

Un estudio sobre la densidad y la viscosidad de fluidos oleosos procedentes de almazara

Pedro Vallesquino Laguna¹, Alejandro Tirado Esquinas²

¹ Dpto. Bromatología y Tecnología de los Alimentos. ETSIAM - Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales s/n, 14080, Córdoba (España). E-mail:

² Dpto. Bromatología y Tecnología de los Alimentos. Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales s/n, 14080, Córdoba (España). E-mail:

✉ bt1valap@uco.es - g32tiesa@uco.es

RESUMEN

Como caso de estudio, en este trabajo se ha llevado a cabo la medida de la densidad (ρ) y de la viscosidad dinámica (μ) de 12 fluidos diferentes, procedentes de una almazara convencional, que fueron tomados a la salida de las centrifugas instaladas en planta. La variabilidad de las muestras pone de manifiesto que su contenido de impurezas c (entre el 0,5% y el 5,87%), junto con la temperatura T (que varió nominalmente entre 20°C – 30°C), puede incidir en los valores de las propiedades físicas mencionadas. No obstante, esa variación se ha mostrado más pequeña dependiendo del caso, siendo del orden del 1,5% (como máximo) para la densidad y del 10% - 50% para la viscosidad (dependiendo de c y T). El hecho de que μ sea sensible a la presencia de impurezas abre una línea de estudio que podría permitir como alternativa, usando sensores relativamente simples, la determinación de dicho contenido de impurezas en mostos oleosos.

Palabras clave: *aceite de oliva, densidad, viscosidad, proceso, temperatura, humedad, impurezas.*

1. INTRODUCCIÓN

En las operaciones básicas de las industrias dedicadas a la producción o transformación de alimentos suele haber implicados un gran número de parámetros cuyo conocimiento permite describir y entender el funcionamiento o desarrollo de dichas operaciones. En el ámbito concreto de las almazaras, entre los parámetros de interés a considerar podrían mencionarse aquellos relacionados con las propiedades físicas de las sustancias que se estén manejando en cada punto del proceso, dado que dichas propiedades influyen sobre el funcionamiento de los equipos y en último término condicionan la calidad del producto final (Hermoso et al., 1996; Alba, 2008). Centrando nuestro interés en las etapas medias y finales del proceso de elaboración del aceite de oliva, cabe comentar que el fluido finalmente buscado suele ir acompañado de una serie de sustancias no deseables (impurezas) que, precisamente, deben ser separadas del zumo principal con el fin de obtener el buscado AOVE (aceite de oliva virgen extra). En este contexto, es bien conocido (Hermoso et al., 1996; Uceda et al., 2006; Gila, 2017) que tras la molturación y el batido actualmente suele aplicarse una primera centrifugación (horizontal o con 'decánter') de la que se obtiene una fase oleosa en la que aún hay presentes restos de aguas de vegetación, pulpa y hueso de aceituna. Para eliminar dichas impurezas es habitual también llevar a cabo otras operaciones posteriores que finalmente permiten obtener el AOVE, como es el caso del tamizado, una segunda centrifugación (con separadora vertical o 'de platos'), el filtrado y la decantación natural (estas dos últimas operaciones no siempre en el mismo orden al indicado).

Teniendo en cuenta el conjunto de operaciones básicas mencionadas, es evidente que en el manejo de las mismas puede tener interés el conocer a priori cómo pueden ser los fluidos oleosos que van generándose de una etapa a otra, especialmente aquellos procedentes de las centrifugaciones aplicadas. Con esta premisa, se presenta este trabajo en el que se trata como caso de estudio la determinación, a diferentes temperaturas, de la densidad y de la viscosidad de diversos fluidos oleosos tomados en diferentes momentos de campaña (y que proceden de una almazara convencional). Asimismo, se pretende analizar la posible relación entre dichas propiedades y el contenido variable de impurezas presente en el aceite, dado su potencial uso para mejorar el proceso de elaboración y la calidad del producto final.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Muestras de ensayo

En este trabajo se ha podido disponer de 12 muestras oleosas, de unos 10 litros cada una, tomadas entre diciembre de 2019 y febrero de 2020 de una planta de producción de aceite de oliva, situada cerca de *Priego de Córdoba* y perteneciente a la *S.C.A. Almazaras de la Subbética*. Cada una de las muestras referidas presentaba unas características y aspecto diferentes (véase como ejemplo la **Figura 1**), fundamentalmente por la fecha de recogida y por el punto del proceso elegido para la toma. En este sentido merece indicarse que las muestras M1 y M2 fueron extraídas en diciembre, las M3 – M8 a lo largo de enero y las M9 – M12 a lo largo de febrero. En general la mayor parte de las muestras fueron originarias de aceituna de vuelo, salvo las muestras M7 y M10 que procedían, total o parcialmente, de aceituna de suelo. En este punto, señalar por su importancia que el proceso de producción llevado a cabo por la almazara citada está basado en un 'sistema convencional en continuo', en el que en cada línea de proceso se usa (tras la limpieza, el lavado, la molienda y el batido) un 'decánter' de dos fases (salidas), para llevar a cabo la separación sólido-líquido, y una centrifuga vertical ('de platos') para llevar a cabo la separación líquido-líquido. En el proceso indicado no se filtra el aceite, pero el mosto oleoso se puede tamizar a la salida del 'decánter' y se puede aclarar (con decantadores gravitatorios dinámicos) tras la centrifuga vertical.

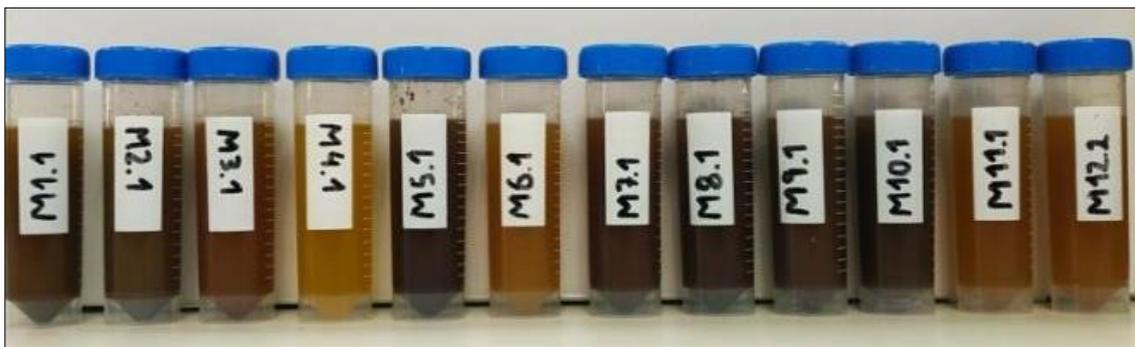


Figura 1. Sub-muestras de los fluidos oleosos tratados: M1.1, M2.1, M3.1, M8.1, M9.1 y M11.1 (procedentes de aceituna de vuelo), M7.1 (originaria de suelo y vuelo) y M10.1 (sólo de suelo), todas ellas tratadas con una centrifugación ('decánter') y con tamizado posterior. M4.1, M6.1 y M12.1 vienen de aceituna de vuelo tras 'decánter', tamizado y centrifugación vertical (sin aclarado). M5.1 procede de aceituna de vuelo tras 'decánter' sin tamizado.

2.2 Material de laboratorio

Para poder llevar a cabo los ensayos previstos se decidió construir de forma propia un viscosímetro de tubo (Steffe, 1996) cuya geometría queda descrita de forma genérica en la **Figura 2**. Para la fabricación del mismo se requirió principalmente de un recipiente de plástico calibrado (para albergar el fluido a medir) así como de un tubo de polietileno transparente, con longitud y diámetro fijados por diseño para favorecer el desarrollo de régimen laminar dentro del mismo. El recipiente de plástico usado tenía capacidad de 1 litro y fue rotulado con diversas marcas de referencia para poder medir las posibles alturas de fluido (h) dentro del mismo. Las dimensiones nominales del tubo empleado en el viscosímetro fueron las siguientes: longitud $L = 0,4$ m, altura $h' = 0,39$ m y diámetro interior $D = 4,073$ mm.

De forma complementaria a lo anterior, para llevar a cabo los ensayos también se requirió de otro material auxiliar como: 2 termómetros de varilla (para medir la temperatura del fluido a la entrada y salida de la tubería) con rango de temperatura entre -10 °C ~ $+60$ °C y con precisión de ± 1 °C. Seis probetas de 100 ml de capacidad (con precisión de ± 1 ml) y cinco probetas de 250 ml (precisión de ± 2 ml) para recoger los volúmenes que serían útiles para estimar densidades y caudales en cada ensayo. Dos balanzas digitales con precisiones respectivas de $\pm 0,01$ g y de $\pm 0,001$ g. Un cronómetro digital (con una resolución de 0.01 s). Una centrifuga de eje vertical (útil para tubos de

ensayo de 50 ml) con temperatura y régimen de revoluciones regulable (de -9 °C a +40 °C, y de 200 rpm hasta 14000 rpm, respectivamente). Dos cámaras frigoríficas (a 4,5 °C y a 12 °C) y una de congelación (a -18°C) para almacenar las muestras entre ensayos. Bloques de hielo, agua caliente y cubetas de 10 litros para enfriar o calentar, de forma rápida y por contacto indirecto, las muestras oleosas tratadas. Botellas de 1.5 litros, higienizadas y secadas, para albergar de forma auxiliar diferentes muestras. Microtubos de centrifuga calibrados, con capacidad de 50 ml por tubo. Diversas pipetas y jeringas, para ayudar en el manejo o trasvase de muestras. Una cinta métrica, calibrada al milímetro, y diverso material de oficina (tijeras, cinta adhesiva, rotuladores, etc.).

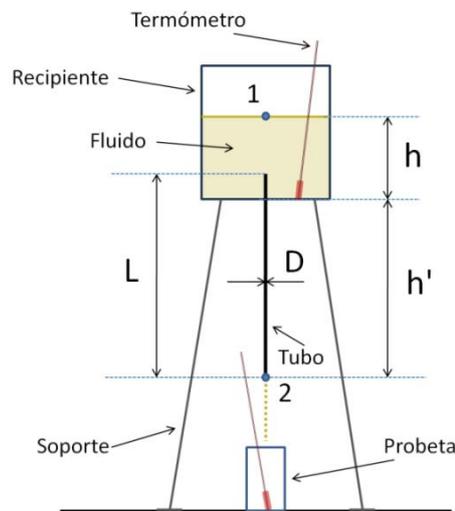


Figura 2. Viscosímetro de tubo: esquema de diseño

2.3 Ensayos de viscosidad y densidad de las muestras oleosas

Para facilitar las tareas de ensayo, cada muestra original (recogida en una garrafa de 10 litros) era repartida en diferentes botellas de 1,5 litros previa homogenización del conjunto (mediante agitación manual de la garrafa). Dichas botellas eran conservadas en frío (a 4,5 °C ó a -18°C, en función de su momento esperado de uso) con el fin de evitar cualquier actividad microbiana (como pudiera ser la fermentación por presencia de levaduras). Llegado el momento, se tomaba cualquiera de las botellas conservadas en refrigeración (a 4,5 °C) y se dejaba atemperar en laboratorio (a unos 23 °C) durante 1 - 2 horas. Teniendo en cuenta que se deseaba desarrollar los ensayos con temperaturas de fluido del orden de 20°C – 30 °C, cuando la muestra elegida se aproximaba de forma natural al rango inferior de dichas temperaturas se iniciaba el ensayo de viscosidad, vertiendo sobre el recipiente del viscosímetro dicha muestra. Depositado el fluido en el viscosímetro (que estaba abierto a la atmósfera) hasta alcanzar una determinada altura h , por simple gravedad se originaba un flujo a través del tubo de dicho dispositivo que, una vez estabilizado, podía ser recogido en una probeta (véase la **Figura 2**) durante un tiempo dado (con el fin de poder estimar posteriormente el caudal circulante Q). El volumen del fluido recogido en la probeta (V) también era pesado con una balanza digital pues se deseaba, asimismo, estimar su densidad ρ posteriormente (recuérdese que $\rho = m / V$, siendo m la masa ligada a V). La temperatura de ensayo (del fluido) era medida en dos puntos (a la entrada y a la salida del tubo) y era regulada a priori (antes de verter el fluido en el vaso) por contacto indirecto con agua caliente o fría (según necesidad). La altura h era medida al principio y al final de cada ensayo, tomándose como dato la media entre ambos valores (normalmente comprendida entre 4 cm – 6 cm).

A partir del procedimiento antes descrito (que fue aplicado 12 veces por cada tipo de muestra a diferentes temperaturas), y teniendo en cuenta lo descrito en el apartado 2.2, los valores de viscosidad dinámica μ de los fluidos ensayados fueron estimados a partir de la siguiente expresión

basada en la ecuación de Hagen-Poiseuille y en la ecuación de la energía (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005; Singh y Heldman, 2009):

$$\mu = \Delta p \cdot \pi \cdot D^4 / (128 \cdot L \cdot Q) = \rho \cdot g \cdot (h+h') \cdot \pi \cdot D^4 / (128 \cdot L \cdot Q), \quad (\text{ec. 1})$$

en donde $\Delta p = \rho \cdot g \cdot (h+h')$ es la caída de presión entre 1 y 2 (ver **Figura 2**), g es la aceleración gravitatoria, y el resto de variables son las ya indicadas en este apartado y en el 2.2. La utilización de la ecuación (1) para estimar μ supone en principio asumir que el fluido tratado es newtoniano, que el flujo circulante es estacionario y perfectamente laminar a lo largo de toda la longitud L (el efecto de la longitud de entrada y de las pérdidas de carga singulares a la entrada del tubo son despreciables), y que las alturas cinéticas son prescindibles. La bondad de las anteriores aproximaciones puede ser contrastada con lo establecido en (Tirado y Vallesquino, 2020), en donde se pone de manifiesto que para ensayos como los aquí propuestos los fluidos tratados son de tipo newtoniano y el número de Reynolds existente puede ser muy pequeño (del orden de 4 en muchos casos), lo que podría conducir a errores de estimación con μ (por causas de origen hidráulico) inferiores al 0,3%.

2.4 Ensayos sobre el contenido de impurezas

Como alternativa al método oficial (IOC, 2019), y considerando como impurezas, en su conjunto, a todos aquellos restos de aguas de vegetación, pulpa, hueso de aceituna (e incluso levaduras) presentes en el AOVE, en este trabajo se determinó de forma práctica el contenido de dichas sustancias, expresable como $c = (\text{volumen de impurezas} / \text{volumen de muestra}) \cdot 100\%$, aplicando el siguiente método: para cada uno de los 12 tipos de fluidos disponibles (ver apartado 2.1) se tomó la muestra utilizada para desarrollar los ensayos descritos en el apartado 2.3 y se vertió parte de su contenido en 2 tubos de centrífuga como los mostrados en la **Figura 1** (unos 40 ml por tubo). Dichos tubos fueron dejados en reposo en laboratorio (entre 24 - 48 horas a unos 23 °C) para que decantaran de forma natural y posteriormente fueron centrifugados a 3.900 rpm durante 12 minutos a 27 °C. Tras esto, el volumen de impurezas que había presente en cada muestra era claramente visible (véase como ejemplo la parte inferior de cada tubo en la **Figura 3**), y dicho volumen (muy pequeño en buena parte de los casos) podía ser determinado gravimétricamente llevando a cabo las operaciones oportunas. A tal fin, tras marcar el nivel de impurezas alcanzado en cada tubo con un rotulador indeleble, se procedía después al vaciado completo de todo el contenido incluido en dicho tubo. Tras esto, el volumen ligado a la marca anteriormente realizada podía ser medido con la ayuda de agua destilada y una balanza de precisión: el agua destilada servía para rellenar el espacio dejado por la marca y el peso de dicha agua servía para estimar con precisión el volumen ocupado conociendo la densidad de la misma (Singh y Heldman, 2009).

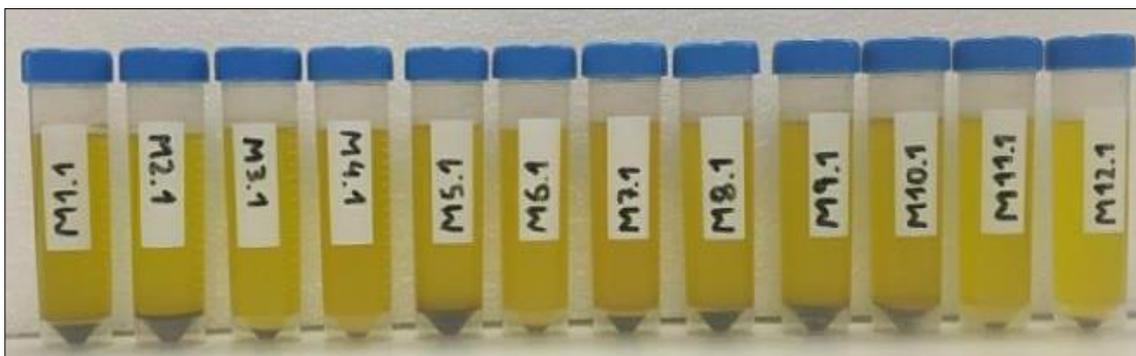


Figura 3. Estado de las sub-muestras (mostradas en la Figura 1) tras 24 horas de decantación natural y posterior centrifugación a 3900 rpm durante 12 minutos.

La densidad aparente de las impurezas ligadas a las muestras ensayadas fue determinada aparte, tratando de obtener un valor más representativo que el que pudiera obtenerse a partir de sub-muestras como las de la **Figura 3**. Con tal objetivo, y en función de la cantidad de restos no

oleosos presente en cada tipo de fluido, se seleccionaron al azar entre 2 - 4 muestras (de las disponibles en botellas de 1,5 litros según lo descrito en el apartado 2.3) y se extrajeron de ellas las impurezas presentes en sus fondos. Tales fondos fueron formados por decantación natural, hasta verificar visualmente una separación efectiva respecto del aceite que las contenía, aplicando temperaturas entre 4.5 °C - 12°C - 23 °C durante no menos de 2 - 3 semanas (para evitar fermentaciones no deseadas). A continuación, el contenido extraído de dichos fondos (con cada tipo de muestra) era homogeneizado y centrifugado a 3.900 rpm durante 12 minutos a 27 °C (rellenando previamente, y al completo según disponibilidad, 1 ó 2 tubos de centrifuga de 50 ml ya calibrados y tarados). Hecha esta tarea, dentro de cada tubo podía observarse un contenido similar al de la **Figura 3**, pero con una fase de impurezas más abundante (del orden de 30 ml – 40 ml por tubo). En este punto, la densidad aparente de cada tipo de muestra podía ser estimada por simple cociente, entre el peso y el volumen de las impurezas remanentes, una vez retirado (cuidadosamente) el aceite residual que pudiera quedar en cada tubo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Contenido y densidad aparente de las impurezas presentes en las muestras

En la **Tabla 1** se muestran los datos relativos al contenido de impurezas c , así como la densidad aparente (ρ_{ap}) ligada a las mismas. Es comentable de dichos datos que los niveles de impurezas mínimo y máximo son, respectivamente, del orden del 0,5 % (muestra M4) y del 5,87 % (muestra M2). Estos valores pueden considerarse normales si son comparados con los encontrados por otros autores (Hermoso et al. 1996; Uceda et al. 2006; Bejaoui et al., 2013; Dammak et al., 2015; Gila, 2017), que presentan niveles de impurezas que pueden variar del 1 % al 15% para fluidos tomados del ‘decánter’, y del 0,2% - 0,6% (Bejaoui et al., 2013; Dammak et al., 2015) para muestras resultantes de la centrifuga vertical (recuérdese, en este caso, que las muestras M4, M6 y M12 procedían de centrifuga vertical y el resto del ‘decánter’ horizontal). Los factores causantes de esta variabilidad (en este estudio y en los citados) pueden ser muy diversos y tienen su raíz en aspectos tanto de origen agronómico como tecnológico (Hermoso et al., 1996, Uceda et al., 2006). Entre los más destacados son citables aquellos relacionados con las características propias de la pasta entrante en el ‘decánter’ (humedad, densidad, consistencia, tamaño de partícula, coadyuvantes utilizados, etc.) así como aquellos ligados a las características y manejo de los equipos (dimensiones y capacidad de producción, distancia al eje de las salidas de las fases, regularidad y cantidad – tiempo de residencia – de la masa inyectada, temperatura, etc.). Probablemente, y a falta de más datos, para las muestras tomadas del ‘decánter’ (en este trabajo) los menores niveles de c puedan estar relacionados con mayores tiempos de residencia, mayores temperaturas de procesado y menores distancias al eje de la salida de la fase oleosa (la muestra M11 sería un ejemplo representativo de esto, pues siendo originaria del ‘decánter’ parece sacada de una centrifuga ‘de platos’). Para el caso de las muestras M4, M6 y M12 (procedentes de la centrifuga vertical) las escasas diferencias observadas probablemente sean debidas a pequeñas variaciones de temperatura, y de tiempo de residencia, en el procesado del mosto.

Tabla 1. Porcentaje y densidad aparente de las impurezas presentes en las muestras tratadas.

Muestra	c (%)	ρ_{ap} (g / ml)	Muestra	c (%)	ρ_{ap} (g / ml)
M1	3,61	1,240	M7	2,00	1,146
M2	5,87	1,167	M8	4,05	1,168
M3	1,13	1,196	M9	4,50	1,135
M4	0,50	1,108	M10	5,38	1,080
M5	5,00	1,171	M11	0,89	1,218
M6	1,14	1,089	M12	1,27	1,126

Respecto de los valores de densidad aparente presentados en la **Tabla 1**, es destacable que todos ellos se sitúan en un rango comprendido entre 1,08 g/ml - 1,24 g/ml (véanse las muestras M10 y M1, respectivamente). Tratando de comparar estos datos con los de otros estudios, es resaltable que en (Gila, 2017) se indica que no existen en la literatura muchas referencias al respecto, situando para las impurezas, a través de simulaciones, un rango de valores de densidad en torno a $1025 \text{ kg/m}^3 - 1225 \text{ kg/m}^3$. En (Alba, 2008), la densidad de los alpechines se sitúa en el entorno de $1,05 \text{ g/cm}^3$, y la de los sólidos no solubles (orujo) alrededor de los $1,2 \text{ g/cm}^3$ (valores que son compatibles con los de la **Tabla 1**). En este punto, y a la vista de la información aquí mostrada, señalar además que los valores de ρ_{ap} parecen ser menores, en general, en las muestras tomadas de la centrífuga vertical (M4, M6 y M12) en comparación con las del resto (procedentes del 'decánter'). Este hecho puede tener sentido si se considera, dentro del campo de validez de la ecuación de Stokes (Mafart y Béliard, 1994), que las partículas más densas, y las de mayor tamaño, han podido tener más facilidad para ser separadas, de la fase líquida, en la primera centrifugación (con 'decánter'). Asimismo, y aunque el número de datos disponible no es grande, los valores de ρ_{ap} de la **Tabla 1** parecen mostrar cierto descenso conforme avanza la campaña de producción, hecho que podría estar relacionado con la naturaleza cambiante de la materia prima (estado de madurez) y que podría ser analizado, con mayor número de muestras, en trabajos futuros. Recuérdese que, de acuerdo con lo expuesto en el apartado 2.1, las muestras M1 y M2 fueron extraídas en diciembre, las M3 y M5 - M8 lo fueron a lo largo de enero, y las M9 - M11 se tomaron en febrero.

3.2 Densidad y viscosidad dinámica de las muestras ensayadas

En la **Figura 4** se presentan los valores de densidad (ρ) y de viscosidad dinámica (μ), para todas las muestras ensayadas, en función de su contenido de impurezas (recuérdese que $c = (\text{volumen de impurezas} / \text{volumen de muestra}) \cdot 100\%$). Aunque en la práctica los ensayos se realizaron a diversas temperaturas (12 valores de T por cada tipo de muestra), en la citada **Figura 4** sólo se han tomado tres valores representativos de temperatura (aplicando interpolación polinómica) para no restar claridad y poder llevar a cabo un análisis más sencillo. Observando con cuidado los valores de densidad salta a la vista (a pesar de su dispersión) que ρ muestra una tendencia linealmente creciente a medida que aumenta el contenido de impurezas (c), pero con respecto a la temperatura muestra una tendencia decreciente (para $30 \text{ }^\circ\text{C}$ los valores de ρ son, en general, más pequeños que a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ó a $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Asimismo, la separación entre las líneas de ajuste $\rho = f(c)$ guarda cierta linealidad entre temperaturas y contenido de impurezas (la ordenada en el origen y la pendiente de dichas funciones de ajuste crecen linealmente con T), lo que sugiere que la relación general entre ρ , c y T podría ser de la forma:

$$\rho = (a_1 \cdot c + a_2) \cdot (a_3 \cdot T + a_4) \quad \text{ec. (1)}$$

En lo que se refiere a la viscosidad dinámica, si se hace un análisis homólogo al aplicado con ρ , se puede destacar que μ (ver parte derecha de la **Figura 4**) muestra también una tendencia linealmente creciente con el aumento del contenido de impurezas (c), y decreciente (pero no lineal) respecto de la temperatura. En este caso, la ordenada en el origen y la pendiente de las funciones de ajuste $\mu = f(c)$ no varían linealmente con T , lo que lleva a suponer que la relación general entre μ , c y T podría ser del tipo:

$$\mu = (b_1 \cdot c + b_2) \cdot (b_3/T + b_4), \quad \text{ec. (2)}$$

$$\text{o bien: } \mu = (b_1 \cdot c + b_2) \cdot (b_3/T^2 + b_4/T + b_5) \quad \text{ec. (3)}$$

En la literatura puede encontrarse que la densidad de diferentes tipos aceites, incluido el de oliva, puede ser ajustada con relaciones de tipo lineal respecto de la temperatura (Esteban et al., 2012; Gila, 2017), y que la viscosidad (dinámica y cinemática) puede estimarse con diferentes modelos basados en la ecuación de Arrhenius (Herschel, 1922; Esteban et al., 2012; Gila, 2017; Sahasrabudhe et al., 2017). Para rangos cortos de temperatura (como ocurre en este estudio), en

los que la pendiente de la función $\mu = f(T)$ no cambia demasiado respecto de T , puede ser viable acudir a expresiones de tipo polinómico que ofrecen un manejo más simple (Vallesquino y Sanchez, 2023), lo que justificaría el uso de ecuaciones alternativas. Por otro lado, es comentable que en los trabajos antes citados el orden de magnitud que presentan los valores de ρ y μ para el aceite de oliva puede considerarse similar al aquí mostrado, teniendo en cuenta que las propiedades físicas de este fluido pueden ser sensibles a factores agronómicos (y tecnológicos), y que los aceites tratados en este caso tienen impurezas. En este sentido, en lo referente al contenido de impurezas c y su relación con ρ , μ y T , cabe indicar que es un campo de trabajo poco estudiado si se tiene en cuenta la dificultad para encontrar referencias. No obstante, en (Vallesquino y Sanchez, 2023) se pone de manifiesto que la viscosidad dinámica puede ser ajustada con un modelo como el de la ecuación (2) cuando el aceite de oliva es ‘contaminado’ con cantidades crecientes de agua.

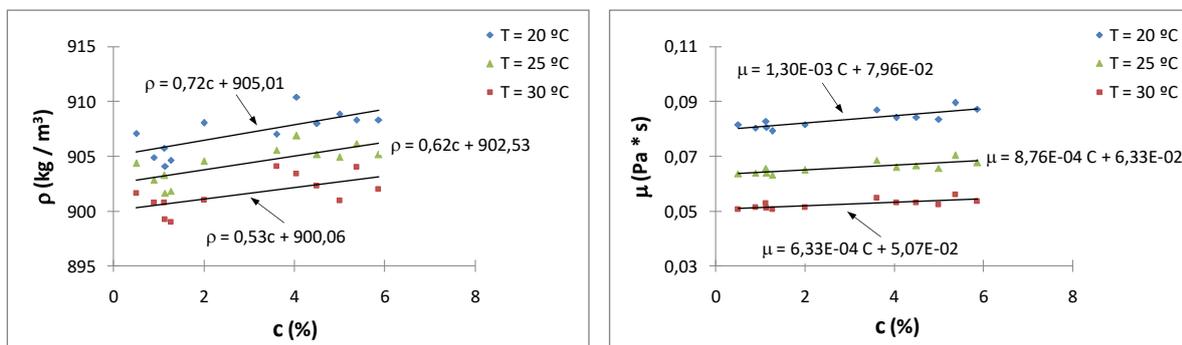


Figura 4. Relación entre contenido de impurezas y densidad (parte izquierda), y entre contenido de impurezas y viscosidad dinámica (parte derecha), para todas las muestras tomando de referencia sólo las temperaturas de 20 °C, 25 °C y 30 °C.

Considerando lo anterior, los datos de ρ y μ tomados en los ensayos realizados en este trabajo fueron ajustados a modelos como los mostrados en las ecuaciones (1), (2) y (3), resultando las siguientes expresiones (tómese R^2 como coeficiente de determinación y RMS como error medio cuadrático):

$$\rho = (0,957 \cdot c + 1423,276) \cdot (-4,030 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,644); \quad (\text{RMS} = 11,070 \text{ kg/m}^3, \quad R^2 = 0,402) \quad \text{ec. (4)}$$

$$\mu = (-1,437 \cdot 10^{-3} \cdot c - 0,094) \cdot (-18,403/T + 0,073); \quad (\text{RMS} = 3,252 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}, \quad R^2 = 0,982) \quad \text{ec. (5)}$$

$$\mu = (8,718 \cdot 10^{-3} \cdot c + 0,576) \cdot (-27,372/T^2 + 5,389/T - 0,062); \quad (\text{RMS} = 2,366 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}, \quad R^2 = 0,987) \quad \text{ec. (6)}$$

En la **Figura 5** se presentan los valores observados de ρ (parte izquierda) y de μ (parte derecha), a diferentes temperaturas y concentración de impurezas, junto con los modelos correspondientes. Nótese que en esta ocasión, y para no restar claridad a las gráficas, sólo se han tomado cuatro valores característicos de c que abarcan todo el rango de esta variable en los ensayos realizados (y que corresponden a las muestras M2, M4, M7 y M8). En el caso de la viscosidad μ se ha elegido la ec. (6) (aunque a efectos prácticos también sería válida la ec. (5), dadas las escasas diferencias) y para la densidad ρ se ha tomado la ec. (4). Salta a la vista que la bondad del ajuste propuesto para μ en la ec. (6) es mejor que el de la ec. (4) para ρ (de acuerdo también con los valores de R^2 y RMS antes indicados). La causa de este hecho se debe a la dispersión de los datos que muestran los valores de densidad, fruto de posibles errores ligados a la medida de volúmenes con las probetas empleadas (no mayores al 1,5%, pero suficientes para producir el efecto referido). Salvando el factor de escala de la **Figura 5**, que en este caso tiende a exagerar la magnitud de los errores de ρ , la tendencia principal pautada por la ec. (4) (en valores y pendiente) es coherente con los datos experimentales. Asimismo, la **Figura 5** viene a demostrar que para modelar de forma más precisa el efecto de c sobre ρ hace falta medir la densidad con menor

tolerancia (del orden del 0,1%) dado que las variaciones de densidad son poco sensibles a los cambios en el contenido de impurezas.

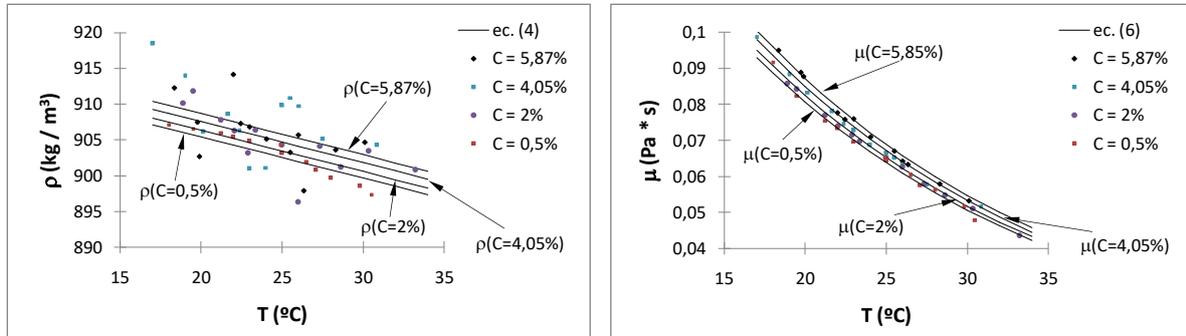


Figura 5. Relación entre ρ , T y c (parte izquierda), y entre μ , T y c (parte derecha), para cuatro muestras características con contenido de impurezas $c = 0,5\%$, $c = 2\%$, $c = 4,05\%$ y $c = 5,87\%$.

En lo referente a μ , en la **Figura 5** se muestra gráficamente que la ec. (6) es suficientemente robusta para predecir las posibles variaciones en los valores de viscosidad dinámica al variar la temperatura o el contenido de impurezas (en rangos como los aquí tratados). Este hecho pone de manifiesto que la viscosidad dinámica del aceite de oliva es una variable sensible a los cambios de temperatura (eso es bien conocido), pero también lo es a las variaciones en el contenido de impurezas que pueda tener. Este hecho es relevante pues, de forma similar a como se propone en (Vallesquino y Sánchez, 2023), combinando relaciones como las mostradas en las ecuaciones (1), (5) y (6) se podría llevar a cabo la calibración de funciones (ψ) del tipo:

$$c = \psi(\Delta p, Q, T, L, D), \quad \text{ec. (7)}$$

lo que en último término posibilita la estimación 'on line' del contenido de impurezas, presente en cualquier mosto oleoso (en proceso de producción), si se dispusiesen sobre línea algunos sensores que diesen información sobre los caudales (Q), temperaturas (T) y caídas de presión (Δp) existentes en los flujos circulantes.

4. CONCLUSIONES

Como caso de estudio, en este trabajo se ha medido la densidad (ρ) y la viscosidad dinámica (μ) de 12 fluidos diferentes, procedentes de una almazara convencional, y se ha podido constatar la variabilidad que presentan estas propiedades físicas en función de la temperatura (T) y del contenido de impurezas (c) de las muestras tomadas (véanse las ecuaciones (4) – (6)).

En el caso de ρ , la dependencia respecto de T y de c ha resultado ser de tipo lineal, pero esta dependencia es débil, dado que se necesitan grandes incrementos de temperatura o del contenido de impurezas para que la densidad varíe de forma apreciable. En este trabajo, sirva como referencia (ec. (4)) que la densidad ha experimentado variaciones del orden o inferiores al 1,5% cuando la temperatura ha variado entre 20 °C – 30 °C y el contenido de impurezas entre el 0,5% - 5,87%.

Para la viscosidad dinámica, la dependencia respecto de T y c ha resultado de distinta naturaleza, pudiendo ser de tipo cuadrático con T y simplemente lineal con c (véase la ec. (6)). En este contexto, el hecho de que la viscosidad varíe del orden del 50%, entre 20 °C – 30 °C para un valor de c dado, permite confirmar (como suele ser habitual con los fluidos) que μ depende fuertemente de T . Para el caso de c , la dependencia de μ no es tan fuerte, pero si es apreciable: cuando el contenido de impurezas varía del 0,5% al 5,87% la viscosidad dinámica de los fluidos oleosos estudiados puede sufrir variaciones del orden del 10% para un valor de T dado (mucho mayor que lo ocurrido con la densidad). En este escenario, la relación entre μ y c podía ser aprovechada para

poder determinar 'on line' el contenido de impurezas de un mosto de aceite dado, requiriendo solamente de la implementación sobre línea de algunos sensores simples.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo quisieran agradecer al personal de S.C.A. *Almazaras de la Subbética* su colaboración y ayuda, sin las que no habría sido posible llevar a cabo este estudio. Asimismo, su agradecimiento al Departamento de Bromatología y Tecnología de los Alimentos, de la Universidad de Córdoba, por las instalaciones y medios dispensados.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alba, J., 2008. Elaboración del aceite de olive virgen. In: Barranco, D., Fernandez-Escobar, R., Rallo, L. (Eds.), El cultivo del olivo. Madrid, Spain, pp. 657–697.
- Bejaoui, M.A., Gila, A., Allouche, Y., Aguilera, M.P., Jiménez, A., Beltrán, G. (2013). Eficiencia de la clarificación del aceite de oliva virgen mediante decantación y centrifugación. Actas del XVI Simposio Científico-Técnico del Aceite de Oliva – Expoliva 2013. Jaén (España), IND – 36, 1– 6.
- Dammak, I., Neves, M., Souilem, S., Isoda, H., Sayadi, S., & Nakajima, M. (2015). Material balance of olive components in virgin olive oil extraction processing. Food Science and Technology Research, 21(2), 193-205.
- Esteban, B., Riba, J. R., Baquero, G., Rius, A., & Puig, R. (2012). Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils. Biomass and bioenergy, 42, 164-171.
- Gila, A. (2017). Clarificación de los aceites de oliva vírgenes y su efecto en las características físico-químicas y sensoriales (Doctoral dissertation, Universidad de Jaén).
- Hermoso, M., González, J., Uceda, M., García-Ortiz, A., Morales, J., Frías, L., Fernández A. (1996). Elaboración de aceite de calidad. Obtención por el sistema de dos fases. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.
- Herschel, W. H. (1922). The change in viscosity of oils with the temperature. Industrial & Engineering Chemistry, 14(8), 715-722.
- Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G.V. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- IOC. (2019). Trade standard applying to olive oils and olive pomace oils. COI/T.15/NC No 3/ Rev.14/2019.
- Mafart, P., Béliard, E. (1994). Ingeniería Industrial Alimentaria (Vol. II). Acribia. Zaragoza.
- Sahasrabudhe, S. N., Rodríguez-Martínez, V., O'Meara, M., Farkas, B. E. (2017). Density, viscosity, and surface tension of five vegetable oils at elevated temperatures: Measurement and modeling. International Journal of Food Properties, 20(sup2), 1965-1981.
- Singh, P.R. y Heldman, D.R. (2009). Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. Acribia. Zaragoza
- Steffe, J. F. (1996). Rheological methods in food process engineering. Freeman press.
- Tirado, A., Vallesquino, P. (Dir). (2020). Estudio de la densidad y la viscosidad de fluidos oleosos procedentes de almazara. Trabajo Fin de Grado. ETSIAM. Universidad de Córdoba.
- Uceda, M., Jiménez, A., Beltrán, G. (2006). Trends in olive oil production. Grasas Aceites, 57 (1), 25-31.
- Vallesquino, P., Sanchez, M. (2023). Un método para la determinación del contenido de agua de emulsiones de agua en aceite de oliva. Actas del XXI Simposio Científico-Técnico del Aceite de Oliva – Expoliva 2023. Jaén (España). Enviado para su publicación.