQ-10 es retirado fácilmente del cabello tras lavados sucesivos con agua, lo cual es una propiedad deseada para evitar su acumulación a largo plazo en el cabello durante su uso diario(9,14).

Además de potencial zeta, la deposición del polímero en la superficie del cabello puede estudiarse mediante microscopía de fuerza atómica (AFM). Al igual que en las mediciones de potencial zeta, se analiza la superficie del cabello antes y después de la aplicación y enjuague de un champú, determinándose los cambios sobre esta superficie.

Hossel *et al.* (2000) encontraron que el mejor efecto acondicionador fue alcanzado con el policuaterno 44(9); André *et al.* (1999) también evaluaron dos policuaternos (16 y 44) con el lauril éter sulfato de sodio e igualmente encontraron que el policuaterno 44 tuvo un mejor efecto acondicionador al depositarse mejor en las fibras capilares(7). Otros autores han evaluado también este efecto de deposición, utilizando diferentes moléculas mediante esta misma técnica (AFM)(5,12,19,20).

Por otro lado, la estructura y la distribución de tamaños del coacervado pueden estudiarse mediante dispersión de luz dinámica (DLS). En esta técnica se determina el diámetro

hidrodinámico del coacervado midiendo su difusión en solución, la cual ocurre debido al movimiento browniano(30).

Adicionalmente, la formación del coacervado en solución también puede ser estudiada evaluando la aparición de turbidez como resultado de la dilución del sistema. Si hay enturbiamiento, entonces hay reducción de la solubilidad de los componentes debido al mecanismo de agregación que se mencionó anteriormente. La turbidez puede ser cuantificada fácilmente mediante transmitancia o elipsometría(7,10,12,15,23,27).

3.1.5. Potencial zeta

Los sistemas coloidales son aquellos que están conformados por componentes que tienen al menos una de sus dimensiones en el rango de 10^{-9} m a 10^{-6} m, como macromoléculas y partículas pequeñas. Por medio de diferentes mecanismos se producen cargas eléctricas en la interface entre la fase dispersa y el medio acuoso. Dos de los mecanismos más comunes son la ionización de grupos funcionales y la adsorción de iones(31).

Los agentes acondicionadores, específicamente los polímeros catiónicos, al ser macromoléculas forman sistemas coloidales en soluciones acuosas. En estos la carga eléctrica que se desarrolla en la interface entre la fase dispersa y el medio se produce intrínsecamente debido a la presencia de grupos funcionales del tipo amonio cuaternario. Esta carga eléctrica influye en la distribución no uniforme de iones alrededor del polímero y el desarrollo de un potencial eléctrico entre la superficie de la partícula y el medio(32).

La superficie cargada y los contraiones que la rodean producen una doble capa eléctrica, la cual está separada en dos por el plano de Stern, tal como se observa en la figura 8. El potencial de la superficie de la partícula y el potencial de Stern son difíciles de medir, por este motivo se mide el potencial producido entre una capa de fluido estacionaria que rodea la partícula y el resto de la solución. Este potencial es conocido como potencial zeta (ζ) y es determinado

al medir el movimiento de la partícula cuando esta es sometida a un campo eléctrico. La medición de este potencial permite conocer la carga neta en la superficie de la partícula y la distribución de potencial en la interface(32).

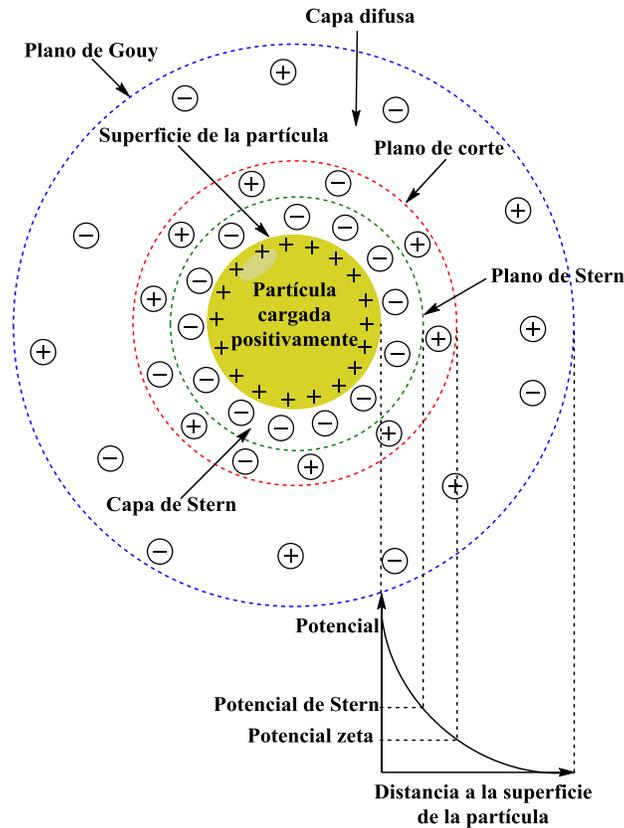


Figura 8. Doble capa eléctrica

La magnitud del potencial zeta es un indicativo de la potencial estabilidad cinética de un sistema coloidal. Si las partículas dispersas tienen una magnitud de potencial zeta muy grande, ya sea positivo o negativo, entonces las partículas se repelerán entre ellas y la tendencia a agregarse será baja. Por otro lado, si la magnitud del potencial zeta es muy pequeña, entonces la repulsión electrostática no será lo suficientemente fuerte para impedir la agregación de las partículas (33).

Generalmente, valores potencial zeta mayores a 30 mV o menores a -30 mV son considerados como estables(33). Sin embargo, existen otros factores que influyen en la estabilidad de un sistema coloidal. Entre estos factores se encuentra la densidad de las partículas, la viscosidad del medio, la temperatura y el impedimento estérico.

3.1.6. Transmitancia

La transmitancia es una medida de la cantidad de radiación que pasa a través de una muestra y puede ser medida con un espectrofotómetro. Cuando un haz de luz de una determinada longitud de onda e intensidad (I_0) pasa perpendicularmente a través de una muestra, una parte de la radiación será absorbida (I_a) por los componentes de la muestra y la radiación restante (I_b) atravesará la muestra. De acuerdo con lo anterior se obtiene la siguiente ecuación $I_0 = I_a + I_b$ (34).

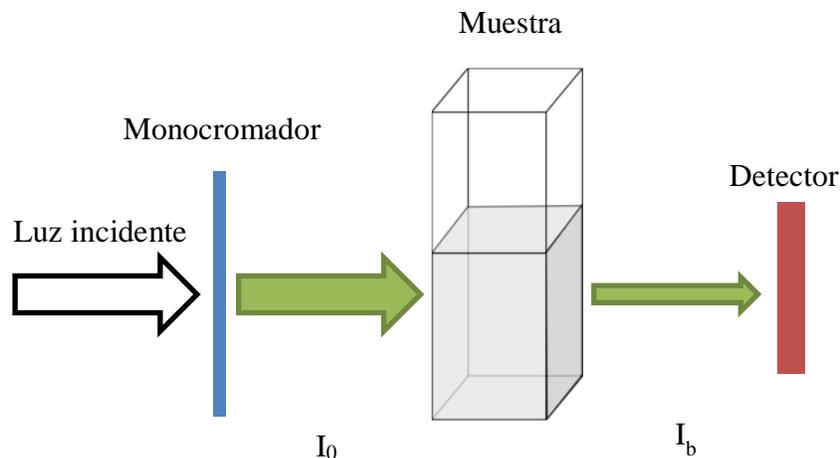


Figura 9. Luz transmitida a través de una celda

Como mencioné anteriormente, la transmitancia es una medida de la radiación que atraviesa una muestra. Dicha medida se obtiene mediante la relación entre la radiación que atraviesa la muestra (I_b) y la radiación incidente (I_0): $T\% = \left(I_b / I_0 \right) * 100$.

De acuerdo a lo anterior, una transmitancia del 100% indicaría que toda la radiación incidente atraviesa la muestra. De esta manera es posible determinar la turbidez de una muestra, puesto que a mayor turbidez menos radiación atravesará la muestra y la transmitancia será menor.

3.2. ESTADO DEL ARTE

El campo de estudio de las interacciones entre polielectrolitos y surfactantes, si bien era conocido, fue poco estudiado hasta que se comprendió que el comportamiento de los sistemas coloidales dependía de fenómenos interfaciales. Wo. Ostwald, quien estudio ampliamente los sistemas coloidales, se interesó en este campo y estudió, entre 1912 y 1927, las interacciones de soluciones coloidales de gelatina y caseína con sulfatos y ácido sulfosalicílico. Wo. Ostwald observó que la adición de sulfatos y ácido sulfosalicílico ocasionaba la coalescencia de las partículas de gelatina y caseína, dando como resultado la formación de dos capas liquidas parcialmente miscibles(5).

Sin embargo, el termino coacervado no fue acuñado sino hasta 1929 por Bungenberg de Jong y Kruyt(5). Posteriormente, en 1949 Bungenberg de Jong realizo un extenso análisis y descripción fisicoquímica de este sistema, proponiendo un sistema de clasificación que distinguía principalmente dos tipos de coacervado. En el primero, llamado coacervado simple, los grupos ionizados de la macromolécula no participaban activamente en su formación. Mientras que en el segundo, llamado coacervado complejo, los grupos ionizados sí participaban activamente(5).

Por otro lado, fue Goddard quien, en 1976, propuso que la adsorción de los polímeros acondicionadores en el cabello ocurre cuando el champú es retirado del cabello durante el lavado (23). Posteriormente, Goddard continuo trabajando (1976-1999) en este campo, estudiando la interacción en solución entre diferentes polímeros y surfactantes, pero principalmente entre policuaturnio 10 y lauril sulfato de sodio (20,21,27,35). Actualmente el trabajo de Goddard y su explicación de la formación del coacervado, la cual fue descrita

anteriormente en el marco teórico del presente proyecto, continúan siendo referenciadas a nivel mundial.

Por otra parte, estudios más recientes (2009-2011) han evaluado la aplicación del coacervado para la deposición de ingredientes funcionales en champús(10), la estructura interna del coacervado(4,28) y la distribución del coacervado entre la solución y la espuma formada(25).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Establecer la relación óptima entre la concentración de tres surfactantes y un agente acondicionador que maximicen su adherencia a las fibras capilares.

4.2. Objetivos específicos

- Evaluar la interacción electrostática entre mezclas binarias del agente acondicionador y los surfactantes, en diluciones sucesivas, mediante la medición de potencial zeta.
- Evaluar la interacción electrostática entre mezclas binarias del agente acondicionador y los surfactantes, en diluciones sucesivas, mediante la medición de turbidez.
- Evaluar la interacción electrostática entre mezclas binarias del agente acondicionador y los surfactantes, en diluciones sucesivas, mediante la medición de la viscosidad.

5. METODOLOGÍA

5.1. Materiales

En el presente trabajo se emplearon tres surfactantes iónicos: lauril éter sulfato de sodio (TEXAPON N 70®, 70% de activo, BASF), lauril sarcosinato de sodio (PERLASTAN L 30®, 30% de activo, Schill + Seilacher) y cocoamidopropil betaína (PROBETAINA CAPB®, 30% de activo, Protecnic Ingeniería), junto con un polímero catiónico policuaturnio 10 (MICONIUM PQ10-J400®, Miwon Commercial Company). Todas las materias primas fueron adquiridas por medio de proveedores locales.

Las muestras se prepararon disolviendo el polímero en agua desionizada a 40°C con agitación axial a 500 RPM. Posteriormente, la solución anterior se adicionó a una solución, previamente preparada, del surfactante. Finalmente, se ajustó el pH de cada solución a 7.4 con ácido clorhídrico o hidróxido de sodio según correspondiera.

5.2. Diseño experimental

Las muestras analizadas corresponden a 4 factores de dos niveles cada uno, un nivel alto y un nivel bajo. Lo anterior corresponde a un total de 12 tratamientos, los cuales se realizaron por triplicado, obteniéndose un total de 36 unidades experimentales.

Tabla 1. Niveles por factor a evaluar

Factor	Nivel Bajo	Nivel Alto
PQ-10	0,4	0,6
LESS	4	6
LSSS	4	6
CAPB	4	6

Adicionalmente, se evaluó la significancia ($\alpha = 0.050$) de los factores y las interacciones de primer orden mediante un análisis de varianza.

Tabla 2. Tratamientos empleados

Tratamiento	PQ-10 (% p/p)	LESS (% p/p)	Tratamiento	PQ-10 (% p/p)	LSSS (% p/p)	Tratamiento	PQ-10 (% p/p)	CAPB (% p/p)
1	0,4	4	5	0,4	4	9	0,4	4
2	0,4	6	6	0,4	6	10	0,4	6
3	0,6	4	7	0,6	4	11	0,6	4
4	0,6	6	8	0,6	6	12	0,6	6

5.3. Determinación del potencial zeta en mezclas binarias

Se usó el Nanoziser ZSP de Malvern con el modelo de Smoluchowski, selección de atenuación y voltaje automática, 3 mediciones y 20 corridas por medición a una temperatura de 25°C. Se debe aclarar que debido la alta conductividad de las muestras las mediciones se realizaron con un factor de dilución de 0.7 (7:10). Adicionalmente, se midió el potencial zeta de las muestras diluidas con factores de dilución del 0.5 (1:2) y 0.25 (1:4).

5.4. Determinación de la turbidez en mezclas binarias

Se usó un espectrofotómetro UV-1800 en modo de transmitancia con una longitud de onda de 680 nm, a una temperatura de 25°C y 3 mediciones por muestra. Adicionalmente, se midió la transmitancia de las muestras diluidas con factores de dilución del 0.7 (7:10), 0.5 (1:2) y 0.25 (1:4).

5.5. Determinación de la viscosidad en mezclas binarias

Se usó un viscosímetro de Brookfield DV-I Prime con la aguja número uno del set de agujas RV, a 100 revoluciones por minuto, a una temperatura de 25°C y se realizaron 3 mediciones por muestra.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

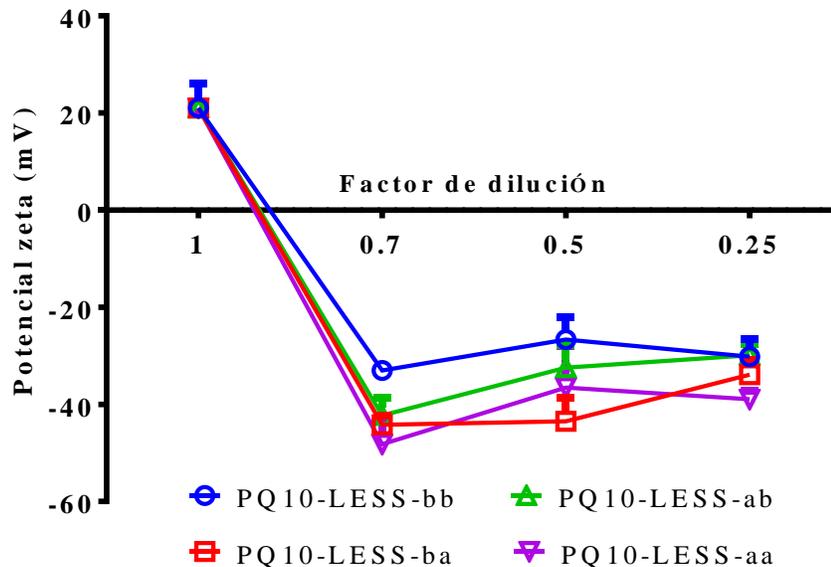
6.1. Determinación del potencial zeta en mezclas binarias

Los valores de potencial zeta obtenidos para los surfactantes LESS y LSSS fueron negativos, mientras que para CAPB fueron positivos, los resultados se pueden visualizar en la gráfica 1. En esta gráfica, los términos bb, ba, ab y aa, hacen referencia respectivamente a los niveles de polímero y surfactante descritos en el diseño experimental, específicamente la denotación “b” corresponde al nivel bajo y la denotación “a” al nivel alto. En otras palabras, el nivel indica si la concentración corresponde a la más alta (6% para los surfactantes y 0.6% para el polímero) o a la más baja (4% para los surfactantes y 0.4% para el polímero). Por ejemplo, PQ10-LESS-bb corresponde al nivel bajo (0.4%) de PQ-10 y el nivel bajo de LESS (4%).

Adicionalmente, se debe aclarar que con el fin de comparar el potencial zeta del polímero en presencia o ausencia del surfactante, los factores de dilución 1 corresponden al potencial zeta del polímero sin presencia de surfactante. Los factores de dilución indican la proporción de muestra en la solución, es decir que la más concentrada es 0.7 y la más diluida es 0.25.

Primero resulta conveniente subrayar que el LESS interacciona principalmente atractivamente con el policuaturnio 10. En primer lugar, porque es una sal que se disocia completamente en agua. En segundo lugar, tiene un grupo sulfato que no se protona porque su forma ácida se comporta como un ácido fuerte. Lo anterior, sumado al hecho que la concentración del surfactante está por encima de su concentración crítica micelar, la cual experimentalmente se determinó que es 0.78 mM (36), se infiere que este surfactante interacciona con el polímero de acuerdo a la teoría del coacervado descrita en el marco

teórico de este proyecto. Es decir, las micelas con carga neta negativa interactúan atractivamente con los grupos amonio cuaternario del polímero, dando la formación del complejo de coacervación.

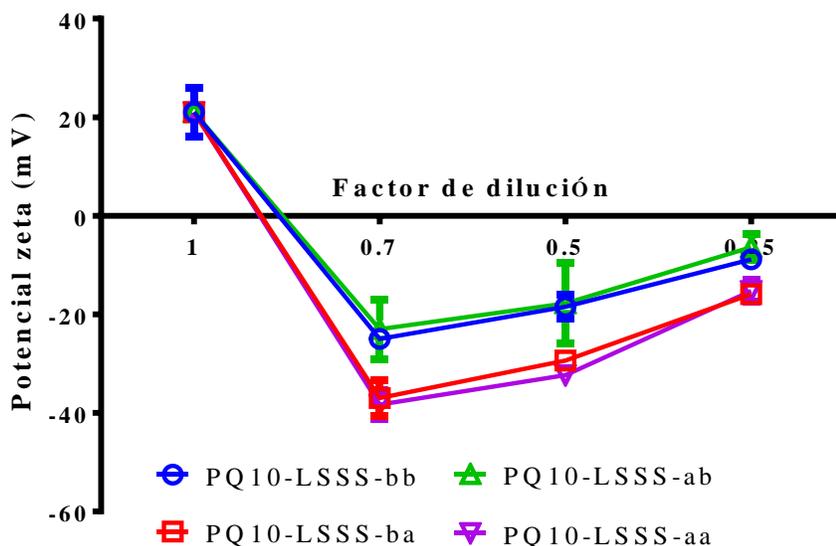


Gráfica 1. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/LESS

Tal como se observa en la gráfica 1, los valores más pequeños, es decir los más negativos, correspondían al nivel alto-alto (aa), mientras que los valores más grandes correspondían al nivel bajo-bajo (bb). Esto ocurre porque a una concentración mayor de surfactante la cantidad de contraiones negativos (lauril éter sulfato) será mayor y, por lo tanto, la carga neta de la partícula será más negativa. Es decir, hay un aumento en el número de micelas en solución lo cual genera una mayor repulsión electrostática entre las micelas unidas al polímero, según la teoría del coacervado, y las micelas libres.

Al igual que el surfactante anterior, el LSSS tendrá principalmente interacciones atractivas con el polímero. Sin embargo, a diferencia del LESS, esta interacción sí es dependiente del

pH debido al grupo carboxilo. No obstante, como su pKa es 3.3(16) y el pH es de 7.4, este se encuentra disociado y por consiguiente la interacción será atractiva.

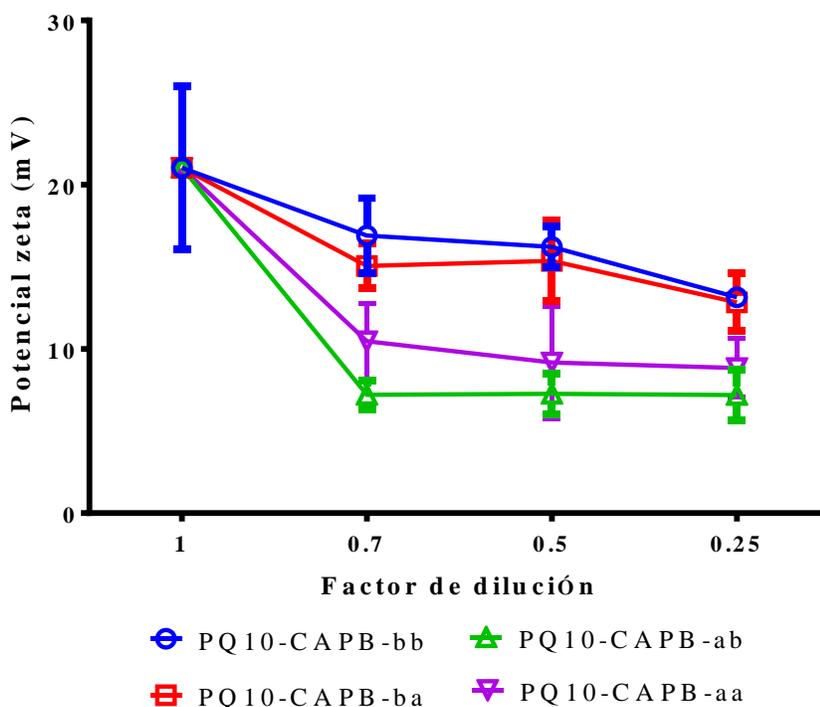


Gráfica 2. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/LSSS

Justo como se observa en la gráfica 2, los valores más pequeños correspondían a los niveles altos de LSSS (ab y aa) y los más grandes a los niveles bajos (bb y ba). Adicionalmente, en todas las muestras se observó turbidez, lo cual indica que probablemente la proporción de polímero/surfactante está muy cerca al punto en que el complejo polímero/surfactante precipita de la solución. Lo anterior se confirma con los resultados de transmitancia, los cuales serán analizados más adelante.

Ahora, si se tiene en cuenta que la concentración crítica micelar del LSSS es 14.6 mM(37) y la teoría del coacervado descrita en el marco teórico, el comportamiento anterior es fácilmente explicado por un aumento de la cantidad de contraiones (lauril sarcosinato), por consiguiente un aumento de la repulsión electrostática entre el coacervado y las micelas libres.

Sin embargo, a diferencia del surfactante LESS, el cambio del potencial zeta al aumentar la concentración de polímero, dejando la concentración de LSSS fija, es despreciable, tal y como se evidencia por la superposición de la curva de “bb” con “ba” y de “ab” con “aa” en la gráfica 2.



Gráfica 3. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/CAPB

En cuanto al surfactante CAPB, como se puede observar en la gráfica 3, en los niveles bajos de polímero (bb y ba) se obtuvieron los valores de potencial zeta más altos, mientras que los valores más altos se obtenían en los niveles más bajos (ab y aa) del mismo. Adicionalmente, se observó que el potencial zeta presentaba mayor variación al cambiar la concentración de polímero que al variar la concentración del surfactante.

Para entender este comportamiento hay que considerar el estado de ionización del surfactante. En este orden de ideas, la CAPB contiene dos grupos funcionales que le otorgan

su característica anfotérica. El primero es un amonio cuaternario que siempre permanecerá cargado positivamente independientemente del pH del medio(13,17). El segundo es un grupo carboxilo que dependiendo del pH se encontrará neutro o cargado negativamente. Ahora, como el pH del medio es 7.4 y el pKa de este surfactante es 5.5(18), resulta evidente que la CAPB se encontrará en forma zwitteriónica. En consecuencia, las interacciones atractivas entre el grupo carboxilo del surfactante y el policuaturnio 10 estarán muy limitadas por las interacciones repulsivas entre los grupos amonio cuaternario del polímero y el mismo surfactante.

De acuerdo con lo anterior, la repulsión electrostática entre el surfactante y el polímero no permite la formación del coacervado. De acuerdo a esto, al aumentar la concentración de polímero se da un gran aumento de la repulsión electrostática entre el polímero y el surfactante. Este aumento en la repulsión electrostática es más marcado al aumentar la concentración de polímero que al aumentar la concentración de surfactante porque el polímero tiene mayor tamaño y más grupos funcionales amonio cuaternario que el surfactante. Además, la repulsión entre partículas de polímero también aumenta.

Por otro lado, tal como se observa en los factores de dilución 1 de la gráfica 1, el potencial zeta del polímero cambia drásticamente en ausencia y presencia de los surfactantes LESS y LSSS. Teniendo en cuenta lo discutido anteriormente, esto se debe a que en ausencia del surfactante las partículas están cargadas positivamente debido a los grupos funcionales amonio cuaternario del polímero. Mientras que, en presencia de las micelas de surfactante, las partículas tendrán una carga neta negativa debido a la adsorción de las mismas en su superficie, lo cual lleva un cambio en la doble capa eléctrica.

En contraste con lo anterior, la ausencia o presencia del surfactante CAPB afecta muy poco el potencial zeta del polímero porque, tal como se describió anteriormente, la interacción entre los dos es principalmente repulsiva y por consiguiente la adsorción sobre las partículas de polímero es muy poca.

Ahora me referiré a los resultados de la dilución de las muestras. No obstante, antes de proceder con el análisis, se debe aclarar que la disminución del potencial zeta durante la dilución está asociada a dos fenómenos. El primero es la neutralización de la doble capa eléctrica, lo cual ocasiona una disminución de la repulsión electrostática y un aumento de la repulsión hidrófoba que lleva a la agregación de las partículas mediante el proceso descrito en el marco teórico de este proyecto. El segundo está asociado a la disminución de la concentración de iones y contraiones en la doble capa eléctrica, lo cual es inherente al proceso de dilución porque aumenta la distancia entre los componentes presentes en la mezcla.

Respecto al surfactante CAPB, se observó que el potencial zeta se mantenía prácticamente constante. Lo anterior ocurre porque a causa de la repulsión electrostática no hay adhesión de surfactante al polímero y por lo tanto la doble capa eléctrica no se ve afectada por la dilución de los contraiones. Adicionalmente, no se observa la aparición de turbidez u otro tipo de fenómenos asociados a disminución de la solubilidad de los componentes.

En cuanto a los surfactantes LESS y LSSS se evidencia una reducción del potencial zeta al realizar las diluciones. Sin embargo, resaltan dos comportamientos que marcan la diferencia entre los dos surfactantes. El primero es la ausencia de un cambio en el potencial zeta al cambiar la concentración de PQ-10 en las mediciones con el surfactante LSSS. El segundo es la observación de un fenómeno de agregación dependiente del tiempo evidenciado en la aparición inicial de turbidez, seguido de floculación y posteriormente sedimentación.

Prosiguiendo con el análisis, el primer comportamiento indica que cambiar la concentración del polímero del nivel bajo al alto fue insignificante comparado con el efecto de cambiar la concentración del surfactante. Esto quiere decir que se está cerca del límite de concentración de LSSS para que ocurra la precipitación del coacervado, estos resultados se corroboran con las mediciones de transmitancia que se discutirán más adelante. Esto se confirma con el segundo comportamiento porque, tal y como se observa en la gráfica 1b, durante la dilución

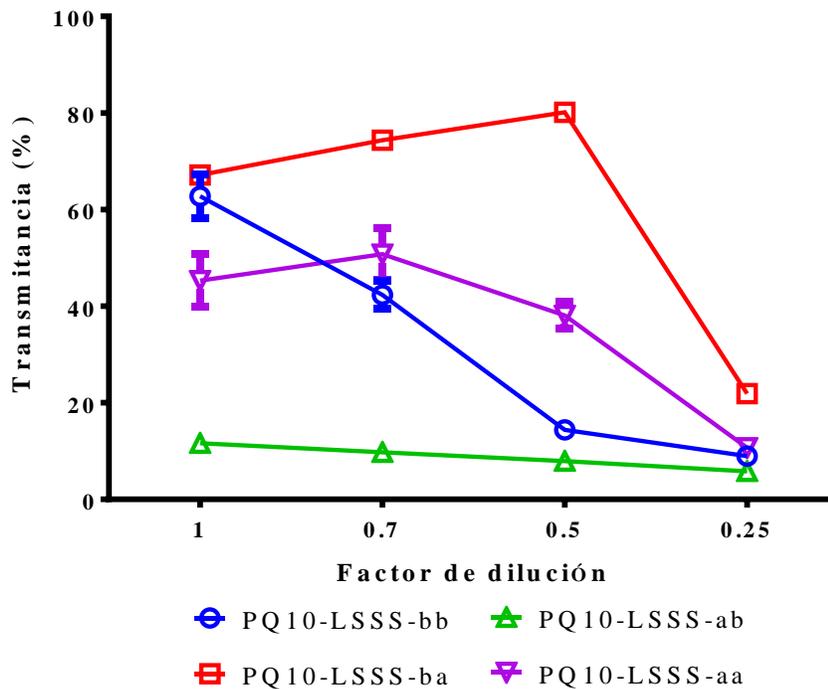
el potencial zeta del nivel alto siempre es más negativo que el potencial zeta del nivel bajo, es decir que al haber un mayor número de contraiones en el nivel alto, la repulsión electrostática es mayor y por lo tanto la agregación de las partículas es más lenta que en el nivel bajo. Adicionalmente, la disminución del potencial zeta fue más drástica para este surfactante que para el LESS. Los resultados anteriores sugieren que la disminución del potencial zeta en las muestras con LSSS ocurre porque hay una neutralización de la doble capa eléctrica y por lo tanto hay formación de coacervado entre este surfactante y el polímero, estos resultados se confirman con las mediciones de turbidez las cuales se discutirán a continuación. En contraste, los resultados para LESS sugieren que no se está dando la neutralización de la doble capa eléctrica. Sin embargo, esto no quiere decir que no exista la formación de un coacervado porque, como se discutirá más adelante, los resultados de viscosidad sugieren que sí lo hay.

6.2. Determinación de la turbidez en mezclas binarias

Al igual que en la sección anterior, los términos bb, ba, ab y aa, hacen referencia respectivamente a los niveles de polímero y surfactante descritos en el diseño experimental, el nivel indica si la concentración corresponde a la más alta (6% para los surfactantes y 0.6% para el polímero) o a la más baja (4% para los surfactantes y 0.4% para el polímero). Por ejemplo, PQ10-LESS-bb corresponde al nivel bajo (0.4%) de PQ-10 y el nivel bajo de LESS (4%). Sin embargo, en este caso el factor de dilución 1 no indica que es una solución de polímero sin surfactante, sino que es la muestra sin diluir. De igual manera, la muestra más diluida tiene un factor de dilución de 0.25 y la menos diluida de 0.7.

Ahora, justo como se observa en la gráfica 4, la transmitancia de las muestras con LSSS disminuye con la dilución, mientras que la transmitancia de las muestras con LESS y CAPB aumenta, graficas 5 y 6 respectivamente. La disminución en la transmitancia está asociada a un aumento de la turbidez de las muestras como resultado de la pérdida de solubilidad causada por la agregación de los componentes durante la dilución. Este comportamiento

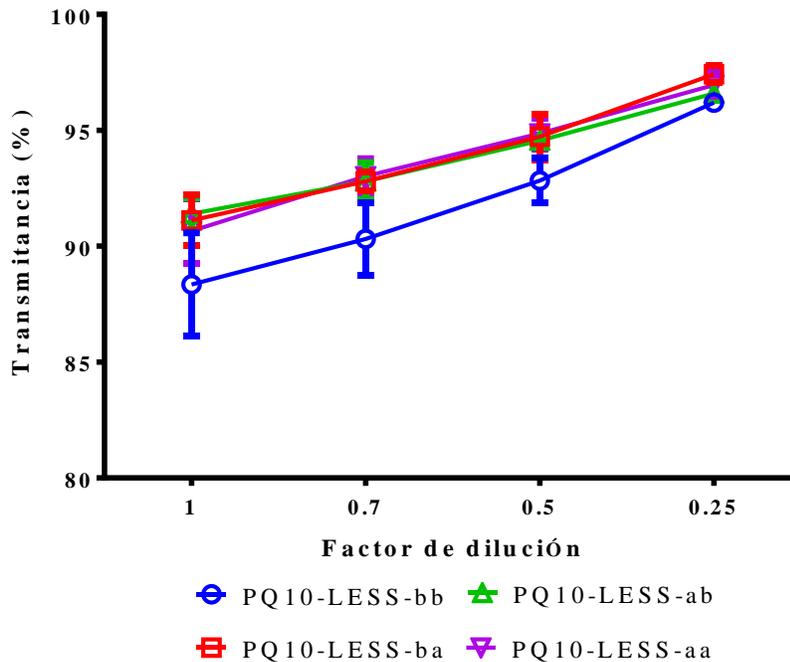
ocurre debido a la pérdida de interacciones atractivas entre el complejo y el agua como resultado de su neutralización, lo cual a su vez lleva a un aumento de la repulsión hidrófoba, tal como se describió en el marco teórico del presente proyecto. Los resultados obtenidos permiten confirmar que el surfactante LSSS forma un coacervado con el policuaternio 10 y que durante la dilución este se separa de la fase dispersante.



Gráfica 4. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/LSSS

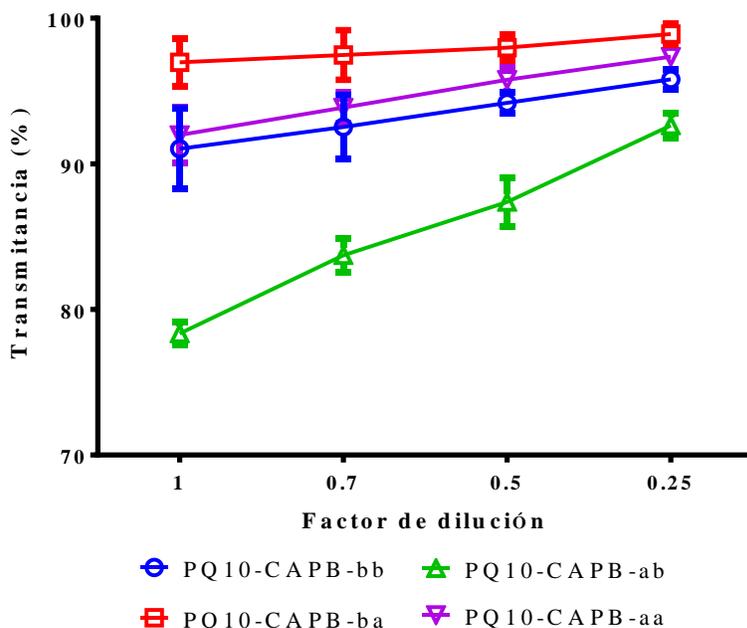
Por otro lado, mediante la transmitancia fue posible apreciar un efecto de la concentración del policuaternio 10 en las muestras con LSSS (gráfica 4), algo que no se pudo distinguir al determinar el potencial zeta. Al observar la gráfica 4 se puede apreciar que los niveles altos de polímero tienen una transmitancia más baja que los niveles bajos, esto ocurre porque hay un mayor número de partículas de polímero.

En los resultados de potencial zeta se discutió como la concentración de LESS era la limitante en el proceso de agregación de las partículas durante su dilución. Si observamos la gráfica 4, se puede evidenciar con el nivel alto de LESS que inicialmente se da un aumento de la transmitancia, pero después de cierto grado de dilución se da la disminución de la misma. Lo cual confirma lo discutido en la sección del potencial zeta.



Gráfica 5. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/LESS

En cuanto al surfactante LESS, se evidencia que no ocurre una neutralización de cargas (ver gráfica 5) porque la transmitancia aumenta al diluir sucesivamente la muestra, es decir que su turbidez disminuye como resultado de un aumento de la composición de solvente. Sin embargo, esto no es indicativo de la ausencia de interacción entre LESS y PQ-10 porque, como se discutirá más adelante, la variación en viscosidad sugiere que la hay.



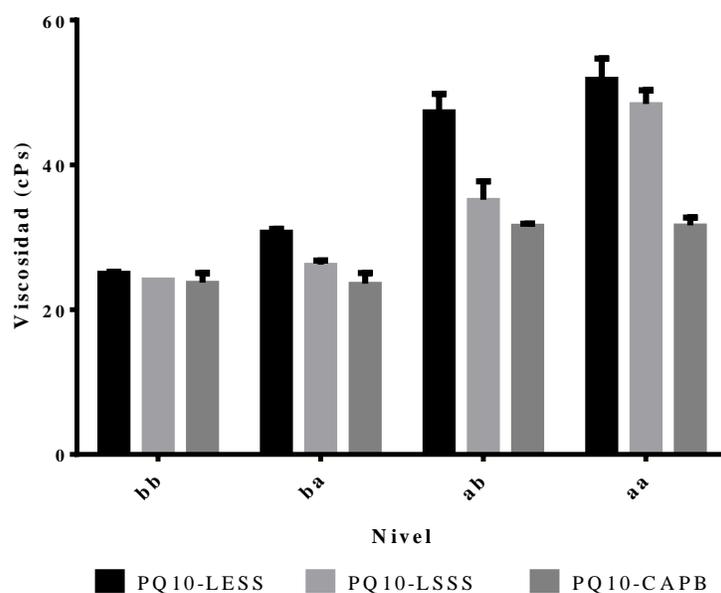
Gráfica 6. Valores de potencial zeta respecto al efecto de dilución. Mezclas PQ-10/CAPB

En cuanto al surfactante CAPB (ver gráfica 6), el aumento de la transmitancia conforme se diluía sucesivamente la muestra, es decir que su turbidez disminuye al aumentar el solvente, está acorde a los resultados observados en las mediciones de potencial zeta y corrobora que no hay formación de coacervado debido a la repulsión electrostática entre el polímero y el surfactante.

6.3. Determinación de la viscosidad en mezclas binarias

De acuerdo a los resultados de viscosidad obtenidos (ver gráfica 7), se puede observar que el surfactante CAPB presenta un comportamiento que difiere bastante de los otros surfactantes. Particularmente, su viscosidad no varía al cambiar la concentración del surfactante, mientras que en los surfactantes LESS y LSSS sí varía. Resulta interesante este resultado porque confirma que este surfactante no interacciona con el polímero de la misma forma que los otros surfactantes como resultado de la repulsión electrostática.

Por otro lado, si bien mediante potencial zeta y transmitancia se determinó que el surfactante LESS no presentaba neutralización de la doble capa eléctrica al disminuir la concentración de sus componentes. Mediante la medición de viscosidad se encuentra evidencia de la interacción atractiva entre el polímero y el surfactante porque al aumentar la concentración de surfactante aumenta la viscosidad.



Gráfica 7. Viscosidad mezclas binarias

De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta que el potencial zeta de las muestras con LESS era mucho más alto, debido a que a diferencia del LSSS, el cual fue adquirido con un 30% del componente activo, el LESS fue adquirido con un 70% de componente activo. Por esta razón, es posible que la ausencia de la neutralización de cargas se deba a que es necesario reducir aún más la concentración de LESS para observar este comportamiento. Para esto sería necesario hacer otro estudio donde se evalúen concentraciones más bajas de este surfactante.

Por el momento, este resultado no puede explicarse solo con los resultados de las tres técnicas evaluadas. Por este motivo se deben incluir otras técnicas instrumentales, como titulación calorimétrica y microscopia de fuerza atómica, que permitan obtener datos adicionales para comparar.

6.4. Análisis estadístico

Al realizar el análisis de varianza (ANOVA) se encontraron resultados diferentes para los tres surfactantes, los cuales están resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 3. Efectos de los factores en las respuestas

Repuesta	Factor	PQ10-LESS	PQ10-LSSS	PQ10-CAPB
Potencial Zeta	PQ-10 (%P/P)	Sí hay efecto	No hay efecto	Sí hay efecto
	LESS (%P/P)	Sí hay efecto	Sí hay efecto	No hay efecto
	Interacción	No hay efecto	No hay efecto	Sí hay efecto
Transmitancia	PQ-10 (%P/P)	Sí hay efecto	Sí hay efecto	Sí hay efecto
	LESS (%P/P)	Sí hay efecto	Sí hay efecto	Sí hay efecto
	Interacción	No hay efecto	Sí hay efecto	Sí hay efecto
Viscosidad	PQ-10 (%P/P)	Sí hay efecto	Sí hay efecto	Sí hay efecto
	LESS (%P/P)	Sí hay efecto	Sí hay efecto	No hay efecto
	Interacción	No hay efecto	Sí hay efecto	No hay efecto

De los resultados anteriores destacan las diferencias observadas en potencial zeta y viscosidad. Especialmente, porque validan que no hay formación de coacervado entre el polímero y el surfactante CAPB debido a que el potencial zeta y la viscosidad solo fueron afectados estadísticamente por la concentración de polímero. Adicionalmente, también valida que la concentración de LSSS afecta drásticamente el potencial zeta porque el efecto del polímero es estadísticamente insignificante. Estos resultados corroboran las

observaciones y discusión realizadas durante este proyecto respecto a los resultados obtenidos mediante potencial zeta, turbidez y viscosidad.

Por otro lado, los resultados observados también permiten aproximar una posible combinación de factores para obtener una estabilidad cinética duradera, una mayor deposición de coacervado y un mayor beneficio a un menor costo. Específicamente, una combinación de un nivel alto de LESS, un nivel bajo de LSSS, un nivel bajo de CAPB y un nivel bajo de PQ-10. No obstante, para confirmar esta combinación es necesario realizar un diseño experimental adicional donde se evalúen mezclas de los cuatro componentes en una misma solución, con el objetivo de evaluar las interacciones que puedan existir entre los surfactantes.

Con base en los resultados obtenidos en el presente proyecto, se puede concluir que el surfactante que presentó formación de coacervado fue el lauril sarcosinato de sodio. Adicionalmente, se concluye que el surfactante CAPB no presenta formación de coacervado. También se concluye que la concentración de LSSS surfactante tiene un rol crucial en la formación del coacervado.

Adicionalmente, se sugiere que una formulación de champú que haga uso de los tres surfactantes y el polímero acondicionador evaluados en este proyecto, emplee una concentración de 4% de LSSS y 0.4% de policuaturnio-10 porque a estas concentraciones la agregación de partículas durante la dilución es mayor y al usar la concentración más baja de PQ-10 el costo de la fórmula será menor. Lo anterior permitirá que la deposición del polímero sobre las fibras capilares sea mayor.

La presente investigación logra evaluar la interacción electrostática del policuaturnio 10 con los tres surfactantes iónicos: LESS, LSSS y CAPB, en las concentraciones establecidas en la tabla 2. Adicionalmente, aporta una aplicación del diseño de experimentos y técnicas de análisis instrumental en el diseño y formulación de champús. También brinda una

aproximación sobre una posible relación costo-beneficio en la concentración de los factores evaluados. Por lo tanto, se espera que la información provista en este trabajo contribuya a futuras investigaciones sobre la evaluación de la formación del coacervado entre las materias primas usadas y otras materias primas de naturaleza química similar. También se espera que la información provista en este trabajo contribuya a la implementación del diseño de experimentos mediante técnicas de análisis instrumental en el diseño y formulación de champús en la industria nacional.

7. CONCLUSIONES

- Mediante potencial zeta se determinó que las interacciones electrostáticas entre el lauril sarcosinato de sodio y el policuaternio 10 permiten la formación del coacervado, fenómeno que se presenta como una disminución drástica del potencial.
- Mediante turbidimetría se determinó que las interacciones electrostáticas entre el lauril sarcosinato de sodio y el policuaternio 10 permiten la formación del coacervado, fenómeno que se evidencia con un aumento progresivo de la turbidez con diluciones sucesivas.
- Mediante viscosimetría y potencial zeta se determinó que las interacciones electrostáticas entre la cocoamidopropil betaína y el policuaternio 10 son principalmente repulsivas y no permiten la formación del coacervado.
- La concentración óptima de surfactante y agente acondicionador que permiten una mayor agregación de partículas son 4% y 0.4% respectivamente.

8. RECOMENDACIONES

- Se deben realizar más estudios donde se evalúe simultáneamente la concentración de los surfactantes y el polímero en una misma solución con el fin de determinar el efecto de la interacción entre los surfactantes.
- Se deben evaluar concentraciones más bajas de LESS con el fin de corroborar si este surfactante forma coacervado con el policuaternio 10.
- Se debe evaluar una técnica analítica adicional con el fin de elucidar mejor las diferencias entre la interacción del LESS/PQ-10 y LSSS/PQ-10.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Langevin D. Complexation of oppositely charged polyelectrolytes and surfactants in aqueous solutions. A review. *Adv Colloid Interface Sci* [Internet]. 2009 Mar;147–148(C):170–7. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868608001437>
2. Somasundaran P, Chakraborty S, Qiang Q, Deo P, Wang J, Zhang R. Surfactants, polymers and their nanoparticles for personal care applications. *J Cosmet Sci* [Internet]. 2004 Apr;55 Suppl(2):S1-17. Available from: http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-2494.2005.00257_2.x
3. Burgess D. Practical analysis of complex coacervate systems. *J Colloid Interface Sci* [Internet]. 1990 Nov;140(1):227–38. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0021979790903380>
4. Miyake M, Kakizawa Y. Morphological study of cationic polymer-anionic surfactant complex precipitated in solution during the dilution process. *Int J Cosmet Sci* [Internet]. 2010 Dec;32(6):473–473. Available from: http://doi.wiley.com/10.1111/j.1468-2494.2010.00620_3.x
5. Bungenberg de Jong HG. *Colloid Science*. Kruyt HR, editor. Vol. 2. London: Elsevier; 1949. 722 p.
6. Kamath YK, Dansizer CJ, Weigmann H-D. Surface wettability of human hair. II. Effect of temperature on the deposition of polymers and surfactants. *J Appl Polym Sci* [Internet]. 1985 Mar;30(3):925–36. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.1985.070300304>
7. Andre V, Norenberg R, Hossel P, Pfau A. The role of polymer-surfactant interactions in the adsorption process of hair-conditioning polymers. *Macromol Symp* [Internet]. 1999;145:169–79. Available from: http://bibliocheveu/connaissances/cheveu/bibliocheveu/Surfaces/1430_Andre V_1999.pdf
8. Lochhead RY, Huisinga LR. A brief review of polymer/surfactant interaction. *Cosmet*

- Toilet. 2004;119(2):37–38,40.
9. Hössel P, Dieing R, Nörenberg R, Pfau A, Sander R. Conditioning polymers in today's shampoo formulations - efficacy, mechanism and test methods. *Int J Cosmet Sci* [Internet]. 2000 Feb;22(1):1–10. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1046/j.1467-2494.2000.00003.x>
 10. Clauzel M, Johnson ES, Nylander T, Panandiker RK, Sivik MR, Piculell L. Surface Deposition and Phase Behavior of Oppositely Charged Polyion-Surfactant Ion Complexes. Delivery of Silicone Oil Emulsions to Hydrophobic and Hydrophilic Surfaces. *ACS Appl Mater Interfaces* [Internet]. 2011 Jul 27;3(7):2451–62. Available from: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/am200350z>
 11. Rosen MJ, Kunjappu JT. *Surfactants and Interfacial Phenomena* [Internet]. *Surfactants and Interfacial Phenomena: Fourth Edition*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2012. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118228920>
 12. Voets IK, de Keizer A, Cohen Stuart MA. Complex coacervate core micelles. *Adv Colloid Interface Sci* [Internet]. 2009 Mar;147–148(C):300–18. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868608001772>
 13. Myers D. *Surfactant Science and Technology* [Internet]. Third Edit. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2005. 400 p. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/047174607X>
 14. Pfau A, Hössel P, Vogt S, Sander R, Schrepp W. The interaction of cationic polymers with human hair. *Macromol Symp* [Internet]. 1998 Jan;126(1):241–52. Available from: http://bibliocheveu/connaissances/cheveu/bibliocheveu/Surfaces/1436_Fpau A_1998.pdf%5Cnhttp://doi.wiley.com/10.1002/masy.19981260120
 15. Lepilleur C, Giovannitti-Jensen A, Kyer C. Use of statistical modeling to predict the effect of formulation composition on conditioning shampoo performance. *J Cosmet Sci* [Internet]. 2013;64(6):411–27. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24397880>
 16. Yapar S, Özdemir G, Solarte AMF, Sánchez RMT. Surface and interface properties of lauroyl sarcosinate-adsorbed CP+-montmorillonite. *Clays Clay Miner.*

- 2015;63(2):110–8.
17. Domingo X. Betaines. In: Lomax EG, editor. Amphoteric surfactants. 2nd ed. New York: M. Dekker; 1996. p. 76–174.
 18. Krämer C, Schauerte M, Kowald T, Trettin R. CNT-stabilized foam concrete on the basis of ultrahigh performance concrete (UHPC). 2015.
 19. Ldson B. Polymers as Conditioning Agents for Hair and Skin. In: Schueller R, Romanowski P, editors. Conditioning agents for hair and skin [Internet]. New York: Marcel Dekker; 1999. p. 251–79. Available from: http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=f_ETtcJM_0gC&pgis=1
 20. Desmond Goddard E. Polymer/ Surfactant Interaction. In: Principles of Polymer Science and Technology in Cosmetics and Personal Care [Internet]. New York: CRC Press; 1999. (Cosmetic Science and Technology). Available from: <https://doi.org/10.1201/9780203907948.ch4>
 21. Desmond Goddard E. Polymer/ Surfactant Interaction in Applied Systems. In: Principles of Polymer Science and Technology in Cosmetics and Personal Care [Internet]. New York: CRC Press; 1999. (Cosmetic Science and Technology). Available from: <https://doi.org/10.1201/9780203907948.ch5>
 22. Bain CD, Claesson PM, Langevin D, Meszaros R, Nylander T, Stubenrauch C, et al. Complexes of surfactants with oppositely charged polymers at surfaces and in bulk. *Adv Colloid Interface Sci* [Internet]. 2010 Mar 25;155(1–2):32–49. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868610000187>
 23. Goddard E., Hannan R. Cationic polymer/anionic surfactant interactions. *J Colloid Interface Sci* [Internet]. 1976 Apr;55(1):73–9. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0021979776900102>
 24. Nylander T, Samoshina Y, Lindman B. Formation of polyelectrolyte–surfactant complexes on surfaces. *Adv Colloid Interface Sci* [Internet]. 2006 Nov;123–126(SPEC. ISS.):105–23. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868606001023>
 25. Wilgus LA, Davis K, Labeaud L, Gandolfi L, Lochhead RY. A study of the

- distribution of polymer/surfactant coacervate between solution and foam in archetypal shampoo systems. *J Cosmet Sci.* 2011;62(April):179–89.
26. Hansson P, Lindman B. Surfactant-polymer interactions. *Curr Opin Colloid Interface Sci* [Internet]. 1996 Oct;1(5):604–13. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359029496800987>
 27. Goddard ED. Polymer-surfactant interaction part II. Polymer and surfactant of opposite charge. *Colloids and Surfaces.* 1986;19(2–3):301–29.
 28. Piculell L, Norrman J, Svensson A V., Lynch I, Bernardes JS, Loh W. Ionic surfactants with polymeric counterions. *Adv Colloid Interface Sci* [Internet]. 2009;147–148(C):228–36. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.009>
 29. Nagarajan R. *Polymer – Surfactant Interactions.* American Oil Chemists Society and Consumer Specialty Products Association; 2001.
 30. Malvern Instruments Ltd, Instruments M. *Dynamic Light Scattering: An Introduction in 30 Minutes.* <Http://WwwMalvernCom/En/Products/Technology/Dynamic-Light-Scattering/> [Internet]. 2000;1–8. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Dynamic+Light+Scattering+:+An+Introduction+in+30+Minutes#3>
 31. Shaw DJ. *Introduction to Colloid and Surface Chemistry.* 4th Ed. Oxford: Butterworth Heinemann Ltd; 1992. 315 p.
 32. Li LC. Zeta Potential. *Encycl Pharm Technol.* 2007;4117–28.
 33. Instruments M. Zeta potential: An Introduction in 30 minutes. *Zetasizer Nano Serles Tech Note MRK654-01* [Internet]. 2011;2:1–6. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Zeta+Potential+An+Introduction+in+30+Minutes#0>
 34. WARD'S Science. *Beer-Lambert Law : Measuring Percent Transmittance of Solutions at Different Concentrations.* Ward Sci. 2012;
 35. Goddard ED. Polymer-surfactant interaction Part I. uncharged water-soluble polymers and charged surfactants. *Colloids and Surfaces.* 1986;19(2–3):255–300.
 36. Aoudia M, Al-Haddabi B, Al-Harhi Z, Al-Rubkhi A. Sodium lauryl ether sulfate

micellization and water solubility enhancement towards naphthalene and pyrene: Effect of the degree of ethoxylation. *J Surfactants Deterg.* 2010;13(1):103–11.

37. Pontryagina Anastasia, Miller Reinhard, Pletnev Mikhail. Surface Active and Foam Properties of Sodium Lauroyl Sarcosinate, Mild Anionic Surfactant of Natural Origin. (PDF Download Available). 2015;(December):2015. Available from: https://www.researchgate.net/publication/286455000_Surface_Active_and_Foam_Properties_of_Sodium_Lauroyl_Sarcosinate_Mild_Anionic_Surfactant_of_Natural_Origin

10. ANEXOS

10.1. Anexo 1 – Datos obtenidos

10.1.1. Determinación del potencial zeta en mezclas binarias

Tabla 4. Potencial zeta mezclas PQ-10/LESS

PQ-10 (%P/P)	LESS (%P/P)	Replica	Solución 70%		Solución 50%		Solución 25%	
			\bar{X} (mV)	SD (mV)	\bar{X} (mV)	SD (mV)	\bar{X} (mV)	SD (mV)
0,4	4	1	-33,27	4,60	-30,90	1,06	-33,87	0,84
		2	-33,60	2,72	-21,67	2,18	-30,23	1,15
		3	-32,27	5,48	-27,47	6,87	-26,47	4,53
0,4	6	1	-46,40	3,24	-48,97	5,67	-36,97	3,62
		2	-42,77	6,63	-40,97	2,81	-30,67	1,14
		3	-43,43	8,68	-40,47	10,44	-34,10	0,96
0,6	4	1	-43,83	4,49	-37,77	3,37	-30,07	2,28
		2	-44,97	5,24	-29,27	1,17	-27,40	3,62
		3	-38,10	3,58	-30,27	4,08	-32,17	1,20
0,6	6	1	-51,47	5,56	-27,03	1,14	-37,37	0,91
		2	-51,22	6,13	-38,67	3,51	-38,57	5,50
		3	-41,89	8,32	-43,87	8,24	-40,97	3,49

Tabla 5. Potencial zeta mezclas PQ-10/LSSS

PQ-10 (%P/P)	LSSS (%P/P)	Replica	Solución 70%		Solución 50%		Solución 25%	
			\bar{X} (mV)	SD (mV)	\bar{X} (mV)	SD (mV)	\bar{X} (mV)	SD (mV)
0,4	4	1	-25,93	2,15	-15,63	5,58	-9,91	0,38
		2	-24,07	2,45	-19,30	2,21	-8,01	0,17
		3	-24,93	1,99	-20,40	2,65	-8,64	0,31
0,4	6	1	-33,03	7,40	-27,97	3,20	-14,57	1,26
		2	-40,07	8,41	-29,70	2,61	-15,93	1,28
		3	-37,83	9,99	-30,47	2,12	-17,17	0,97
0,6	4	1	-27,40	3,06	-8,45	4,44	-8,20	0,32
		2	-16,11	8,14	-21,27	5,04	-3,30	0,32
		3	-25,47	2,99	-23,67	2,22	-7,60	0,48

0,6	6	1	-35,77	7,31	-31,57	3,75	-12,67	0,52
		2	-41,57	8,50	-33,13	3,90	-16,37	1,39
		3	-37,60	4,94	-32,27	4,50	-16,67	10,25

Tabla 6. Potencial zeta mezclas PQ-10/CAPB

PQ-10 (%P/P)	CAPB (%P/P)	Replica	Solución 70%		Solución 50%		Solución 25%	
			\bar{X} (mV)	SD (mV)	\bar{X} (mV)	SD (mV)	\bar{X} (mV)	\bar{X} (mV)
0,4	4	1	14,27	1,31	16,13	2,21	13,17	0,31
		2	18,13	1,78	17,50	0,90	12,97	0,67
		3	18,30	2,36	15,00	1,61	13,30	0,46
0,4	6	1	13,47	0,76	12,67	0,70	14,37	1,60
		2	15,80	1,35	15,93	2,67	10,90	0,72
		3	15,87	2,51	17,47	1,91	13,23	0,92
0,6	4	1	8,18	0,49	5,90	1,29	8,70	1,30
		2	6,99	0,85	8,35	0,84	5,60	0,55
		3	6,46	0,57	7,56	0,21	7,27	0,95
0,6	6	1	8,40	0,78	13,13	2,65	7,06	0,76
		2	10,06	1,69	7,29	0,98	8,79	1,56
		3	12,93	1,01	7,09	1,09	10,65	0,73

10.1.2. Determinación de la turbidez en mezclas binarias

Tabla 7. Transmitancia mezclas PQ-10/LESS

PQ-10 (%P/P)	LESS (%P/P)	Replica	Solución 100%		Solución 70%		Solución 50%		Solución 25%	
			\bar{X} (%)	SD (%)	\bar{X} (%)	SD (%)	\bar{X} (%)	SD (%)	\bar{X} (%)	SD (%)
0,4	4	1	85,769	0,199	88,586	0,061	91,731	0,124	95,880	0,155
		2	89,497	0,061	90,680	0,114	93,535	0,140	96,510	0,080
		3	89,766	0,012	91,675	0,048	93,227	0,004	96,197	0,227
0,4	6	1	89,927	0,089	92,416	0,047	93,597	0,134	97,028	0,124
		2	91,314	0,185	93,228	0,008	95,412	0,003	97,492	0,092
		3	92,090	0,036	92,751	0,103	95,169	0,020	97,745	0,019
0,6	4	1	90,647	0,164	92,379	0,058	94,448	0,212	96,934	0,044
		2	91,929	0,101	93,729	0,108	94,887	0,025	96,552	0,005
		3	91,617	0,060	92,287	0,047	94,320	0,123	96,278	0,009
0,6	6	1	89,069	0,013	92,186	0,018	94,103	0,002	97,151	0,041

		2	91,217	0,012	93,692	0,006	95,269	0,001	96,274	0,004
		3	91,690	0,027	93,180	0,006	95,214	0,021	97,440	0,034

Tabla 8. Transmitancia mezclas PQ-10/LSSS

PQ-10 (%P/P)	LSSS (%P/P)	Replica	Solución 100%		Solución 70%		Solución 50%		Solución 25%	
			\bar{X} (%)	SD (%)	\bar{X} (%)	SD (%)	\bar{X} (%)	SD (%)	\bar{X} (%)	SD (%)
0,4	4	1	58,166	0,115	39,235	1,137	13,813	0,725	9,163	0,084
		2	67,207	0,034	42,707	0,254	15,486	0,356	8,949	0,358
		3	62,881	0,096	45,083	0,738	13,903	0,297	8,786	1,582
0,4	6	1	67,380	0,002	74,091	0,029	80,506	0,022	22,818	0,272
		2	65,931	0,063	74,018	0,004	79,865	0,004	21,360	0,296
		3	68,174	0,011	74,997	0,046	80,059	0,030	21,467	0,355
0,6	4	1	10,857	0,012	9,801	0,052	9,166	0,084	6,964	0,147
		2	13,663	0,092	9,546	0,032	7,100	0,084	4,527	0,063
		3	10,326	0,061	9,892	0,030	7,531	0,030	5,923	0,242
0,6	6	1	51,471	0,036	56,029	0,167	40,544	0,481	10,469	0,043
		2	43,213	0,048	45,248	0,192	34,994	0,353	10,659	0,134
		3	41,109	0,003	51,044	0,093	38,733	0,284	10,897	0,109

Tabla 9. Transmitancia mezclas PQ-10/CAPB

PQ-10 (%P/P)	CAPB (%P/P)	Replica	Solución 100%		Solución 70%		Solución 50%		Solución 25%	
			\bar{X} (%)	SD (%)	\bar{X} (%)	SD (%)	\bar{X} (%)	SD (%)	\bar{X} (%)	SD (%)
0,4	4	1	88,482	0,017	90,378	0,106	93,490	0,030	95,416	0,036
		2	93,972	0,005	94,798	0,078	94,910	0,023	96,582	0,012
		3	90,663	0,028	92,426	0,020	94,180	0,056	95,415	0,038
0,4	6	1	95,047	0,005	95,599	0,032	96,966	0,039	98,092	0,004
		2	98,056	0,016	98,942	0,027	98,528	0,070	99,257	0,049
		3	97,792	0,009	97,902	0,067	98,437	0,012	99,396	0,034
0,6	4	1	79,067	0,092	85,083	0,008	89,134	0,005	93,585	0,045
		2	78,438	0,020	82,846	0,010	85,780	0,109	92,344	0,106
		3	77,521	0,010	83,244	0,041	87,202	0,020	91,988	0,009
0,6	6	1	89,872	0,060	92,670	0,026	94,821	0,077	96,793	0,015
		2	92,498	0,024	94,158	0,007	95,971	0,013	97,699	0,033
		3	93,589	0,007	94,748	0,019	96,545	0,074	97,562	0,047

10.1.3. Determinación de viscosidad en mezclas binarias

Tabla 10. Viscosidad mezclas PQ-10/LESS

PQ-10 (%P/P)	LESS (%P/P)	Replica	\bar{X} (cPs)	SD (cPs)
0,4	4	1	25,0	0,00
		2	25,2	0,00
		3	25,2	0,00
0,4	6	1	30,9	0,06
		2	30,4	0,06
		3	31,1	0,12
0,6	4	1	45,6	0,12
		2	50,1	0,12
		3	46,6	0,12
0,6	6	1	54,6	0,12
		2	52,1	0,06
		3	49,1	0,00

Tabla 11. Viscosidad mezclas PQ-10/LSSS

PQ-10 (%P/P)	LSSS (%P/P)	Replica	\bar{X} (cPs)	SD (cPs)
0,4	4	1	24,2	0,00
		2	24,2	0,06
		3	24,2	0,06
0,4	6	1	26,5	0,00
		2	25,6	0,00
		3	26,6	0,12
0,6	4	1	35,6	0,12
		2	37,5	0,06
		3	32,5	0,00
0,6	6	1	47,6	0,10
		2	50,6	0,12
		3	47,1	0,06

Tabla 12. Viscosidad mezclas PQ-10/CAPB

PQ-10 (%P/P)	CAPB (%P/P)	Replica	\bar{X} (cPs)	SD (cPs)
0,4	4	1	25,2	0,00

		2	23,4	0,00
		3	22,6	0,06
0,4	6	1	25,1	0,06
		2	23,5	0,00
		3	22,2	0,06
0,6	4	1	31,9	0,06
		2	31,6	0,12
		3	31,4	0,00
0,6	6	1	31,9	0,06
		2	30,5	0,00
		3	32,6	0,06

10.1.4. Análisis estadístico

Tabla 13. Análisis de varianza de potencial zeta mezclas PQ-10/LESS

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
PQ-10 (%P/P)	1	131,63	131,63	11,06	0,010
LESS (%P/P)	1	217,97	217,97	18,31	0,003
Interacción	1	20,78	20,78	1,75	0,223
Error	8	95,22	11,90		
Total	11	465,59			

Tabla 14. Análisis de varianza de potencial zeta mezclas PQ-10/LSSS

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
PQ-10 (%P/P)	1	0,320	0,320	0,02	0,887
LSSS (%P/P)	1	559,787	559,787	37,91	0,000
Interacción	1	8,267	8,267	0,56	0,476
Error	8	118,118	14,765		
Total	11	686,492			

Tabla 15. Análisis de varianza potencial zeta mezclas PQ-10/CAPB

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
--------	----	-----------	-----------	---------	---------

PQ-10 (%P/P)	1	152,772	152,772	46,60	0,000
CAPB (%P/P)	1	1,468	1,468	0,45	0,522
Interacción	1	19,584	19,584	5,97	0,040
Error	8	26,224	3,278		
Total	11	200,048			

Tabla 16. Análisis de varianza de transmitancia mezclas PQ-10/LESS

Fuente	GL	SC Ajust.	MC just.	Valor F	Valor p
PQ-10 (%P/P)	1	5,491	5,4914	5,64	0,045
LESS (%P/P)	1	5,490	5,4896	5,64	0,045
PQ-10 (%P/P)*LESS (%P/P)	1	3,842	3,8416	3,95	0,082
Error	8	7,784	0,9729		
Total	11	22,606			

Tabla 17. Análisis de varianza transmitancia mezclas PQ-10/LSSS

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
PQ-10 (%P/P)	1	4000,4	4000,40	291,18	0,000
LSSS (%P/P)	1	1086,4	1086,38	79,07	0,000
PQ-10(%P/P)*LSSS(%P/P)	1	641,2	641,17	46,67	0,000
Error	8	109,9	13,74		
Total	11	5837,9			

Tabla 18. Análisis de varianza transmitancia mezclas PQ-10/CAPB

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust	Valor F	Valor p
PQ-10 (%P/P)	1	115,92	115,916	44,62	0,000
CAPB (%P/P)	1	170,58	170,585	65,67	0,000
PQ-10 (%P/P)*CAPB (%P/P)	1	20,18	20,181	7,77	0,024
Error	8	20,78	2,598		

Total	11	327,46			
-------	----	--------	--	--	--

Tabla 19. Análisis de varianza de viscosidad mezclas PQ-10/LESS

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
PQ-10 (%P/P)	1	1413,39	1413,39	424,38	0,000
LESS (%P/P)	1	77,86	77,86	23,38	0,001
PQ-10 (%P/P)*LESS (%P/P)	1	1,02	1,02	0,31	0,595
Error	8	26,64	3,33		
Total	11	1518,92			

Tabla 20. Análisis de varianza viscosidad mezclas PQ-10/LSSS

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
PQ-10 (%P/P)	1	827,23	827,233	320,24	0,000
LSSS (%P/P)	1	174,55	174,549	67,57	0,000
PQ-10 (%P/P)*LSSS (%P/P)	1	92,78	92,778	35,92	0,000
Error	8	20,67	2,583		
Total	11	1115,23			

Tabla 21. Análisis de varianza viscosidad mezclas PQ-10/CAPB

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
PQ-10 (%P/P)	1	191,467	191,467	149,65	0,000
CAPB (%P/P)	1	0,006	0,006	0,00	0,947
PQ-10 (%P/P)*CAPB (%P/P)	1	0,009	0,009	0,01	0,934
Error	8	10,236	1,279		
Total	11	201,718			