

Impact of Dispersed Phase Salinity of W/O Emulsions on the Electrostatic Dehydration Process of Crude Oil

María Rodríguez^{1,2}, Armando Martínez², José Sorrentino²

¹Universidad Metropolitana. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

²Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Abstract- The impact of salinity in a W/O emulsion on electrostatic dehydration is the interest of the present study. According to Stokes' law, the net force of gravity acting on a droplet is directly proportional to the difference in densities between the droplet (water) and the continuous phase (crude). Conductivity is a measure of the flow of electricity in water, so the more dissolved ions there are, the higher the conductivity. Based on this, the quantitative study with experimental design 2³ with a 99% confidence interval of the effect on the electrostatic dehydration process of W/O emulsions of Merey 16 crude oil is proposed, applying a continuous treatment of DC electric field where the factors are considered: salt concentration, percentage of water and applied voltage. Based on the cumulative distribution of droplets, the Destabilization Factor (FD) was calculated, which represents the change in the fraction of droplets greater than a certain value. Two factors interact, the highest being the salt-voltage content, followed by the interaction between the percentage of water-voltage; The main effect is the salt content, where for percentages of water 10% when applied under voltage, causes an increase in the size of droplets; for 20% water the FD is favored at low salt and high voltage, and is disfavored at high voltage and high salt content.

Keywords: W/O emulsion, salinity, dehydration, conductivity, voltage.

Impacto de la salinidad de la fase dispersa de emulsiones W/O en el proceso de deshidratación electrostática de crudo

Impact of Dispersed Phase Salinity of W/O Emulsions on the Electrostatic Dehydration Process of Crude Oil

María Rodríguez^{1,2}, Armando Martínez², José Sorrentino²

¹Universidad Metropolitana. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

²Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Resumen- El impacto de la salinidad en una emulsión W/O en la deshidratación electrostática es el interés del presente estudio. De acuerdo a la ley de Stokes la fuerza neta de gravedad que actúa en una gota es directamente proporcional a la diferencia en densidades entre la gota (agua) y la fase continua (crudo). La conductividad es una medida del flujo de electricidad en el agua, por lo que cuando hay más cantidad de iones disueltos, mayor es su conductividad. En función a esto, se plantea el estudio cuantitativo con diseño experimental ²³ con un intervalo de confianza de 99%, del efecto en el proceso de deshidratación electrostática de emulsiones W/O del crudo Merey 16, aplicando un tratamiento en continuo de campo eléctrico DC donde se consideran los factores: concentración de sal, porcentaje de agua y voltaje aplicado. Partiendo de la distribución acumulada de gotas se calculó el Factor de Desestabilización (FD), el cual representa el cambio en fracción de gotas mayores a un cierto valor. Se observa interacción de dos factores siendo la mayor la del contenido de sal-voltaje, seguido de la interacción entre el porcentaje de agua-voltaje; como efecto principal se identifica el contenido de sal, donde para porcentajes de agua 10% al aplicar bajo voltaje, origina un incremento del tamaño de gotas; para 20% de agua el FD se favorece a bajo contenido de sal y alto voltaje, y se desfavorece a alto voltaje y alto contenido de sal.

Palabras clave: emulsión W/O, salinidad, deshidratación, conductividad, voltaje.

Abstract- The impact of salinity in a W/O emulsion on electrostatic dehydration is the interest of the present study. According to Stokes' law, the net force of gravity acting on a droplet is directly proportional to the difference in densities between the droplet (water) and the continuous phase (crude). Conductivity is a measure of the flow of electricity in water, so the more dissolved ions there are, the higher the conductivity. Based on this, the quantitative study with experimental design ²³ with a 99% confidence interval of the effect on the electrostatic dehydration process of W/O emulsions of Merey 16 crude oil is proposed, applying a continuous treatment of DC electric field where the factors are considered: salt concentration, percentage of water and applied voltage. Based on the cumulative distribution of droplets,

the Destabilization Factor (FD) was calculated, which represents the change in the fraction of droplets greater than a certain value. Two factors interact, the highest being the salt-voltage content, followed by the interaction between the percentage of water-voltage; The main effect is the salt content, where for percentages of water 10% when applied under voltage, causes an increase in the size of droplets; for 20% water the FD is favored at low salt and high voltage, and is disfavored at high voltage and high salt content.

Keywords: W/O emulsion, salinity, dehydration, conductivity, voltage.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de extracción de crudo desde los pozos productores, se encuentran una serie de elementos para su correcto transporte y tratamiento hasta el destino final. Desde el inicio del proceso el crudo puede contener agua en suspensión o emulsionada, sales, sólidos y otras impurezas inorgánicas que deben ser eliminadas de acuerdo a las especificaciones de venta para posterior refinación.

El eslabón inicial corresponde a la red de recolección de todos los fluidos lo cual se realiza a través de una serie de poliductos hasta una estación principal de recolección, el objetivo fundamental de esta estación es recibir la producción de los diferentes pozos y realizar la separación primaria de los fluidos en sus componentes básicos: gas y líquido (crudo y agua).

Realizada la separación de la fase gaseosa, la preocupación es la reducción del contenido de agua y sedimentos. Es sabido que la presencia de impurezas ocasiona problemas durante el proceso de transporte, tratamiento y refinación del crudo. Limitan la capacidad de las tuberías en el transporte; las altas temperaturas en el proceso de refinación pueden causar la hidrólisis del agua, lo que, a su vez, debido a la presencia de sales, permite la formación de ácido clorhídrico, lo que implica serios problemas de corrosión en los equipos de este proceso. Causan problemas de incrustaciones (*fouling*) en tuberías e intercambiadores de

calor. Los metales provenientes de las sales, causan desactivación de los catalizadores o disminución de la actividad catalítica en los procesos reactivos [1].

Existen tres requisitos esenciales para formar una emulsión [2]: dos líquidos inmiscibles, suficiente agitación para dispersar uno de los líquidos en pequeñas gotas en el otro, y un agente emulsionante para estabilizar las gotas dispersas en la fase continua.

La eliminación del agua y sales contenidas en las corrientes de crudo emulsionado se logra a través de los procesos de deshidratación y desalación, los cuales operan bajo el mismo principio, romper la emulsión del agua en crudo mediante la aplicación de la Ley de Stokes. La deshidratación, consiste en separar o extraer el agua del crudo mediante diversos métodos que promueven la ruptura de la emulsión agua en crudo (W/O); en cambio, el proceso de desalación, que se realiza después de la deshidratación, adiciona agua al crudo para promover la disolución de las sales suspendidas, originándose una nueva emulsión, lo que conlleva a la aplicación de métodos de deshidratación para separar la fase inorgánica de la orgánica como métodos térmicos, químicos, mecánicos, eléctricos o combinación de ellos [2].

El Centro Operativo Morichal (COMOR) se encuentra ubicado en el Campo Morichal al Sur-Oeste de la ciudad de Maturín, del estado Monagas. Cuenta con dos plantas con tres trenes de deshidratación/desalación; en ellas se realiza el proceso de deshidratación/desalación de la producción que viene del área de crudo extrapesado del Distrito Morichal perteneciente a la División Carabobo de PDVSA. El crudo característico de entrada a la planta tiene una gravedad de 16°API, un corte de agua que oscila entre 12-20% y una concentración de sales entre 15.000-25.000 ppm NaCl.

El incremento de corte de agua de los campos asociados a COMOR se ha acelerado como producto de prácticas operacionales y condiciones de yacimiento. En la Figura 1.a se presenta el porcentaje de agua de la corriente de entrada del crudo a esta planta, desde enero 2015 hasta diciembre 2017, observándose un incremento desde 8% hasta 18%, lo que afecta la calidad del producto y genera un incremento de la dependencia de inyección de química demulsificante. En cuanto a la salinidad asociada, se observa en la Figura 1.b, que el incremento del corte de agua trae como consecuencia su disminución.

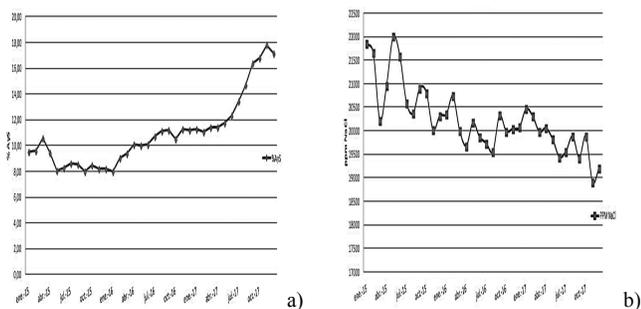


Figura 1. Corriente de entrada a la planta COMOR. a) Porcentaje de agua y sedimentos. b) Salinidad en ppm NaCl.

Este incremento en el corte de agua (Figura 1.a) afecta directamente las principales variables que determinan la capacidad de un equipo deshidratador originando una disminución de su capacidad conforme incrementa el corte de agua.

El tiempo de residencia en el equipo está determinado en parte por su capacidad, por tal motivo conforme se incrementa el caudal de agua, la capacidad de manejo de crudo seco del equipo disminuye ya que el tiempo de sedimentación será mayor al tiempo de residencia dentro del recipiente, lo que ocasiona un arrastre no deseado de la corriente de crudo en agua o un corte de agua en el crudo de salida mayor al requerido.

Revisando la ecuación de la Ley de Stokes empleada para determinar la velocidad de sedimentación de la gota de agua en crudo dentro de un equipo deshidratador, se observa que el principal factor que contribuye a su aumento es el diámetro de la gota de agua (1); otro factor que permite el incremento de esta velocidad es aumentar la diferencia de densidades entre las fases presentes, por eso es importante incrementar el tamaño de las gotas de agua para que sedimenten y faciliten la separación de fases.

$$V = \frac{2(\rho_p - \rho_f)gr^2}{9\eta} \quad (1)$$

Donde, V es la velocidad de sedimentación de la gota de agua, r es el radio de la gota de agua, ρ_p es la densidad de la fase dispersa (agua), ρ_f es la densidad del crudo y η es la viscosidad del crudo [3].

Un aumento en la velocidad de sedimentación de las gotas de agua, impacta y disminuye el tiempo necesario para su floculación/coalescencia, y por ende el tiempo de residencia del crudo deshidratado, lo que se traduce en un posible incremento en la capacidad del equipo deshidratador.

La concentración de la salmuera es un factor importante en la formación de emulsiones estables. Agua fresca o salmuera con baja concentración de sal favorecen la estabilidad de las emulsiones; por el contrario, altas concentraciones de sal tienden a reducirla. La fuerza neta de gravedad que actúa en una gota es directamente proporcional a la diferencia en densidades entre la gota y la fase continua. Aunque para la Ley de Stokes el radio de la gota influye de forma proporcional y en mayor orden de magnitud, un aumento en la diferencia de densidad entre las fases también puede lograr un aumento de la velocidad y por ende acelerar la coalescencia. Por otro lado, se sabe que la conductividad es una medida de la facilidad del flujo a conducir electricidad; por lo que, la presencia de iones en el agua aumenta su conductividad.

Cuando el objetivo de un estudio es medir cómo influyen los n factores que afectan un proceso y descubrir si interaccionan entre sí, el diseño factorial 2^n es la estrategia experimental adecuada. Este diseño permite explorar una zona

escogida del dominio experimental y encontrar una dirección prometedora para la posterior optimización [4].

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor. Con frecuencia se le llama efecto principal porque se refiere a los factores de interés primario en el experimento. El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor. Con frecuencia se le llama efecto principal porque se refiere a los factores de interés primario en el experimento. El diseño factorial 2ⁿ está conformado por varios factores estudiados a dos niveles, a estos niveles se les denomina “bajo” y “alto”. Puesto que sólo hay dos niveles para cada factor, se supone que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango elegido para los niveles de los factores [4].

Este diseño permite identificar qué factores son significativos con respecto a la variable de respuesta [5]. Se considera como la variable de respuesta de las pruebas en el diseño experimental, el Factor de Desestabilización (FD) [6], el cual cuantifica el cambio en el tamaño de las gotas con el tratamiento eléctrico para un tamaño (X_A) de 20 μm , a través de la relación (2).

$$FD = \frac{\phi_w(X_A)}{\phi_w^0(X_A)} \quad (2)$$

Donde, FD es el Factor de Desestabilización, $\phi_w(X_A)$ es el porcentaje de agua en gotas con diámetro mayor a X_A luego de aplicar el tratamiento, y $\phi_w^0(X_A)$ es el porcentaje de agua en gotas con diámetro mayor a X_A antes de aplicar el tratamiento, siendo. El FD puede ser igual, mayor o menor que uno, siendo de interés para el caso en estudio que sea mayor a uno.

En función a lo indicado, se plantea evaluar el impacto de la salinidad de la fase dispersa en emulsiones W/O para un proceso de deshidratación de crudo a través del proceso de separación electrostática, como agente promotor.

II. METODOLOGÍA

Con el fin de alcanzar el objetivo del estudio, se planteó realizar una formulación de una emulsión que se asemeja al crudo tratado en la planta deshidratadora/desaladora del Distrito Morichal (COMOR), que corresponde a un crudo diluido a 16 °API.

Se seleccionó un pozo con un corte de agua por debajo de 1% con una gravedad de 8 °API, y un diluyente con igual contenido de agua y 32 °API; mientras que para modificar la concentración de sal en las muestras se tomó agua del proceso y se varió su concentración a través de un proceso de evaporación o disolución logrando un crudo con 15,8 °API, 10 y 20% de agua con concentraciones de 10.000 ppm y 40.000 ppm de sales.

Las pruebas de deshidratación de crudo, incluyeron el uso del análisis factorial 2³, donde se aplica campo eléctrico de corriente directa (DC) en continuo, considerando como

variables: concentración de sal, % de agua y voltaje, calculando el Factor de Desestabilización (FD) como variable de respuesta; este representa el cambio en fracción de gotas mayores a 20 μm .

A. Caracterización de las muestras

Para el estudio se preparó una mezcla de gravedad 16°API, con un crudo de formación proveniente de un pozo con bajo corte de agua procedente del Distrito Morichal, División Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco y diluyente suministrado por el Distrito Norte de la División Oriente PDVSA. El agua salada se tomó a la salida de un deshidratador electrostático de la planta para ser sometida a un proceso de evaporación en aras de aumentar/disminuir la concentración y preparar soluciones en los valores deseados. La Tabla I, presenta las propiedades en la caracterización de las muestras de crudo y agua, así como la norma o técnica aplicada.

TABLA I
PROPIEDADES Y NORMATIVA/TÉCNICA APLICADA EN LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE EMULSIÓN, DILUYENTE, AGUA Y CRUDO.

Muestra	Propiedad	Norma
Crudo	Porcentaje de agua y sedimentos	ASTM D 4007-81
	Densidad	Picnómetro
	Gravedad API	ASTM D 287-92
	Viscosidad absoluta	ASTM 5018-89
Diluyente	Porcentaje de agua y sedimentos	ASTM D 4007-81
	Gravedad API	ASTM D 287-92
Agua	Salinidad. Iones cloruros	Titulación
	Densidad	Picnómetro

B. Formulación de las emulsiones

Se realizó cada muestra de emulsión aplicando agitación empleando un impulsor tipo hélice, una velocidad de 500 rpm, un tiempo de 1800 s y una temperatura de 288,7 K, donde se agregó la cantidad de agua para obtener la proporción deseada en la emulsión.

La estabilidad de la emulsión se comprobó a través de la separación de fases luego de aplicar centrifugación a una velocidad de 1500 rpm por un lapso de 1200 s.

C. Distribución acumulada del tamaño de partícula

La curva de distribución acumulada es una representación de la fracción o porcentaje de las partículas que se encuentran por debajo o por encima de cierto tamaño, en este caso se consideró 20 μm . Una vez obtenidos los datos acumulados de la cantidad relativa de partículas que pertenecen a cada rango de tamaño, lo cual se realiza a través del análisis de imagen

obtenida con el microscopio óptico Nikon Eclipse ME600 (20X), se puede decir que $F_R(20 \mu m)$ representa la cantidad relativa de partículas más grandes que $20 \mu m$, como se muestra en la Figura 2 [7].

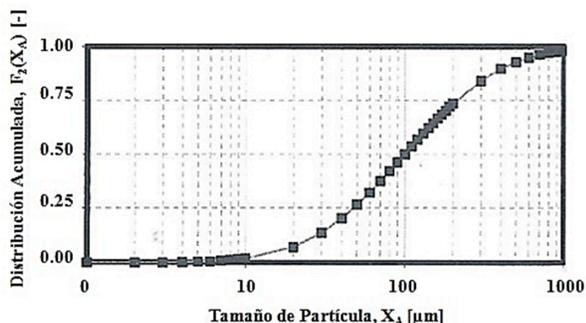


Figura 2. Distribución acumulada de tamaño de partículas (Sorrentino, 2002).

D. Efecto en la deshidratación electrostática

Las combinaciones contempladas en el diseño factorial 2^3 , se definen a partir de los valores establecidos en la Tabla II.

TABLA II
VALORES PARA LOS NIVELES DE LAS VARIABLES EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL.

	Nivel bajo (-)	Nivel alto (+)
Porcentaje de agua (%) (v/v)	10	20
Voltaje (V)	400	800
Contenido de sal en agua (ppm)	10.000	40.000

De igual forma en la Tabla III, se presenta la matriz de experimentos realizados.

El nivel de confiabilidad es del 99% con el fin de tener mayor seguridad de elegir los parámetros significativos.

TABLA III
MATRIZ DE LOS EXPERIMENTOS.

Prueba	% de agua	Voltaje	Contenido de sal
1	+	-	-
2	+	+	-
3	+	+	+
4	-	+	+
5	-	-	+
6	-	-	-
7	-	+	-
8	+	-	+

El campo eléctrico se aplicó con una fuente de poder (marca PHYWE) que provee un máximo de 10 kV de corriente directa (DC) a 2,5 mA, sobre un dispositivo para prueba en continuo con una celda de electrodos planos y paralelos de cobre, con un volumen de 4 cm^3 , el cual cuenta con un dispositivo que permite controlar el flujo para garantizar el tiempo de residencia; este sistema fue elaborado en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas (LSM) de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela.

En la Figura 3, se presenta el sistema en continuo.



Figura 3. Sistema en continuo de celda con electrodos planos.

Para el análisis de imagen de la muestra emulsionada, se colocó una muestra en un portaobjeto y se visualizó al microscopio empleando el objetivo 20X. Se realizó la captura de imágenes tomando zonas aleatorias de la muestra. Las imágenes capturadas antes y después de aplicado el campo eléctrico, se procesan con el software Image ProPlus® para establecer la distribución acumulada de gotas. Este gráfico permite observar los cambios generados por el campo eléctrico en el tamaño de las gotas presentes en la emulsión de la muestra tratada, siendo esto indicativo del grado de desestabilización alcanzado.

En total se realizaron ocho pruebas manteniendo un tiempo de residencia en la celda, donde se tomaron tres muestras de 5 ml c/u para observación en el microscopio y análisis de distribución acumulada de gotas. Partiendo de esta distribución acumulada de gotas se calculó el FD.

III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Caracterización

La caracterización de las muestras de crudo da como resultado los valores presentados en la Tabla IV.

TABLA IV
CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE CRUDO.

Muestra	% de agua (v/v)	°API	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Crudo de formación	0,8	8,2	
Diluyente	0,4	32,4	

Muestra de trabajo		16,2	950
--------------------	--	------	-----

El contenido de agua del crudo de formación y del diluyente es menor al 1%, valor adecuado para el trabajo; la muestra de trabajo que parte del crudo de formación y el diluyente tiene características similares al crudo Merrey 16, al tener 16,2 °API. Se evidencia la cercanía entre los valores de la gravedad para la muestra de trabajo y el agua (variación de 50 kg/m³)

En la Figura 4, se observa el comportamiento de la viscosidad del crudo de la muestra de trabajo en comparación con el crudo promedio de Merrey 16.

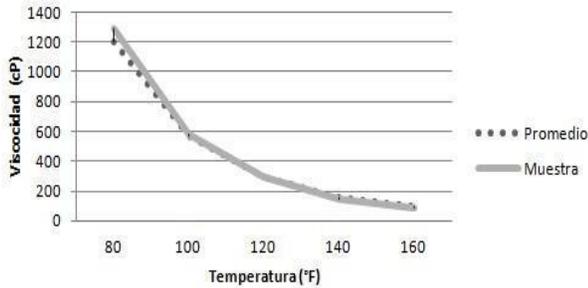


Figura 4. Comparación en el comportamiento de la viscosidad del crudo de la muestra de trabajo y el promedio de Merrey 16.

Se observa un comportamiento similar con un margen de diferencia (~4%) entre el crudo promedio Merrey 16 y el crudo de la muestra de trabajo, que reproduce el crudo tratado en COMOR.

Los resultados de la caracterización del agua proveniente del deshidratador y de las muestras de agua con el contenido de sal establecido para el estudio (M1, M2) se presentan en la Tabla V.

Se evidencia que al aumentar el contenido de sal, incrementa la densidad del agua.

TABLA V
CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGUA.

Muestra	Salinidad (ppm NaCl)	ρ (kg/m ³)
Agua del deshidratador	15210	950
Muestra 1 (M1)	10.000	1010
Muestra 2 (M2)	40.000	1070

En aras de garantizar la realización de emulsiones estables, se preparó un volumen de muestra para cada experiencia bajo condiciones idénticas, garantizando temperatura, velocidad y tiempo de agitación, así como la incorporación de agua salada (M1, M2). Se prepararon 550 ml de cada emulsión, indicada en la Tabla VI.

Estas emulsiones se sometieron a centrifugación para verificar su estabilidad, al medir la cantidad de agua libre. En

este caso, todas las emulsiones realizadas fueron estables al no se observa separación de fases como resultado de este proceso.

Parte de las imágenes consideradas para el análisis de imagen que permite obtener la distribución acumulada de gotas de las emulsiones realizadas, se observan en la Figura 5.

TABLE VI
CARACTERÍSTICAS DE LAS EMULSIONES REALIZADAS.

Muestra	Contenido de sal (ppm)	% de agua (v/v)
M1.a	10.000	10
M1.b		20
M2.a	40.000	10
M2.b		20

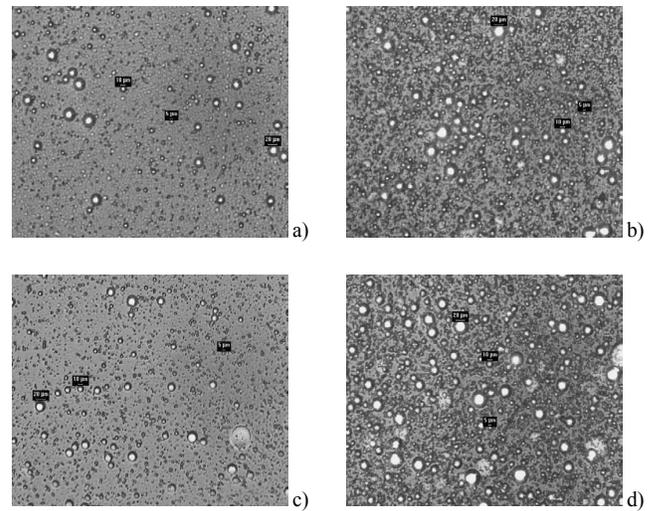


Figura 5. Micrografías (20X) de las distintas emulsiones realizadas. a) M1.a, b) M1.b, c) M2.a, d) M2.b

Se colocaron marcas para tamaños de gota de 5, 10 y 20 micras. Se observan similitudes en las imágenes de las emulsiones realizadas con 10 % de agua (M1.a-M2.a) y con 20% de agua (M1.b-M2.b). En estos sistemas se puede apreciar que no hay un tamaño único de gotas, sino una distribución de tamaños de gotas.

En la Figura 6, se aprecia la distribución acumulada de gotas para las emulsiones realizadas, donde resalta que la mediana de la distribución acumulada D₅₀ de las emulsiones realizadas se encuentra entre 9,7 µm para M1.a y 13,01 µm para M2.b.

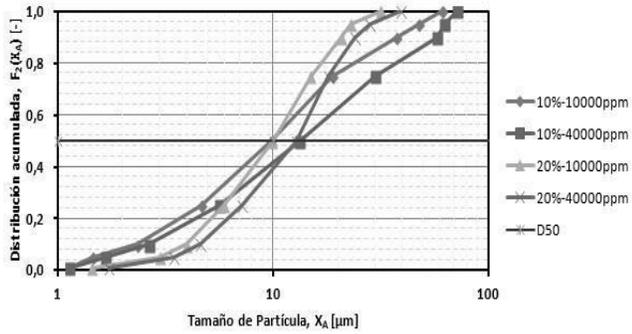


Figura 6. Distribución acumulada de gotas para las emulsiones realizadas.

Destaca que a mayor contenido de agua (20%) la preferencia de formación de gotas es de menor diámetro siendo el mayor de 39,20 μm ; mientras que a un porcentaje de agua (10%) menor se observan gotas de hasta 71,83 μm .

Indistinto del porcentaje de agua, se observa mayor diámetro de gota a concentraciones altas de sal, siendo este aspecto clave en la desestabilización de la emulsión W/O.

Se considera que las emulsiones formadas representan un buen patrón para el estudio, ya que el D_{50} fue similar para cada uno de los casos planteados de concentración de sal y porcentaje agua, por lo que cualquier método de deshidratación tendría un buen parámetro de comparación a efectos de la desestabilización de gotas.

B. Aplicación del tratamiento electrostático

Luego de aplicar campo eléctrico DC a las muestras de las emulsiones realizadas, se llevó a cabo la captura de imágenes con el microscopio óptico. En la Figura 7 se muestra el cambio producido sobre las muestras M1.a y M2.a.

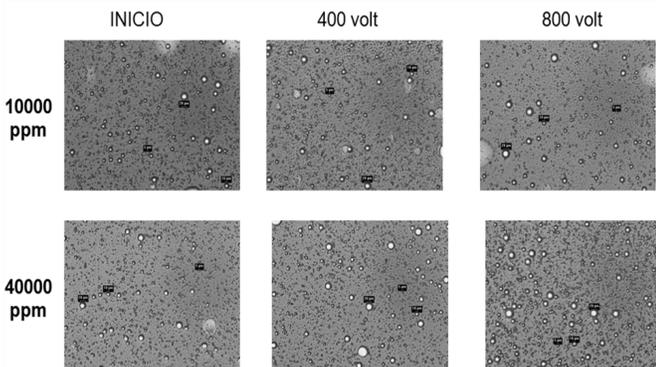


Figura 7. Emulsiones M1.a y M2.a, antes y después de aplicar el tratamiento electrostático.

Se observa la tendencia de aumento de presencia de gotas grandes a medida que aumenta el voltaje y la salinidad; sin embargo, el resultado final se analiza con el gráfico de distribución acumulada de gotas presentado en la Figura 8.

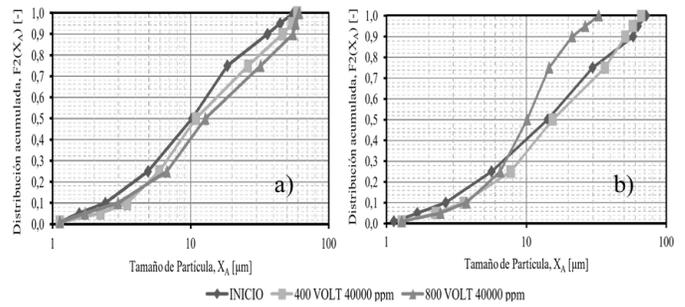


Figura 8. Distribución acumulada de gotas para las emulsiones antes y después del tratamiento electrostático. a) M1.a, b) M2.a.

En la Figura 8.a (M1.a) se observa un ligero desplazamiento hacia la derecha de la curva de distribución respecto a la original (antes del tratamiento), al variar el voltaje y mantener la concentración de sal; en el caso de la Figura 8.b (M2.a) se observa que el incremento en la concentración de sal y alto voltaje hace que la curva de distribución se desplace hacia la izquierda por lo que aumenta la cantidad de gotas de menor diámetro, siendo esto desfavorable para un proceso de deshidratación.

El cambio producido sobre las muestras M1.b y M2.b, luego del tratamiento electrostático se observa en la Figura 9.

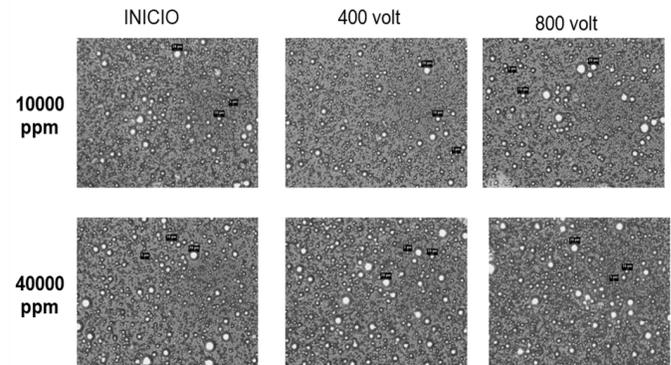


Figura 9. Emulsiones M1.b y M2.b, antes y después de aplicar el tratamiento electrostático.

Se aprecia que la imagen no permite hacer una inferencia sobre el cambio producido por lo que es necesario examinar la Figura 10, que presenta la distribución acumulada de gotas.

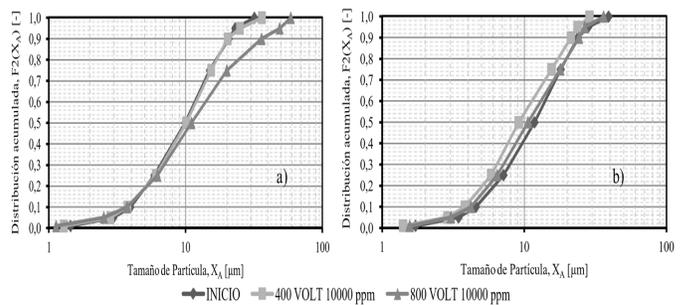


Figura 10. Distribución acumulada de gotas para las emulsiones M1.b y M2.b, antes y después del tratamiento electrostático.

La emulsión M1.b (Figura 10.a) presenta un desplazamiento de la curva hacia la derecha favoreciendo la formación de gotas de mayor diámetro cuando se aplica un voltaje de 800 V; mientras que la emulsión M2.b (Figura 10.b) no presenta cambio significativo en la distribución acumulada de gotas.

Al aplicar un campo eléctrico a una emulsión W/O, si el campo eléctrico es demasiado alto la gota se dividirá en gotas más pequeñas, esto debido a que la tensión eléctrica sobrepasa la fuerza de recuperación debido a la tensión interfacial [8].

El efecto electroforético explica la disminución de diámetro de gotas en la distribución acumulada cuando la fase dispersa en la emulsión presenta mayor contenido de sal, ya que al someter los iones a un campo eléctrico, los iones de positivos se moverán de forma constante hacia el electrodo negativo, mientras que los iones de negativos se moverán hacia el electrodo positivo, produciendo el achatamiento y posterior división de la gota. Por lo que, al aumentar la conductividad producto del aumento de concentración de sal en la fase acuosa, mayor es la densidad de corriente que fluye, y por ende el campo eléctrico puede sobrepasar el campo eléctrico crítico generando el fenómeno de dispersión eléctrica lo que origina un alargamiento espontáneo y posterior división de la gota.

C. Efecto de la aplicación del campo eléctrico DC

Con el fin de analizar este efecto, se evaluó el cambio en la cantidad de agua en gotas de 20 micras, empleando el FD, de modo de determinar la influencia de las distintas variables (5 de agua, contenido de sal y voltaje) en el proceso electrostático de ruptura de emulsiones.

En la Figura 11 se aprecian los resultados del FD para cada prueba, donde los mejores valores en esta variable se obtienen para:

- Contenido de sal alto, % de agua y voltaje bajo,
- Contenido de sal y % de agua bajo, voltaje alto,
- Contenido de sal bajo, % de agua y voltaje alto.

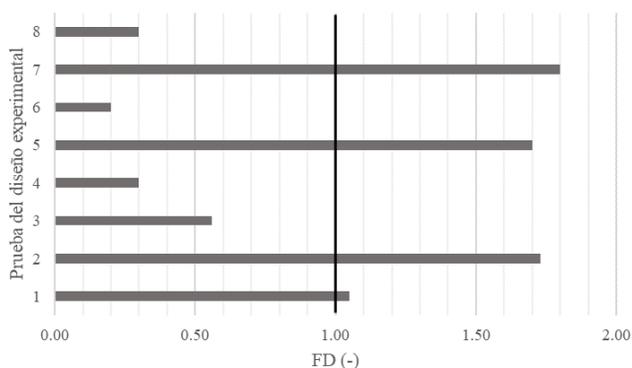


Figura 11. Factor de desestabilización para las pruebas realizadas.

En el resto de las pruebas realizadas, se estabilizó la emulsión W/O o se mantuvo igual el tamaño de las gotas. En el desarrollo de las experiencias, se determinó que el coeficiente de variación del FD, es menor al 25%, lo cual es un valor aceptable al considerar que la técnica de microscopía óptica conduce a errores motivado a la cantidad de imágenes consideradas para cada muestra [9].

El análisis estadístico de los resultados y la determinación de la interacción entre los factores considera un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 12 se muestra la gráfica con los efectos principales. El contenido de sal es la que provoca mayor cambio en el FD, favoreciendo la formación de gotas mayores a 20 μm a concentraciones bajas. La variación del porcentaje de agua (10%-20%) afecta el FD al disminuir la formación de gotas mayores a 20μm cuando va de un valor bajo a uno alto, mientras que el cambio en el voltaje no representa ningún efecto de manera independiente.

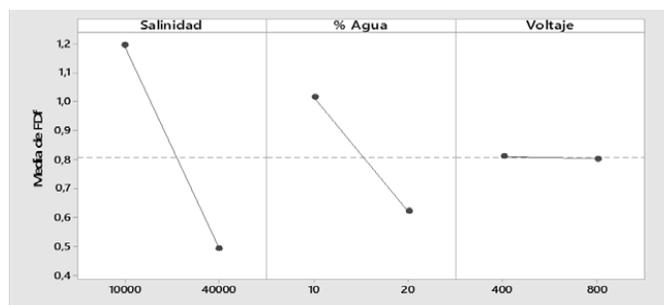


Figura 12. Efectos principales para el FD.

Tomando en cuenta los efectos principales, las mejores condiciones son valores bajos de concentración de sal y porcentaje de agua; sin embargo, esta interpretación se debe matizar al considerar las interacciones entre estas variables.

La interacción de dos factores mide la influencia que tiene una combinación de factores en la respuesta. Existe interacción cuando el efecto de un factor es diferente a distintos niveles de otros factores. Se puede comprender fácilmente si se observa la Figura 13, donde se evalúa el efecto de cada factor por pares de experimentos.

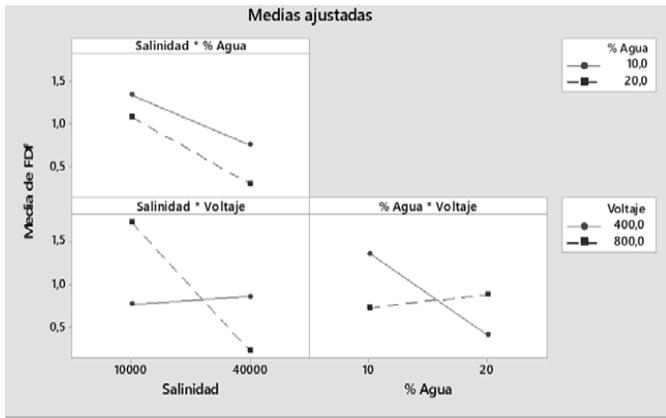


Figura 13. Gráfica de interacción de las variables para FD.

Cuando se aumenta la concentración de sal en la emulsión W/O, el FD se ve desfavorecido a voltaje alto, es decir, no solo la salinidad debe ser vista como un efecto principal sino que esta interactúa con el voltaje de forma significativa. Dicho resultado valida el efecto de la conductividad de las sales presentes, al someter la muestra a un campo eléctrico de alto voltaje se produce el efecto indeseado al aplicar este método de deshidratación, ocasionando la fractura de gotas y por ende la formación de una emulsión W/O más estable.

El porcentaje de agua y el voltaje, presentan interacción, dado que al aumenta el porcentaje de agua en la emulsión W/O el FD se ve desfavorecido al aplicar bajo voltaje, por lo que se demuestra que no solo el porcentaje de agua actúa como efecto principal, sino que interactúa con el voltaje aplicado.

Para validar estos los resultados, en la Figura 14 se presenta el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados para el FD como variable de respuesta, donde se observa que la mayor interacción la representa el contenido de sal-voltaje, seguido del % agua-voltaje, y como efecto principal, el contenido de sal seguido del porcentaje de agua, no se observa interacción de tres variables.

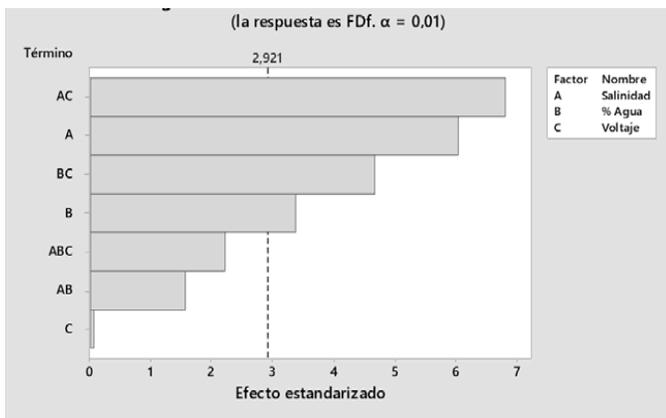


Figura 14. Diagrama de Pareto para los efectos estandarizados.

Dado que la principal interacción está representada por la combinación de dos variables: salinidad-voltaje, en la Figura 15 se observa la gráfica de contorno con la interacción de estas variables.

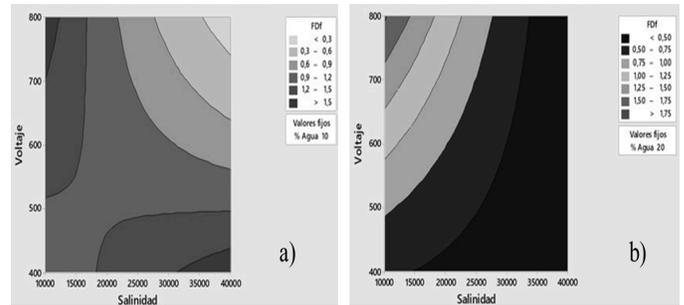


Figura 15. Gráfica de contorno para el FD con la interacción voltaje-salinidad. a) 10% agua, b) 20% agua.

Para el 10% de agua (Figura 15.a) al aplicar bajo voltaje y tener alto contenido de sal, así como alto voltaje y bajo contenido de sal, se origina un aumento en el tamaño de gotas; mientras que, para 20% de agua (Figura 15.b) el FD se favorece con bajo contenido de sal y alto voltaje.

La interacción entre el voltaje y el % de agua, se aprecia en la Figura 16; allí se evidencia que para un crudo con un bajo contenido de sal, independiente del % de agua, un alto voltaje, favorece el incremento del tamaño de las gotas; mientras que para un crudo con un alto contenido de sal, bajo % de agua y bajo voltaje se favorecen el incremento de tamaño de las gotas.

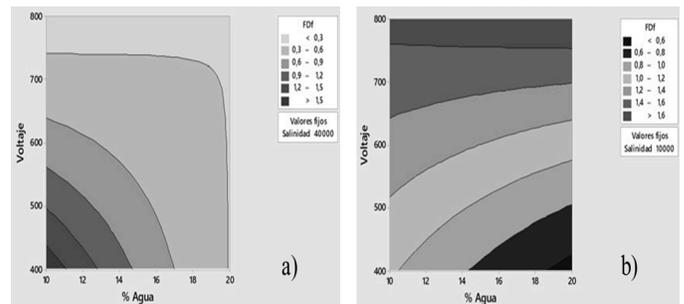


Figura 16. Gráfica de contorno para el FD con la interacción voltaje-%agua. Contenido de sal a) 10.000 ppm, b) 40.000 ppm.

IV. CONCLUSIONES

A partir de una mezcla de crudo con 16,2 °API es posible realizar emulsiones estables con un contenido de sal en agua entre 10.000 y 40.000 ppm, para un 10 y 20 % de agua. El tamaño de las gotas tiende a ser menor para la emulsión con mayor contenido de agua. A mayor contenido de sal indistintamente del porcentaje de agua en la emulsión W/O, el diámetro de las gotas tiende a ser mayor. Bajo contenido de sal y alto voltaje, independiente del porcentaje de agua,

aumenta el Factor de desestabilización, y por lo tanto mejora la separación de fases al emplear campo eléctrico. Los efectos relevantes para el Factor de desestabilización son el contenido de sal y el porcentaje de agua; sin embargo, el mayor efecto lo origina la interacción del contenido de sal con el voltaje, siendo también importante la interacción entre el porcentaje de agua y el voltaje.

APORTE DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio permitió identificar condiciones favorables para la desestabilización de emulsiones W/O, en relación a contenido de sal, voltaje aplicado y contenido de agua, a través del Factor de Desestabilización (FD).

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo fue posible gracias al apoyo de Petróleos de Venezuela S.A., Departamento de Ingeniería de Procesos y Laboratorio de Petróleo, del Distrito Morichal, así como de la Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Química, Laboratorio de Separaciones Mecánicas.

REFERENCIAS

- [1] A. Figuera, "Diseño de una planta de desalación de crudo a escala banco". Universidad Simón Bolívar. Venezuela. 2009.
- [2] S. Marfisi y J. Salager, "Deshidratación de Crudo Principio y Tecnología". Cuaderno FIRP S853. Módulo de enseñanza de la Universidad de Los Andes, Mérida. 2004. https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/07/S853PP_Deshidratacion.pdf
- [3] J. G. Delgado-Linares, C. Gutiérrez, F. Salazar, M. Guevara, R. Mercado y J. C. Pereira, "Aplicación de conceptos clásicos de la Física en la práctica ingenieril. La ley de Stokes como herramienta conceptual en el análisis de procesos de deshidratación del petróleo". *Educ. quim.*, 24(1), 57-62, 2013. DOI: 10.1016/S0187-893X(13)73196-3
- [4] D. Pérez, F. Martínez, J. R. Pascual, F. Gutiérrez, J. Hernández, A. Balbuena y A. González. "Diseño de experimentos factoriales 2ⁿ para su análisis con Infostat e Infogen. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(6), 1087-1099. 2021. DOI:10.29312/remexca.v12i6.3013
- [5] M. González, "Desestabilización electrostática continua del material de fosa Acema-100". Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 2012. <http://saber.ucv.ve/handle/10872/2744>
- [6] M. A. Rodríguez, "Desestabilización electrostática de emulsiones en fosas de producción". Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 2013.
- [7] J. A. Sorrentino, "Advances in correlating filter cake properties with particle collective characteristics" Aachen: Shaker, 2002.
- [8] J. Eow, M. Ghadiri, A. Sharif y T. Williams, "Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding." *Chemical Engineering Journal* N°84. Elsevier. Pág. 173-192. 2001. DOI:10.1016/S1385-8947(00)00386-7
- [9] A. Padrón y P. Zúñiga, "Aplicación de la técnica de microscopía óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudo, agua y sólidos". Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 2005. <http://saber.ucv.ve/handle/10872/15501>