

# Estudio comparativo de la precisión en la determinación del número de Avogadro por diferentes métodos

## Introducción

La constante (o número) de Avogadro es el número de entidades elementales (normalmente átomos o moléculas) que podemos encontrar en un mol, es decir, el número de átomos contenidos en 12 gramos de carbono-12. Su valor bibliográfico es de  $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (Mohr, Taylor y Newell, 2012).

Mi curiosidad sobre la constante de Avogadro despertó cuando estábamos estudiando el tema de estequiometría, donde dicho número aparece en muchas ocasiones. Investigué acerca de la obtención de la constante, llegando a descubrir que se pueden llevar a cabo distintos procedimientos para conseguir dicho objetivo, lo que acrecentó mi curiosidad. Entre ellos, escogí los métodos de electrólisis del agua, electrodeposición y la monocapa de ácido oleico, pues consideré que serían los más adecuados para responder a las preguntas de investigación que se van a plantear en el trabajo.

El último de estos métodos parece el menos fiable de todos ellos, pues conlleva una carga importante de posibles fuentes de error, de ahí que me parezca interesante conocer su grado de fiabilidad para determinar el número de Avogadro.

## Pregunta de investigación

Puesto que hay múltiples métodos para determinar la constante de Avogadro, será importante valorar su eficacia teniendo en cuenta qué procedimiento proporciona el valor de del número de Avogadro más aproximado al bibliográfico. Es por esto que además de determinar la constante de Avogadro surge la siguiente cuestión:

*¿Cuál es el método más eficaz para calcular la constante de Avogadro?*

## Fundamentos teóricos

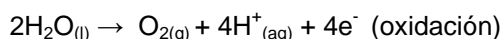
### Procedimientos electrolíticos

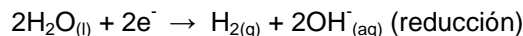
Estos procedimientos se basan en la aplicación de una corriente eléctrica continua para producir una reacción química mediante dos electrodos, tanto en agua, disolución acuosa o en otro líquido, con la intención de descomponer el agua, la sal que está disuelta en ella o el líquido que se esté utilizando.

En el cátodo (polo negativo de la electrólisis) tendrá lugar el proceso de reducción, por lo que se depositarán en él, los cationes, y en el ánodo (polo positivo para la electrólisis) tendrá lugar la oxidación, y por lo tanto, ahí se depositarán los aniones.

En este trabajo se estudiarán la **electrólisis del agua** y la **electrodeposición**:

La **electrólisis del agua** se consigue mediante la aplicación de la corriente eléctrica para descomponer la molécula del agua en  $\text{O}_{2(g)}$  y  $\text{H}_{2(g)}$ , lo que da el siguiente proceso redox (Brown y Ford, n.d, p.448):





Que da la siguiente ecuación ajustada:  $2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)}$

Siguiendo los principios de conservación de la masa y la ecuación de los gases ideales, y a partir de las cargas que aparecen en la estequiometría del proceso de reducción, podremos obtener el número de Avogadro.

Lo primero que hay que calcular es la carga total que atraviesa la solución, que se puede hallar mediante la fórmula  $Q_{\text{total}} = I \cdot t$ , donde “Q” es la carga medida en culombios (variable dependiente), “I” la intensidad de la corriente que pasa por el circuito medida en amperios (variable controlada), y “t” es el tiempo en segundos (variable dependiente).

El número de moles producidos, tanto de  $\text{O}_2$  como de  $\text{H}_2$ , se puede hallar mediante la Ecuación de Estado de los Gases Ideales ( $n_{\text{moles}} = RT/PV$ ), donde “n” es el número de moles, “R” es la constante de gas medida en L·atm/K·mol, “T” la temperatura en Kelvin, “P” la presión en atmósferas y “V” el volumen en litros. De esta forma, aparece otra variable dependiente a medir (el volumen), que depende del tiempo, ya que tanto la temperatura como la presión a la que se realiza el experimento se pueden medir con un termómetro y un barómetro, respectivamente (variables controladas).

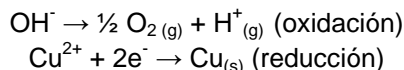
Por la ecuación de la reducción del agua podemos deducir que son necesarios 2 electrones por cada mol de hidrógeno, por lo que el número de electrones necesarios para producir “n” moles de  $\text{H}_2$  es:

$$n^{\circ}\text{e}^- = 2 \cdot n\text{H}_2$$

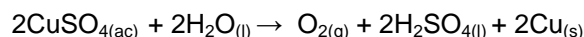
Para obtener la carga de un mol de electrones se divide la carga total previamente calculada entre el número de electrones. Por último, dividimos la carga de un mol de electrones entre la carga de un único electrón, obteniendo así el número de Avogadro:

$$\text{Número de Avogadro} = Q_{\text{total}} / Q_e \cdot n^{\circ}\text{e}^-$$

El método de **electrodeposición** se diferencia del anterior en que se usa una disolución acuosa sulfato de cobre (II), por lo que el proceso redox será distinto. En el ánodo se oxida  $\text{H}_2\text{O}$ , mientras que el  $\text{Cu}^{2+}$  se reduce en el cátodo dando las siguientes reacciones (Brown y Ford, n.d, p.450):



Además se formará oxígeno, que al producirse en estado gaseoso se escapa al medio, y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), dando lugar a una disolución acuosa de carácter ácido, por lo que la reacción quedaría así:



Al igual que en la electrólisis del agua, en el método de electrodeposición hay que calcular la carga total mediante la ecuación  $Q = I \cdot t$ . Como en el anterior procedimiento, la variable dependiente será la carga, la independiente el tiempo y la controlada la intensidad.

Después de esto, se procede a calcular el número de electrones que tomaron parte en el proceso de reducción de la producción del cobre, para posteriormente calcular el número de átomos que se forman de este:

$$n^{\circ}e^{-} = Q_{\text{total}} / Q_e$$

$$n^{\circ} \text{ átomos Cu} = n^{\circ}e^{-} / 2$$

Como se ve, las ecuaciones son similares a las del anterior método también en este caso, solamente variando en qué lado de la ecuación se colocan los términos, pues en este experimento las incógnitas a despejar son distintas.

Para acabar de determinar el número de Avogadro dividimos el número de átomos de Cu entre el número de moles de Cu depositados en el cátodo, que se puede hallar fácilmente dividiendo la masa de Cu que aparece entre su masa molar:

$$\text{Número de Avogadro} = n^{\circ} \text{ de átomos Cu} \cdot M_m / m$$

### **Método de la monocapa de ácido oleico**

El método de la **monocapa de ácido oleico** fue ideado y popularizado por Irving Langmuir en las primeras décadas del siglo XX). A pesar de no poder medir un tamaño tan pequeño como el de una molécula y un número tan grande como el de Avogadro por procedimientos normales, somos capaces de obtener una estimación de sus órdenes de magnitud. Una gota de ácido oleico sobre el agua se extiende formando una película sobre la superficie de esta. Si la superficie es lo suficientemente grande, se formará una capa molecular, lo que nos permitirá determinar el número de Avogadro. El ácido oléico ( $C_{17}H_{33}-COOH$ ) se dispone debido así a que está formado por un componente alquílico (la cadena de carbonos  $C_{17}H_{33}$ , que es hidrófoba, y el radical ácido  $COOH$ , que es hidrófilo), por lo que sus moléculas se colocan de manera que el radical alquilo -R se dirige al exterior. La capa formada será monomolecular si la superficie acuosa es mayor que lo que precisan las moléculas para orientarse, por lo que el ácido oleico necesario es muy poco. Para conseguir tal cantidad, este ha de ser disuelto en un disolvente volátil para que, al precipitar la gota en el agua, el disolvente se evapore rápidamente. Es por esto que la disolución necesita ser muy diluida, y el disolvente, el etanol o uno similar.

Si se quiere determinar el número de Avogadro mediante este método, se ha de conocer el tamaño de la gota de ácido oleico y el volumen contenido de este en la capa que se forma. De esta forma se puede hallar la dimensión aproximada de una molécula de aceite. Conociendo también la masa molar y la densidad del ácido oleico, podremos obtener el número de Avogadro:

El primer cálculo que tenemos que realizar es la obtención de la superficie "S" del círculo que se forma en  $cm^2$ , por lo que su diámetro "D" (variable 1) se medirá en cm:

$$S = (\pi \cdot D)^2 / 4$$

El volumen de ácido oleico (variable 2), dado en mL o  $cm^3$ , que hay en una gota de la disolución de aceite y etanol se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_{\text{gota aceite}} = V_{\text{gota disolución}} \cdot (V_{\text{total aceite}} / V_{\text{total disolución}})$$

Puesto que se considera que el círculo es una capa monomolecular de aceite, el círculo es realmente un cilindro de base "S" que ya conocemos y de altura "h", que coincide con la altura de la molécula de aceite. Si se entiende que la molécula se dispone en forma cubo, es posible hallar el volumen de la molécula de aceite con dos sencillas fórmulas geométricas:

$$V_{\text{gota aceite}} = S \cdot h$$

$$V_{\text{molécula aceite}} = h^3$$

Una vez tenemos el volumen de aceite añadido en la disolución y el volumen de una molécula de aceite, se puede obtener el número de moléculas de aceite en la capa dividiendo de la siguiente manera:

$$n^{\circ} \text{ moléculas de aceite} = V_{\text{total aceite}} / V_{\text{molécula aceite}}$$

Ahora solo quedaría hallar el  $n^{\circ}$  de moles de ácido oleico en la capa, que se obtiene a partir de:

$$n^{\circ} \text{ moles de aceite} = \text{masa de ácido oleico añadido} / \text{masa molar del ácido oleico}$$

La masa de aceite fue calculada mediante la fórmula  $d_{\text{aceite}} = m_{\text{aceite}} / V_{\text{total aceite}}$ , pues la densidad “d” puede ser obtenida a través de consulta bibliográfica y el volumen total de aceite en la disolución ya se hallado previamente. Al igual que con la densidad, la masa molar del aceite también fue sacada de la bibliografía (Solá, Hernández y Fernández, 2016).

Para concluir el cálculo de la constante de Avogadro, se divide el número de moléculas de ácido oleico entre el  $n^{\circ}$  de moles:

$$\text{Número de Avogadro} = n^{\circ} \text{ moléculas aceite} / n^{\circ} \text{ moles aceite}$$

## Metodología

A continuación se explican los procedimientos por los que se ha determinado la constante de Avogadro. En ninguno de los experimentos se tuvieron que tomar medidas de precaución especiales, ya que los materiales utilizados no son peligrosos ni para el ser humano ni para el medio ambiente.

### Electrolisis del agua

#### Material empleado:

Agua	Soporte	Voltámetro de Hofmann	Amperímetro
Cronómetro	Barómetro	Termómetro	Fuente de alimentación

Antes de comenzar el proceso de electrólisis es necesario medir la presión del laboratorio y la temperatura a la que se está realizando el experimento, además de llenar el voltámetro con agua. Después de esto, se conecta los cables de la fuente de alimentación en ambos extremos del voltámetro de Hofmann. A continuación se abren las llaves situadas en la parte superior del voltámetro durante 30 segundos y luego se cierran. A partir de este momento, se van anotando los volúmenes de  $O_2$  y  $H_2$  formados y la intensidad de la corriente, ambas en intervalos de 30 segundos, hasta llegar a 20 minutos. Después de que transcurra el tiempo, podemos verter el agua por el desagüe, ya que no transporta ningún residuo tóxico.



1: Disposición del voltámetro de Hofmann.

## Electrodeposición

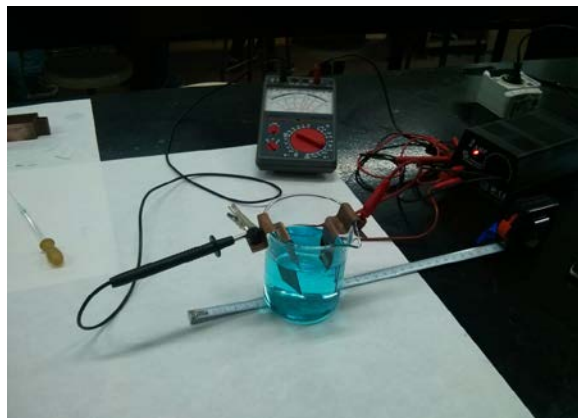
### Material empleado:

Dos electrodos de cobre	Disolución de sulfato de cobre (II) 0,1M	Agua destilada	Ácido clorhídrico y agua oxigenada	Cronómetro	Secador	Fuente de alimentación
Probeta	Vasos de precipitados	Vidrio de reloj	Matraz kitasato	Tapón agujereado	Papel de filtro	Trompa de vacío

Para comenzar a realizar el experimento hubo que limpiar los electrodos de cobre con ácido clorhídrico, pues pueden estar oxidados por la superficie y alteraría el proceso redox. A continuación se enjuagaron los electrodos con agua oxigenada para eliminar restos de HCl y por último se secaron para no dejar rastro de  $H_2O_2$ . Con esto se consigue que el electrodo contenga la menor impureza posible.

Con los electrodos ya limpios, se pesó el que actúa de cátodo, pues en él se va a depositar el cobre que posteriormente se utiliza para calcular el número de Avogadro. Una vez hecho esto, se procedió a preparar la cuba electrolítica. Para ello, fue necesario echar 400mL de  $CuSO_4$  0,1M en un vaso de precipitados, previamente medidos en una probeta. Después de esto, se dispusieron los electrodos como aparecen en la segunda imagen del apéndice, y se conectaron a una fuente de alimentación. A su vez, fue necesario intercalar un amperímetro para conocer la intensidad que circulaba por el circuito. Ya dispuesto todo, se encendió la fuente de alimentación, dejándola así durante 10 minutos y controlando la intensidad del circuito en intervalos de 1 minuto. Pasado este tiempo, se retiró el cátodo cuidadosamente y se dejó secar.

Puesto que una pequeña parte del cobre se separó del electrodo, se filtró la disolución final empleando un matraz kitasato, papel de filtro, un tapón agujereado y una trompa de vacío. Finalmente, se pesaron el cátodo y los restos de cobre filtrados, obteniendo así la cantidad total de cobre por diferencia de masa. Cuando ya se ha pesado el cobre, podemos proceder a guardarlo en un recipiente diseñado para albergar sustancias químicas. El sulfato de cobre empleado se puede verter con la ayuda de un embudo para ser utilizado en otra ocasión.



2: Electrodos colocados para la electrodeposición

### **Monocapa de ácido oleico**

#### **Material empleado:**

Aceite	Polvos de talco	Bureta	Etanol	Matraz erlenmeyer o vaso de precipitados	Matraz aforado (500mL)	Probeta
Soporte	Pinzas de sujeción	Embudo	Cubeta	Hoja de papel	Agua	Vernier

El procedimiento seguido comienza con la colocación de una bureta sujeta en un soporte mediante unas pinzas de sujeción en la que se vierte cierta cantidad de aceite. Debajo de ella se sitúa un matraz erlenmeyer o un vaso de precipitados (en este trabajo utilicé el segundo), en el que se echarán 250 gotas del aceite contenido en la bureta. Previamente se pesó el vaso de precipitados, pues para nuestro objetivo es necesario conocer la masa de las gotas. Mediante la diferencia de masa, se halla lo que pesan las 250 gotas en total, y dividiendo esta masa y el volumen utilizado de aceite (visible en la bureta) entre 250, se averiguan la masa y el volumen de cada gota.

El siguiente paso es echar una simple gota de aceite en el matraz aforado de 500mL. A continuación, se miden 150mL de etanol en una probeta, que posteriormente son vertidos en el matraz mediante la ayuda de un embudo. Se remueve el matraz para facilitar la disolución del aceite, y una vez finalizada, se enrasa el matraz con más etanol. Una vez terminado, se realizará exactamente lo mismo que con el aceite, aunque usando otra bureta y otro vaso de precipitados, por lo que el objetivo es hallar la masa y el volumen de cada gota de disolución.

Después de haber realizado los pasos anteriores, se procede a llenar de agua casi hasta el borde una cubeta, sobre la que se esparcirá cuidadosamente polvos de talco soplando y ayudándonos de un papel. Cuando el agua se encuentre en reposo, se añade una gota de la disolución de ácido oleico en el centro de la cubeta con la ayuda de una bureta. La gota de disolución se irá extendiendo entre los polvos de talco, y el etanol, al ser un líquido volátil, se evaporará dejando la monocapa de ácido oleico, que finalmente forma un círculo fácilmente medible con un vernier. Al terminar el experimento, se pueden verter todas las sustancias por el desagüe puesto que ninguna de ellas es tóxica.



4: Bureta y cubeta con la primera monocapa de aceite en su centro.

## Datos brutos

A continuación se disponen los datos correspondientes a cada experimento con sus respectivas incertidumbres:

### Electrolisis del agua

En la primera tabla aparecen los datos obtenidos de la intensidad y de los volúmenes de  $O_2$  y  $H_2$  en intervalos de un minuto. En los laterales también se muestran los errores sistemáticos debidos a los aparatos empleados para la toma de medidas.

t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I (A) $\pm 0,01$	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
V $O_2$ (mL) $\pm 0,2$	0,0	0,6	1,2	1,8	2,2	2,8	3,4	4,0	4,4	5,0	5,6
V $H_2$ (mL) $\pm 0,2$	0,0	1,2	2,4	3,6	4,4	5,6	6,6	7,6	8,8	10,0	11,0

t (min)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Media
I (A) $\pm 0,01$	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
V $O_2$ (mL) $\pm 0,2$	6,2	6,8	7,2	7,8	8,4	8,8	9,4	10,0	10,6	11,4	
V $H_2$ (mL) $\pm 0,2$	12,0	13,2	14,0	15,4	16,6	17,4	18,6	19,6	20,6	21,4	

La siguiente tabla muestra todos los datos procesados que se precisan para obtener el número de Avogadro:

	I (A)	t (s)	Q (C)	T (K)	P (atm)	Nº mol H <sub>2</sub>	Nº mol O <sub>2</sub>	Nº e <sup>-</sup> O <sub>2</sub>	Nº e <sup>-</sup> H <sub>2</sub>	Q mol e <sup>-</sup> O <sub>2</sub>	Q mol e <sup>-</sup> H <sub>2</sub>	N <sub>A</sub> O <sub>2</sub> (mol <sup>-1</sup> )	N <sub>A</sub> H <sub>2</sub> (mol <sup>-1</sup> )
<b>Valor total</b>	0,14	1200	168	293	0,98	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-23}$	$6,0 \cdot 10^{-23}$
<b>Incertidumbre (±)</b>	0,01	1	12	1	0,01	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-23}$	$1,0 \cdot 10^{-23}$

### Electrodeposición

En la primera tabla se muestra el seguimiento de la intensidad de la corriente por intervalos de 1 minuto. La segunda tabla muestra los datos obtenidos a través del experimento y los posteriormente calculados:

t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
<b>I (A) ± 0,01</b>	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

	M total (g)	M vidrio (g)	M Cu (g)	Moles Cu (mol)	I (A)	t (s)	Q (C)	Nº e <sup>-</sup>	Nº átomos Cu	N <sub>A</sub> (mol <sup>-1</sup> )
<b>Valor total</b>	3,566	3,445	0,121	0,002	0,36	600	220	$1,4 \cdot 10^{21}$	$6,8 \cdot 10^{20}$	$3,5 \cdot 10^{23}$
<b>Incertidumbre (±)</b>	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	1	6	$0,1 \cdot 10^{21}$	$0,6 \cdot 10^{20}$	$0,3 \cdot 10^{23}$

### Monocapa de ácido oleico

Para tratar de minimizar el error en el diámetro de la capa oleica, se hicieron varias medidas. Algunas capas se deformaron demasiado, haciendo imposible su medida, por lo que en la tabla se recogen las que formaron un círculo lo más perfecto posible:

	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Media
<b>Diámetro capa (mm)</b>	30,4	30,2	32,5	32,4	31,4
<b>Incertidumbre (±)</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

En la tabla inferior se recogen los datos del experimento:



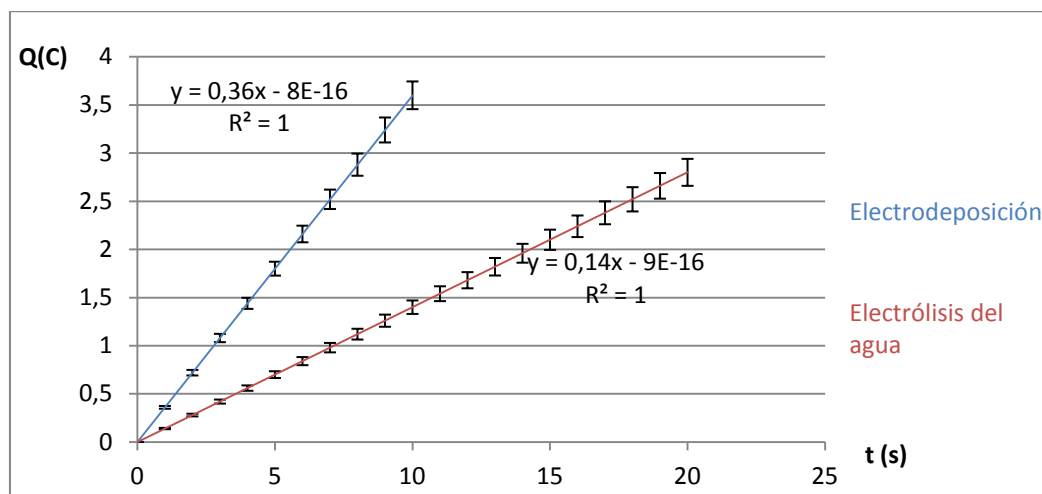
	$\rho$ ac. (g/mL)	Mm. ac.	S capa (cm <sup>2</sup> )	V tot. ac. (mL)	V gota ac. (mL)	M tot. ac. (g)	M gota ac. (g)	V tot. disol. (mL)	V gota disol. (mL)
<b>Valor total</b>	0,89	282	773	7,5	$3,0 \cdot 10^{-2}$	6,717	$2,7 \cdot 10^{-2}$	8,0	0,032
<b>Incerti dumbre (<math>\pm</math>)</b>	0,01	1	5	0,1	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,001	$4,0 \cdot 10^{-6}$	0,1	0,001

	V capa ac. (mL)	h moléc. ac. (cm)	V moléc. ac. (mL)	M ac. disol. (g)	Nº moles ac. disol.	Nº moléc. ac. disol.	N <sub>A</sub> (mol <sup>-1</sup> )
<b>Valor total</b>	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-21}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{16}$	$8,5 \cdot 10^{22}$
<b>Incerti dumbre (<math>\pm</math>)</b>	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$0,7 \cdot 10^{-8}$	$0,5 \cdot 10^{-21}$	$0,5 \cdot 10^{-5}$	$0,2 \cdot 10^{-7}$	$0,6 \cdot 10^{16}$	$1,9 \cdot 10^{22}$

## Datos procesados

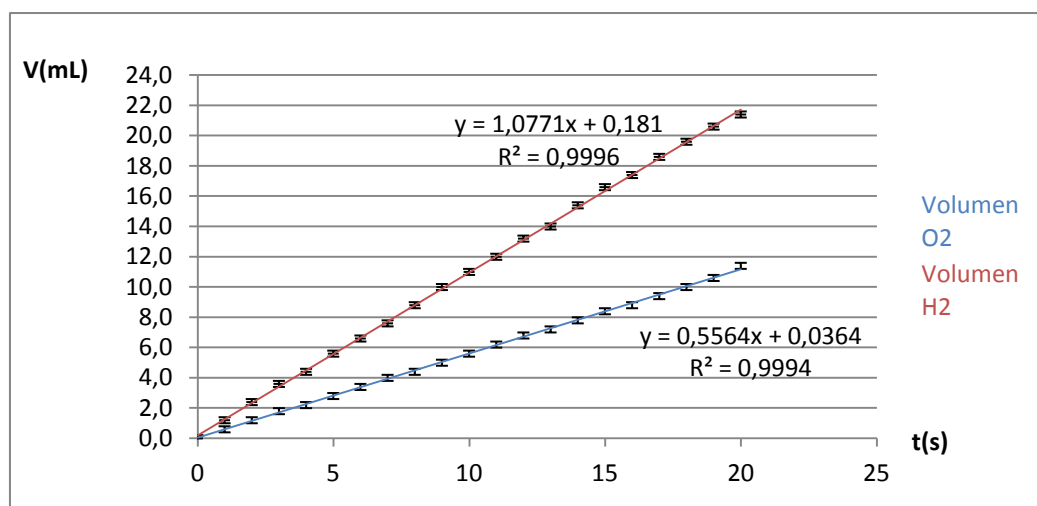
Después de haber obtenido los datos, se realizaron gráficas que mostrasen las variaciones medibles durante las tres experiencias. Mientras que en los dos primeros experimentos se pueden realizar gráficas de este tipo, en el método de la capa de ácido oleico es imposible, pues el experimento no da lugar a tratar variables dependientes e independientes.

En las tablas de datos podemos apreciar que la intensidad de la corriente en los métodos basados en la electrólisis se mantuvo constante durante todo el proceso. Esta constancia permitió hacer una relación entre “Q” (variable dependiente) respecto al tiempo (variable independiente), ya que la intensidad actuaría como la pendiente de una recta  $y=a+bx$ . Después de haber realizado la gráfica, se puede ver que esta refleja las rectas esperadas.



Gráfica 1: Carga frente al tiempo en los métodos de electrólisis del agua y de electrodeposición. En el eje x, el tiempo (s), en el eje y, la carga (Q).

Por último, se halló interesante observar cómo varía el volumen de  $H_2$  y  $O_2$  frente al tiempo. Comprobándose como el volumen de hidrógeno es el doble del volumen de oxígeno, tal y como se esperaba. Esto se representa en la siguiente gráfica:



Gráfica 2: Producción de volumen de  $O_2$  y  $H_2$  respecto al tiempo en el método de la electrolisis del agua. En el eje x, el tiempo (s), en el eje y, el volumen (L).

## Análisis de datos

### Electrolisis del agua

Además de comentar la constancia de la intensidad en el experimento, ya mencionado en el apartado anterior, es interesante destacar que hay ligeras variaciones en la producción de volumen por cada intervalo, es decir, que la producción no se mantiene constante, aunque esto que probablemente se deba a acumulaciones de errores sistemáticos en la medición de los datos. Esto se refleja perfectamente en la gráfica 2, donde se percibe la forma de una línea recta con leves fluctuaciones. Aún así, se puede intuir que la formación de ambas sustancias sigue un patrón constante.

La incertidumbre en el número de Avogadro en ambos casos es del  $\pm 10\%$ . A pesar de esto, los cálculos se aproximan bastante al valor bibliográfico de la constante, llegando a ser resultados casi excelentes, por lo que podemos considerar la experiencia como exitosa.

### Electrodeposición

Al igual que en el anterior experimento, la intensidad de la corriente se mantuvo constante. Sin embargo, en este caso se percibieron leves cambios en ella, aunque de un intervalo tan corto que no se reflejan en los datos anotados, y por lo tanto tampoco afectan a la gráfica 1, donde se percibe un aumento completamente lineal de la carga y sin apenas error (lo mismo ocurre con la electrolisis del agua).

Mediante el método de electrodeposición la incertidumbre en el número de Avogadro es de  $\pm 10\%$ , y respecto al valor bibliográfico de la constante también se ha conseguido una precisión bastante buena, por lo que el método de electrodeposición también se puede calificar de exitoso.

### • Monocapa de ácido oleico

Si bien no es malo, el resultado obtenido mediante este método es distante del valor real del número de Avogadro, por lo que se cumplen las expectativas que se tenían al comenzar el trabajo. La incertidumbre en el número de Avogadro es la mayor entre todos los métodos, siendo de un  $\pm 22\%$ , por lo que es el experimento más impreciso en todos los casos.

## Conclusiones y evaluación

La sensación al terminar todos los experimentos se puede calificar de satisfactoria, pues todos los métodos han sido completados sin problemas y con buenos resultados. Como se había mencionado al comienzo del trabajo, el método de la monocapa de ácido oleico fue el más lejano al valor bibliográfico de la constante de Avogadro, por lo que las expectativas iniciales fueron reafirmadas.

Además de emplear aparatos más precisos en el trabajo, los resultados podrían haber sido mejorados haciendo seguimientos en intervalos más breves de tiempo para encontrar variaciones, por ejemplo, en la intensidad de la corriente. Otra posible causa de error evitable en el trabajo es la pérdida de cobre en el método de electrodeposición. A pesar de haber filtrado, es muy difícil extraer el cobre al completo, por lo que parte de este se quedará en la disolución. Por último, se debe destacar la imprecisión en la forma circular de las monocapas de ácido oleico, que hace complicado determinar con gran exactitud sus diámetros. Esto se podría mejorar tomando más medidas para conseguir una media del diámetro más exacta.

## Bibliografía:

Brown, C. y Ford, M. (n.d.). *Higher level chemistry*. 2nd ed. p.448-450.

## Enlaces consultados

Mohr, P., Taylor, B. y Newell, D. (2012). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010. *Reviews of Modern Physics*, [online] 84(4), pp.1527-1605. Disponible en: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/codata.pdf> [Consultado: 1-12-2015].

Solá, J., Hernández, J. y Fernández, R. (2016). *Aproximación al número de Avogadro*. [online] Heurema.com. Disponible en: <http://www.heurema.com/PQ1.htm> [Consultado:10-12- 2015].

## Estudio comparativo de la precisión en la determinación del número de Avogadro por diferentes métodos

### Introducción

La constante (o número) de Avogadro es el número de entidades elementales (normalmente átomos o moléculas) que podemos encontrar en un mol, es decir, el número de átomos contenidos en 12 gramos de carbono-12. Su valor bibliográfico es de  $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (Mohr, Taylor y Newell, 2012).

Mi curiosidad sobre la constante de Avogadro despertó cuando estábamos estudiando el tema de estequiometría, donde dicho número aparece en muchas ocasiones. Investigué acerca de la obtención de la constante, llegando a descubrir que se pueden llevar a cabo distintos procedimientos para conseguir dicho objetivo, lo que acrecentó mi curiosidad. Entre ellos, escogí los métodos de electrólisis del agua, electrodeposición y la monocapa de ácido oleico, pues consideré que serían los más adecuados para responder a las preguntas de investigación que se van a plantear en el trabajo.

#### Comentario [p1]:

CP: Hay indicios de curiosidad derivada de su aprendizaje en clase.

El último de estos métodos parece el menos fiable de todos ellos, pues conlleva una carga importante de posibles fuentes de error, de ahí que me parezca interesante conocer su grado de fiabilidad para determinar el número de Avogadro.

#### Comentario [p2]:

CP: El alumno parece tener una justificación personal para el tema elegido, que demuestra interés, iniciativa y creatividad, además de aplicar los conceptos propios de la materia. Se demuestra pensamiento independiente sobre la pregunta de investigación.

### Pregunta de investigación

Puesto que hay múltiples métodos para determinar la constante de Avogadro, será importante valorar su eficacia teniendo en cuenta qué procedimiento proporciona el valor de del número de Avogadro más aproximado al bibliográfico. Es por esto que además de determinar la constante de Avogadro surge la siguiente cuestión:

*¿Cuál es el método más eficaz para calcular la constante de Avogadro?*

#### Comentario [p3]:

CP: Se razonan los motivos de la pregunta de investigación, lo que sugiere que la pregunta está centrada.

### Fundamentos teóricos

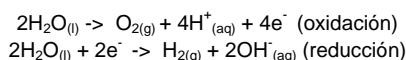
#### Procedimientos electrolíticos

Estos procedimientos se basan en la aplicación de una corriente eléctrica continua para producir una reacción química mediante dos electrodos, tanto en agua, disolución acuosa o en otro líquido, con la intención de descomponer el agua, la sal que está disuelta en ella o el líquido que se esté utilizando.

En el cátodo (polo negativo de la electrólisis) tendrá lugar el proceso de reducción, por lo que se depositarán en él, los cationes, y en el ánodo (polo positivo para la electrólisis) tendrá lugar la oxidación, y por lo tanto, ahí se depositarán los aniones.

En este trabajo se estudiarán la **electrólisis del agua** y la **electrodeposición**:

La **electrólisis del agua** se consigue mediante la aplicación de la corriente eléctrica para descomponer la molécula del agua en  $\text{O}_{2(g)}$  y  $\text{H}_{2(g)}$ , lo que da el siguiente proceso redox (Brown y Ford, n.d, p.448):



#### Comentario [p4]:

EX: En este apartado se detallan la información de referencia, que resulta adecuada y pertinente, sirviendo para comprender mejor el contexto de la investigación.

#### Comentario [p5]:

EX: La fundamentación teórica es adecuada al nivel de contenidos del programa y las fuentes bibliográficas son apropiadas.

Que da la siguiente ecuación ajustada:  $2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)}$

Siguiendo los principios de conservación de la masa y la ecuación de los gases ideales, y a partir de las cargas que aparecen en la estequiometría del proceso de reducción, podremos obtener el número de Avogadro.

Lo primero que hay que calcular es la carga total que atraviesa la solución, que se puede hallar mediante la fórmula  $Q_{\text{total}} = I \cdot t$ , donde "Q" es la carga medida en culombios (variable dependiente), "I" la intensidad de la corriente que pasa por el circuito medida en amperios (variable controlada), y "t" es el tiempo en segundos (variable dependiente).

El número de moles producidos, tanto de  $\text{O}_2$  como de  $\text{H}_2$ , se puede hallar mediante la Ecuación de Estado de los Gases Ideales ( $n_{\text{moles}} = RT/PV$ ), donde "n" es el número de moles, "R" es la constante de gas medida en L·atm/K·mol, "T" la temperatura en Kelvin, "P" la presión en atmósferas y "V" el volumen en litros. De esta forma, aparece otra variable dependiente a medir (el volumen), que depende del tiempo, ya que tanto la temperatura como la presión a la que se realiza el experimento se pueden medir con un termómetro y un barómetro, respectivamente (variables controladas).

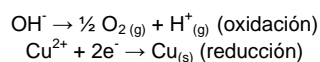
Por la ecuación de la reducción del agua podemos deducir que son necesarios 2 electrones por cada mol de hidrógeno, por lo que el número de electrones necesarios para producir "n" moles de  $\text{H}_2$  es:

$$n^\circ e^- = 2 \cdot n\text{H}_2$$

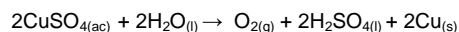
Para obtener la carga de un mol de electrones se divide la carga total previamente calculada entre el número de electrones. Por último, dividimos la carga de un mol de electrones entre la carga de un único electrón, obteniendo así el número de Avogadro:

$$\text{Número de Avogadro} = Q_{\text{total}} / Q_e \cdot n^\circ e^-$$

El método de **electrodeposición** se diferencia del anterior en que se usa una disolución acuosa sulfato de cobre (II), por lo que el proceso redox será distinto. En el ánodo se oxida  $\text{H}_2\text{O}$ , mientras que el  $\text{Cu}^{2+}$  se reduce en el cátodo dando las siguientes reacciones (Brown y Ford, n.d, p.450):



Además se formará oxígeno, que al producirse en estado gaseoso se escapa al medio, y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), dando lugar a una disolución acuosa de carácter ácido, por lo que la reacción quedaría así:



Al igual que en la electrólisis del agua, en el método de electrodeposición hay que calcular la carga total mediante la ecuación  $Q = I \cdot t$ . Como en el anterior procedimiento, la variable dependiente será la carga, la independiente el tiempo y la controlada la intensidad.

Después de esto, se procede a calcular el número de electrones que tomaron parte en el proceso de reducción de la producción del cobre, para posteriormente calcular el número de átomos que se forman de este:

$$n^\circ e^- = Q_{\text{total}} / Q_e$$

**Comentario [p6]:**

EX: La justificación teórica para la obtención del nº de Avogadro a partir de la electrolisis del agua está bien fundamentada.

$$n^{\circ} \text{ átomos Cu} = n^{\circ} e^{-} / 2$$

Como se ve, las ecuaciones son similares a las del anterior método también en este caso, solamente variando en qué lado de la ecuación se colocan los términos, pues en este experimento las incógnitas a despejar son distintas.

Para acabar de determinar el número de Avogadro dividimos el número de átomos de Cu entre el número de moles de Cu depositados en el cátodo, que se puede hallar fácilmente dividiendo la masa de Cu que aparece entre su masa molar:

$$\text{Número de Avogadro} = n^{\circ} \text{ de átomos Cu} \cdot M_m / m$$

### Método de la monocapa de ácido oleico

El método de la **monocapa de ácido oleico** fue ideado y popularizado por Irving Langmuir en las primeras décadas del siglo XX). A pesar de no poder medir un tamaño tan pequeño como el de una molécula y un número tan grande como el de Avogadro por procedimientos normales, somos capaces de obtener una estimación de sus órdenes de magnitud. Una gota de ácido oleico sobre el agua se extiende formando una película sobre la superficie de esta. Si la superficie es lo suficientemente grande, se formará una capa molecular, lo que nos permitirá determinar el número de Avogadro. El ácido oléico ( $C_{17}H_{33}COOH$ ) se dispone debido así a que está formado por un componente alquílico (la cadena de carbonos  $C_{17}H_{33}$ , que es hidrófoba, y el radical ácido  $COOH$ , que es hidrófilo), por lo que sus moléculas se colocan de manera que el radical alquilo -R se dirige al exterior. La capa formada será monomolecular si la superficie acuosa es mayor que lo que precisan las moléculas para orientarse, por lo que el ácido oleico necesario es muy poco. Para conseguir tal cantidad, este ha de ser disuelto en un disolvente volátil para que, al precipitar la gota en el agua, el disolvente se evapore rápidamente. Es por esto que la disolución necesita ser muy diluida, y el disolvente, el etanol o uno similar.

Si se quiere determinar el número de Avogadro mediante este método, se ha de conocer el tamaño de la gota de ácido oleico y el volumen contenido de este en la capa que se forma. De esta forma se puede hallar la dimensión aproximada de una molécula de aceite. Conociendo también la masa molar y la densidad del ácido oleico, podremos obtener el número de Avogadro:

El primer cálculo que tenemos que realizar es la obtención de la superficie "S" del círculo que se forma en  $cm^2$ , por lo que su diámetro "D" (variable 1) se medirá en cm:

$$S = (\pi \cdot D)^2 / 4$$

El volumen de ácido oleico (variable 2), dado en mL o  $cm^3$ , que hay en una gota de la disolución de aceite y etanol se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_{\text{gota aceite}} = V_{\text{gota disolución}} \cdot (V_{\text{total aceite}} / V_{\text{total disolución}})$$

Puesto que se considera que el círculo es una capa monomolecular de aceite, el círculo es realmente un cilindro de base "S" que ya conocemos y de altura "h", que coincide con la altura de la molécula de aceite. Si se entiende que la molécula se dispone en forma cubo, es posible hallar el volumen de la molécula de aceite con dos sencillas fórmulas geométricas:

$$\begin{aligned} V_{\text{gota aceite}} &= S \cdot h \\ V_{\text{molécula aceite}} &= h^3 \end{aligned}$$

#### Comentario [p7]:

EX: La justificación teórica para la obtención del nº de Avogadro se detalla de forma simple y precisa.

#### Comentario [p8]:

COM: Aunque las ecuaciones son apropiadas, se echa de menos la utilización de un editor de ecuaciones.

#### Comentario [p9]:

CP: Esta referencia a Langmuir es una muestra de compromiso en la investigación, ya que es una fuente no utilizada en el aula, lo que pone de manifiesto la revisión bibliográfica realizada por el alumno.

#### Comentario [p10]:

EX: Realiza una exposición general del método precisa, y justifica teóricamente las características que conducen a la metodología utilizada.

Una vez tenemos el volumen de aceite añadido en la disolución y el volumen de una molécula de aceite, se puede obtener el número de moléculas de aceite en la capa dividiendo de la siguiente manera:

$$n^{\circ} \text{ moléculas de aceite} = V_{\text{total aceite}} / V_{\text{molécula aceite}}$$

Ahora solo quedaría hallar el  $n^{\circ}$  de moles de ácido oleico en la capa, que se obtiene a partir de:

$$n^{\circ} \text{ moles de aceite} = \text{masa de ácido oleico añadido} / \text{masa molar del ácido oleico}$$

La masa de aceite fue calculada mediante la fórmula  $d_{\text{aceite}} = m_{\text{aceite}} / V_{\text{total aceite}}$ , pues la densidad "d" puede ser obtenida a través de consulta bibliográfica y el volumen total de aceite en la disolución ya se hallado previamente. Al igual que con la densidad, la masa molar del aceite también fue sacada de la bibliografía (Solá, Hernández y Fernández, 2016).

Para concluir el cálculo de la constante de Avogadro, se divide el número de moléculas de ácido oleico entre el  $n^{\circ}$  de moles:

$$\text{Número de Avogadro} = n^{\circ} \text{ moléculas aceite} / n^{\circ} \text{ moles aceite}$$

## Metodología

A continuación se explican los procedimientos por los que se ha determinado la constante de Avogadro. En ninguno de los experimentos se tuvieron que tomar medidas de precaución especiales, ya que los materiales utilizados no son peligrosos ni para el ser humano ni para el medio ambiente.

## Electrolisis del agua

### Material empleado:

Agua	Soporte	Voltámetro de Hofmann	Amperímetro
Cronómetro	Barómetro	Termómetro	Fuente de alimentación

Antes de comenzar el proceso de electrólisis es necesario medir la presión del laboratorio y la temperatura a la que se está realizando el experimento, además de llenar el voltámetro con agua. Después de esto, se conecta los cables de la fuente de alimentación en ambos extremos del voltámetro de Hofmann. A continuación se abren las llaves situadas en la parte superior del voltámetro durante 30 segundos y luego se cierran. A partir de este momento, se van anotando los volúmenes de  $O_2$  y  $H_2$  formados y la intensidad de la corriente, ambas en intervalos de 30 segundos, hasta llegar a 20 minutos. Después de que transcurra el tiempo, podemos verter el agua por el desagüe, ya que no transporta ningún residuo tóxico.

#### Comentario [p11]:

EX: La explicación general de este método, que es, en sí mismo bastante complejo, está realizada con claridad y resulta fácil de seguir.

#### Comentario [p12]:

EX: La metodología es adecuada para abordar la pregunta de investigación.

#### Comentario [p13]:

EX: Prueba de la completa conciencia acerca de las cuestiones de seguridad y ambientales.

#### Comentario [p14]:

EX: La metodología proporciona detalles suficientes para que otros puedan repetir fácilmente esta investigación.

#### Comentario [p15]:

EX: conciencia ambiental.



1: Disposición del voltámetro de Hofmann.

### Electrodeposición

#### Material empleado:

Dos electrodos de cobre	Disolución de sulfato de cobre (II) 0,1M	Agua destilada	Ácido clorhídrico y agua oxigenada	Cronómetro	Secador	Fuente de alimentación
Probeta	Vasos de precipitados	Vidrio de reloj	Matraz kitasato	Tapón agujereado	Papel de filtro	Trompa de vacío

#### Comentario [p16]:

EX: La descripción del procedimiento seguido es clara y fácil de seguir.

#### Comentario [p17]:

EX: La metodología proporciona detalles suficientes para que otros puedan repetir fácilmente esta investigación.

Para comenzar a realizar el experimento hubo que limpiar los electrodos de cobre con ácido clorhídrico, pues pueden estar oxidados por la superficie y alteraría el proceso redox. A continuación se enjuagaron los electrodos con agua oxigenada para eliminar restos de HCl y por último se secaron para no dejar rastro de  $H_2O_2$ . Con esto se consigue que el electrodo contenga la menor impureza posible.

#### Comentario [p18]:

EX: Pruebas del reconocimiento de la relevancia de los factores que afectan la obtención de datos.

Con los electrodos ya limpios, se pesó el que actúa de cátodo, pues en él se va a depositar el cobre que posteriormente se utiliza para calcular el número de Avogadro. Una vez hecho esto, se procedió a preparar la cuba electrolítica. Para ello, fue necesario echar 400mL de  $CuSO_4$  0,1M en un vaso de precipitados, previamente medidos en una probeta. Después de esto, se dispusieron los electrodos como aparecen en la segunda imagen del apéndice, y se conectaron a una fuente de alimentación. A su vez, fue necesario intercalar un amperímetro para conocer la intensidad que circulaba por el circuito. Ya dispuesto todo, se encendió la fuente de alimentación, dejándola así durante 10 minutos y controlando la intensidad del circuito en intervalos de 1 minuto. Pasado este tiempo, se retiró el cátodo cuidadosamente y se dejó secar.

Puesto que una pequeña parte del cobre se separó del electrodo, se filtró la disolución final empleando un matraz kitasato, papel de filtro, un tapón agujereado y una trompa de vacío. Finalmente, se pesaron el cátodo y los restos de cobre filtrados, obteniendo así la cantidad total de cobre por diferencia de masa. Cuando ya se ha pesado el cobre, podemos proceder a guardarlo en un recipiente diseñado para albergar sustancias químicas. El sulfato de cobre empleado se puede verter con la ayuda de un embudo para ser utilizado en otra ocasión.

#### Comentario [p19]:

EX: Conciencia ambiental.





2: Electrodos colocados para la electrodeposición

### **Monocapa de ácido oleico**

#### **Material empleado:**

Aceite	Polvos de talco	Bureta	Etanol	Matraz erlenmeyer o vaso de precipitados	Matraz aforado (500mL)	Probeta
Soporte	Pinzas de sujeción	Embudo	Cubeta	Hoja de papel	Agua	Vernier

#### **Comentario [p20]:**

EX: La metodología proporciona detalles suficientes para que otros puedan repetir fácilmente esta investigación.

El procedimiento seguido comienza con la colocación de una bureta sujeta en un soporte mediante unas pinzas de sujeción en la que se vierte cierta cantidad de aceite. Debajo de ella se sitúa un matraz erlenmeyer o un vaso de precipitados (en este trabajo utilicé el segundo), en el que se echarán 250 gotas del aceite contenido en la bureta. Previamente se pesó el vaso de precipitados, pues para nuestro objetivo es necesario conocer la masa de las gotas. Mediante la diferencia de masa, se halla lo que pesan las 250 gotas en total, y dividiendo esta masa y el volumen utilizado de aceite (visible en la bureta) entre 250, se averiguan la masa y el volumen de cada gota.

El siguiente paso es echar una simple gota de aceite en el matraz aforado de 500mL. A continuación, se miden 150mL de etanol en una probeta, que posteriormente son vertidos en el matraz mediante la ayuda de un embudo. Se remueve el matraz para facilitar la disolución del aceite, y una vez finalizada, se enrasa el matraz con más etanol. Una vez terminado, se realizará exactamente lo mismo que con el aceite, aunque usando otra bureta y otro vaso de precipitados, por lo que el objetivo es hallar la masa y el volumen de cada gota de disolución.

Después de haber realizado los pasos anteriores, se procede a llenar de agua casi hasta el borde una cubeta, sobre la que se esparcirá cuidadosamente polvos de talco soplando y ayudándonos de un papel. Cuando el agua se encuentre en reposo, se añade una gota de la disolución de ácido oleico en el centro de la cubeta con la ayuda de una bureta. La gota de disolución se irá extendiendo entre los polvos de talco, y el etanol, al ser un líquido volátil, se evaporará dejando la monocapa de ácido oleico, que finalmente forma un círculo fácilmente medible con un vernier. Al terminar el experimento, se pueden verter todas las sustancias por el desagüe puesto que ninguna de ellas es tóxica.

#### **Comentario [p21]:**

EX: Conciencia ambiental



4: Bureta y cubeta con la primera monocapa de aceite en su centro.

## Datos brutos

A continuación se disponen los datos correspondientes a cada experimento con sus respectivas incertidumbres:

### Electrolisis del agua

En la primera tabla aparecen los datos obtenidos de la intensidad y de los volúmenes de  $O_2$  y  $H_2$  en intervalos de un minuto. En los laterales también se muestran los errores sistemáticos debidos a los aparatos empleados para la toma de medidas.

t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I (A) $\pm 0,01$	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
V $O_2$ (mL) $\pm 0,2$	0,0	0,6	1,2	1,8	2,2	2,8	3,4	4,0	4,4	5,0	5,6
V $H_2$ (mL) $\pm 0,2$	0,0	1,2	2,4	3,6	4,4	5,6	6,6	7,6	8,8	10,0	11,0

t (min)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Media
I (A) $\pm 0,01$	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
V $O_2$ (mL) $\pm 0,2$	6,2	6,8	7,2	7,8	8,4	8,8	9,4	10,0	10,6	11,4	
V $H_2$ (mL) $\pm 0,2$	12,0	13,2	14,0	15,4	16,6	17,4	18,6	19,6	20,6	21,4	

#### Comentario [p22]:

AN: Los datos brutos recogidos son suficientes para respaldar una respuesta a la pregunta de investigación. La utilización de unidades, cifras significativas y expresión de las incertidumbres es la adecuada.

#### Comentario [p23]:

AN: Se toma en consideración de forma completa y adecuada el efecto de las incertidumbres en el análisis.

La siguiente tabla muestra todos los datos procesados que se precisan para obtener el número de Avogadro:

	I (A)	t (s)	Q (C)	T (K)	P (atm)	Nº mol H <sub>2</sub>	Nº mol O <sub>2</sub>	Nº e <sup>-</sup> O <sub>2</sub>	Nº e <sup>-</sup> H <sub>2</sub>	Q mol e <sup>-</sup> O <sub>2</sub>	Q mol e <sup>-</sup> H <sub>2</sub>	N <sub>A</sub> O <sub>2</sub> (mol <sup>-1</sup> )	N <sub>A</sub> H <sub>2</sub> (mol <sup>-1</sup> )
Valor total	0,14	1200	168	293	0,98	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{23}$	$6,0 \cdot 10^{23}$
Incertidumbre (±)	0,01	1	12	1	0,01	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{23}$	$1,0 \cdot 10^{23}$

### Electrodeposición

En la primera tabla se muestra el seguimiento de la intensidad de la corriente por intervalos de 1 minuto. La segunda tabla muestra los datos obtenidos a través del experimento y los posteriormente procesados:

t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
I (A) ± 0,01	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

#### Comentario [p24]:

AN: Se incluyen datos brutos cuantitativos suficientes para respaldar una conclusión adecuada.  
No se indican datos cualitativos.

	M total (g)	M vidrio (g)	M Cu (g)	Moles Cu (mol)	I (A)	t (s)	Q (C)	Nº e <sup>-</sup>	Nº átomos Cu	N <sub>A</sub> (mol <sup>-1</sup> )
Valor total	3,566	3,445	0,121	0,002	0,36	600	220	$1,4 \cdot 10^{21}$	$6,8 \cdot 10^{20}$	$3,5 \cdot 10^{23}$
Incertidumbre (±)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	1	6	$0,1 \cdot 10^{21}$	$0,6 \cdot 10^{20}$	$0,3 \cdot 10^{23}$

### Monocapa de ácido oleico

Para tratar de minimizar el error en el diámetro de la capa oleica, se hicieron varias medidas. Algunas capas se deformaron demasiado, haciendo imposible su medida, por lo que en la tabla se recogen las que formaron un círculo lo más perfecto posible:

#### Comentario [p25]:

CP: Se demuestra capacidad para improvisar sobre el procedimiento.

#### Comentario [p26]:

AN: Se informa acerca de los datos cuantitativos pertinentes.

	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Media
Diámetro capa (mm)	30,4	30,2	32,5	32,4	31,4
Incertidumbre (±)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

En la tabla inferior se recogen los datos del experimento:

	$\rho$ ac. (g/mL)	Mm. ac.	S capa (cm <sup>2</sup> )	V tot. ac. (mL)	V gota ac. (mL)	M tot. ac. (g)	M gota ac. (g)	V tot. disol. (mL)	V gota disol. (mL)
Valor total	0,89	282	773	7,5	$3,0 \cdot 10^{-2}$	6,717	$2,7 \cdot 10^{-2}$	8,0	0,032
Incertidumbre ( $\pm$ )	0,01	1	5	0,1	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,001	$4,0 \cdot 10^{-6}$	0,1	0,001

	V capa ac. (mL)	h moléc. ac. (cm)	V moléc. ac. (mL)	M ac. disol. (g)	Nº moles ac. disol.	Nº moléc. ac. disol.	N <sub>A</sub> (mol <sup>-1</sup> )
Valor total	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-21}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{16}$	$8,5 \cdot 10^{22}$
Incertidumbre ( $\pm$ )	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$0,7 \cdot 10^{-8}$	$0,5 \cdot 10^{-21}$	$0,5 \cdot 10^{-5}$	$0,2 \cdot 10^{-7}$	$0,6 \cdot 10^{16}$	$1,9 \cdot 10^{22}$

## Datos procesados

Después de haber obtenido los datos, se realizaron gráficas que mostrasen las variaciones medibles durante las tres experiencias. Mientras que en los dos primeros experimentos se pueden realizar gráficas de este tipo, en el método de la capa de ácido oleico es imposible, pues el experimento no da lugar a tratar variables dependientes e independientes.

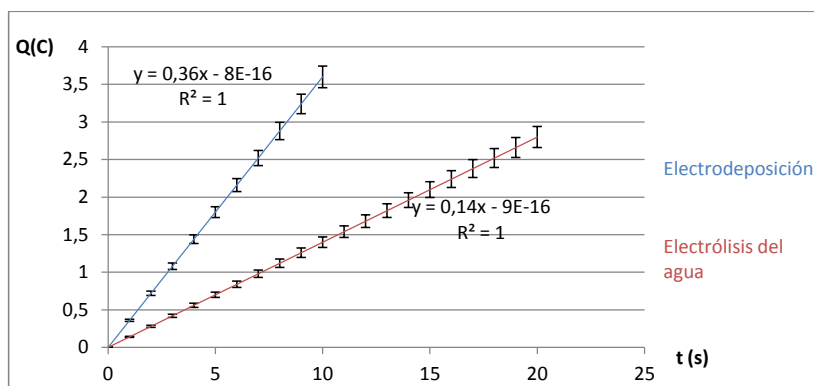
En las tablas de datos podemos apreciar que la intensidad de la corriente en los métodos basados en la electrólisis se mantuvo constante durante todo el proceso. Esta constancia permitió hacer una relación entre "Q" (variable dependiente) respecto al tiempo (variable independiente), ya que la intensidad actuaría como la pendiente de una recta  $y=a+bx$ . Después de haber realizado la gráfica, se puede ver que esta refleja las rectas esperadas.

### Comentario [p27]:

AN: El alumno es consciente de las limitaciones experimentales en el método de la gota de aceite.

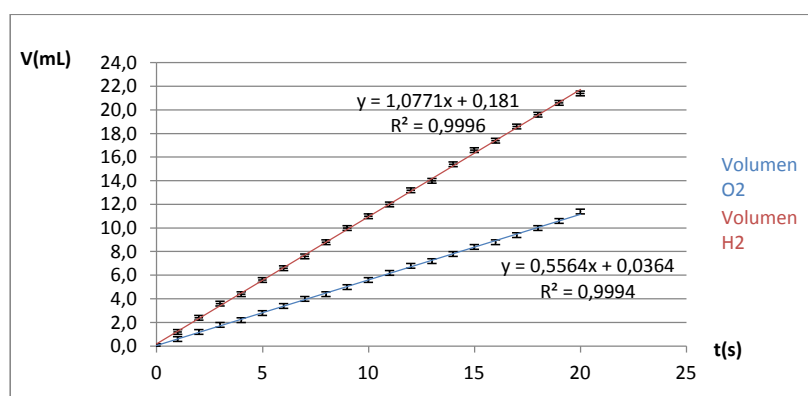
### Comentario [p28]:

AN: Se aprecia un adecuado dominio del análisis gráfico. Se incluye el coeficiente de regresión lineal y la recta de mejor ajuste. Se incluyen las cotas de error.



Gráfica 1: Carga frente al tiempo en los métodos de electrólisis del agua y de electrodeposición. En el eje x, el tiempo (s), en el eje y, la carga (Q).

Por último, se halló interesante observar cómo varía el volumen de  $H_2$  y  $O_2$  frente al tiempo. Comprobándose como el volumen de hidrógeno es el doble del volumen de oxígeno, tal y como se esperaba. Esto se representa en la siguiente gráfica:



Gráfica 2: Producción de volumen de  $O_2$  y  $H_2$  respecto al tiempo en el método de la electrolisis del agua. En el eje x, el tiempo (s), en el eje y, el volumen (L).

**Comentario [p29]:** AN: Se muestra un adecuado manejo del análisis gráfico.

## Análisis de datos

### Electrolisis del agua

Además de comentar la constancia de la intensidad en el experimento, ya mencionado en el apartado anterior, es interesante destacar que hay ligeras variaciones en la producción de volumen por cada intervalo, es decir, que la producción no se mantiene constante, aunque esto que probablemente se deba a acumulaciones de errores sistemáticos en la medición de los datos. Esto se refleja perfectamente en la gráfica 2, donde se percibe la forma de una línea recta con leves fluctuaciones. Aún así, se puede intuir que la formación de ambas sustancias sigue un patrón constante.

**Comentario [p30]:** EV: Se reflexiona sobre los posibles errores cometidos en la experiencia.

La incertidumbre en el número de Avogadro en ambos casos es del  $\pm 10\%$ . A pesar de esto, los cálculos se aproximan bastante al valor bibliográfico de la constante, llegando a ser resultados casi excelentes, por lo que podemos considerar la experiencia como exitosa.

### Electrodeposición

Al igual que en el anterior experimento, la intensidad de la corriente se mantuvo constante. Sin embargo, en este caso se percibieron leves cambios en ella, aunque de un intervalo tan corto que no se reflejan en los datos anotados, y por lo tanto tampoco afectan a la gráfica 1, donde se percibe un aumento completamente lineal de la carga y sin apenas error (lo mismo ocurre con la electrolisis del agua).

**Comentario [p31]:** EV: ¿A qué se refiere con apenas error?

Mediante el método de electrodeposición la incertidumbre en el número de Avogadro es de  $\pm 10\%$ , y respecto al valor bibliográfico de la constante también se ha conseguido una precisión bastante buena, por lo que el método de electrodeposición también se puede calificar de exitoso.

### • Monocapa de ácido oleico

Si bien no es malo, el resultado obtenido mediante este método es distante del valor real del número de Avogadro, por lo que se cumplen las expectativas que se tenían al comenzar el trabajo. La incertidumbre en el número de Avogadro es la mayor entre todos los métodos, siendo de un  $\pm 22\%$ , por lo que es el experimento más impreciso en todos los casos.

### Conclusiones y evaluación

La sensación al terminar todos los experimentos se puede calificar de satisfactoria, pues todos los métodos han sido completados sin problemas y con buenos resultados. Como se había mencionado al comienzo del trabajo, el método de la monocapa de ácido oleico fue el más lejano al valor bibliográfico de la constante de Avogadro, por lo que las expectativas iniciales fueron reafirmadas.

Además de emplear aparatos más precisos en el trabajo, los resultados podrían haber sido mejorados haciendo seguimientos en intervalos más breves de tiempo para encontrar variaciones, por ejemplo, en la intensidad de la corriente. Otra posible causa de error evitable en el trabajo es la pérdida de cobre en el método de electrodeposición. A pesar de haber filtrado, es muy difícil extraer el cobre al completo, por lo que parte de este se quedará en la disolución. Por último, se debe destacar la imprecisión en la forma circular de las monocapas de ácido oleico, que hace complicado determinar con gran exactitud sus diámetros. Esto se podría mejorar tomando más medidas para conseguir una media del diámetro más exacta.

#### Comentario [p32]:

EV: Se evalúan las hipótesis planteadas en la pregunta inicial.

#### Comentario [p33]:

EV: Se sugieren mejoras y ampliaciones del método, pero no se justifican adecuadamente.

#### Comentario [p34]:

EV: El alumno evidencia comprensión adecuada en la descripción y justificación de su conclusión dentro del contexto científico. Además, existen pruebas de una comprensión adecuada de las limitaciones de los datos, la metodología y de qué forma estas influyen sobre la conclusión. No indica qué tipo de medidas habría que realizar para reducir el error sistemático en la determinación del diámetro de la gota.

### Bibliografía:

Brown, C. y Ford, M. (n.d.). *Higher level chemistry*. 2nd ed. p.448-450.

### Enlaces consultados

Mohr, P., Taylor, B. y Newell, D. (2012). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010. *Reviews of Modern Physics*, [online] 84(4), pp.1527-1605. Disponible en: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/codata.pdf> [Consultado: 1-12-2015].

Solá, J., Hernández, J. y Fernández, R. (2016). *Aproximación al número de Avogadro*. [online] Heurema.com. Disponible en: <http://www.heurema.com/PQ1.htm> [Consultado: 10-12-2015].

#### Comentario [p35]:

COM: La citación de fuentes bibliográficas es la apropiada.

## Investigación Individual:

Estudio comparativo de la precisión en la determinación del número de Avogadro por diferentes métodos

Criterio	Compromiso Personal (2)	Exploración (6)	Análisis (6)	Evaluación (6)	Comunicación (4)	Total (24)
NIVEL DE CONSECUCCIÓN	2	5	4	5	4	20

COMPROMISO PERSONAL		
Calif.	Descripción	Comentario
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las pruebas que demuestran el compromiso personal con la exploración son claras, con un grado significativo de pensamiento independiente, iniciativa o creatividad.</li> <li>La justificación aportada para elegir la pregunta de investigación y/o el tema que se investiga demuestra <b>interés, curiosidad o importancia de índole personal</b>.</li> <li>Hay pruebas que demuestran una <b>iniciativa y un aporte de índole personal</b> en el diseño, la implementación o la presentación de la investigación.</li> </ul>	<p>La pregunta es resultado del aprendizaje, la lectura o la experimentación en clase, junto con aportaciones de experiencias personales.</p> <p>La investigación muestra que ha habido una reflexión personal a la hora de elegir el tema, el método de indagación y la presentación de los resultados.</p> <p>Es una investigación interesante y, aunque los métodos de determinación del nº de Avogadro son conocidos, la curiosidad por conocer el grado de fiabilidad de los mismos aporta una interesante muestra de originalidad a la investigación y hace que la investigación sea diferente a las investigaciones experimentales habituales.</p>

EXPLORACIÓN		
Calif.	Descripción	Comentario
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se identifica el tema de la investigación y se describe con claridad una pregunta de investigación pertinente y totalmente bien centrada.</li> <li>La información de referencia que se proporciona para la investigación es totalmente adecuada y pertinente, y mejora la comprensión del contexto de la investigación.</li> <li>La metodología de la investigación es muy adecuada para abordar la pregunta de investigación porque considera todos, o casi todos, los factores importantes que pueden influir en la pertinencia, la fiabilidad y la suficiencia de los datos obtenidos.</li> <li>El informe muestra pruebas de una completa conciencia acerca de las importantes cuestiones de <b>seguridad, éticas o ambientales</b> que son <b>pertinentes para la metodología de la investigación</b>*</li> </ul>	<p>Toma sus propias ideas para convertirlas en un método viable.</p> <p>Se demuestra la reflexión que subyace a sus ideas utilizando sus conocimientos sobre la asignatura. La información dada está centrada en el problema planteado.</p> <p>El alumno identifica un tema interesante y propone una pregunta de investigación pertinente y centrada</p> <p>Se percibe una línea de investigación precisa que puede ser evaluada mediante protocolos científicos.</p> <p>Se aportan los detalles necesarios del método con respecto a las variables, los controles y la naturaleza de los datos que se han de generar.</p> <p>El alumno emplea una metodología adecuada que es lo suficientemente sofisticada para el nivel de Química del Programa del Diploma. Los datos están presentes en cantidad suficiente y de modo que se puedan tratar de forma adecuada, para poder extraer una conclusión.</p> <p>Posiblemente, la investigación se podría haber ampliado para explorar la bibliografía relativa a otros tipos de métodos aplicables a la determinación del nº de Avogadro..</p> <p>Se mencionan aspectos de seguridad, éticos y ambientales.</p>

ANÁLISIS		
Calif.	Descripción	Comentario
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se <b>describe y se justifica</b> una conclusión detallada que es totalmente pertinente para la pregunta de investigación y que cuenta con el respaldo absoluto de los datos que se presentan.</li> <li>Se <b>describe y se justifica</b> correctamente una conclusión mediante una comparación pertinente con el contexto científico aceptado.</li> <li>Los puntos fuertes y débiles de la investigación, como las limitaciones de los datos y las fuentes de error, se <b>discuten</b> y demuestran una clara comprensión de las <b>cuestiones metodológicas</b>* implicadas en el establecimiento de la conclusión.</li> <li>El alumno ha <b>discutido</b> sugerencias realistas y pertinentes para la mejora y la ampliación de la investigación.</li> </ul>	<p>El tratamiento de datos se adecua al objetivo de la investigación</p> <p>Las conclusiones extraídas se basan en las pruebas obtenidas de los datos.</p> <p>El alumno halla suficientes datos cuantitativos pertinentes, incluidas incertidumbres, como para poder extraer finalmente una conclusión.</p> <p>No se incluyen datos cualitativos, lo que penaliza este apartado..Las conclusiones obtenidas están fundamentadas en los datos obtenidos.</p> <p>El procesamiento es bastante sencillo, pero la representación gráfica eficaz permite una interpretación válida.</p> <p>Resulta un poco farragoso seguir el procesamiento de datos, en especial las tablas que incluyen todos los datos conjuntamente.</p> <p>Se han interpretado acertadamente los datos procesados, lo que condujo a una conclusión válida y detallada.</p>

## Investigación Individual:

Estudio comparativo de la precisión en la determinación del número de Avogadro por diferentes métodos

EVALUACIÓN		
Calif.	Descripción	Comentario
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se <b>describe y se justifica</b> una conclusión detallada que es totalmente pertinente para la pregunta de investigación y que cuenta con el respaldo absoluto de los datos que se presentan.</li> <li>Se <b>describe y se justifica</b> correctamente una conclusión mediante una comparación pertinente con el contexto científico aceptado.</li> <li>Los puntos fuertes y débiles de la investigación, como las limitaciones de los datos y las fuentes de error, se <b>discuten</b> y demuestran una clara comprensión de las <b>cuestiones metodológicas*</b> implicadas en el establecimiento de la conclusión.</li> <li>El alumno ha <b>discutido</b> sugerencias realistas y pertinentes para la mejora y la ampliación de la investigación.</li> </ul>	<p>La conclusión apoya la idea original respecto al tema.</p> <p>Se hace una reflexión sobre las limitaciones del método.</p> <p>La conclusión se relaciona con la pregunta de investigación y está respaldada y justificada por los datos procesados.</p> <p>Se incluye una valoración del grado de fiabilidad de los métodos puestos en práctica, y se relaciona con la hipótesis de partida.</p> <p>El alumno sugiere una ampliación de la investigación, pero, especialmente en el caso de la monocapa de ácido oleico no indica qué tipo de medidas podrían hacerse para reducir el error sistemático de este método.</p>

COMUNICACIÓN		
Calif.	Descripción	Comentario
4	<p><b>La presentación de la investigación es clara. Los errores que pueda haber no obstaculizan la comprensión del objetivo, el proceso y los resultados.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>El informe es claro y está bien estructurado: la información necesaria acerca del objetivo, el proceso y los resultados se presenta de manera coherente.</li> <li>El informe es pertinente y conciso, lo cual facilita una rápida comprensión del objetivo, el proceso y los resultados de la investigación.</li> <li>El uso de convenciones y terminología específicas de la asignatura es adecuado y correcto. Los errores que pueda haber no obstaculizan la comprensión.</li> </ul>	<p>El informe está claramente redactado y presentado de forma lógica.</p> <p>La información y las explicaciones están orientadas a la pregunta en cuestión.</p> <p>El informe está bien centrado.</p> <p>El vocabulario utilizado es el específico de la asignatura y de una calidad apropiada para el nivel del Programa del Diploma.</p> <p>Las convenciones específicas de la asignatura requeridas son los formatos correctos para los gráficos, las tablas y encabezados de columnas, el uso correcto de las unidades y el registro de los errores.</p> <p>El informe mantiene su pertinencia en toda su extensión y es conciso, y está dentro de las 6-12 páginas recomendadas.</p>