



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TESIS**

**“Estudio de la estabilidad de una membrana polimérica utilizada para la separación de oro”**

Tesis para obtener el título de licenciatura en Ingeniería Química

**Presenta:** P.I.Q. Nidia Libia Torres García

**Asesor:** M.C. María Elena Núñez Gaytán

**Co-asesor:** M.C. Ana María Núñez Gaytán

Morelia, Mich., a junio de 2011

## ÍNDICE

Relación de tablas y figuras	iv
Resumen	vi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
Antecedentes	1
Justificación	3
Objetivos	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Hipótesis	5
CAPÍTULO 2. GENERALIDADES	
Propiedades del oro	6
Países productores de oro	8
Obtención del oro	9
Compuestos del oro	10
Usos y aplicaciones del oro	11
Efectos del Oro sobre la salud	15
Efectos ambientales del Oro	15
Procesos de separación	16

Extracción líquido-líquido	17
Separación a través de membranas	18
Tipos de membranas	20
Propiedades de membranas poliméricas	20
Ventajas y desventajas de membranas poliméricas	21
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	
Espectrofotometría Ultravioleta/Visible	22
Principio físico	22
El espectrofotómetro ultravioleta-visible	23
Tipos de espectrofotómetros	24
Componentes de un espectrofotómetro	28
Ley de Beer-Lambert	31
Microscopio electrónico de barrido	34
Funcionamiento	35
Utilización	36
Reactivos	37
Equipo y material utilizado	37
Desarrollo experimental	38
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	
Observaciones termodinámicas	41
Análisis cuantitativo	44

Proceso de separación de oro	44
Cálculos de permeabilidad de la membrana	48
Determinación del pH en la fase de recuperación	50
Caracterización por microscopía electrónica de barrido	52
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
Conclusiones	58
Recomendaciones	58
BIBLIOGRAFÍA	59
APÉNDICE I	61

## RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Características y propiedades del oro.	7
Tabla 2. Porcentaje molar de Au(III) transportado a la fase de recuperación con desviación estándar. Ciclo de operación: 8 horas. Composición de la membrana: 37 % de 1,2-Tetradecanodiol	47
Tabla 3. Permeabilidad de la membrana para diferentes concentraciones de HCl con desviación estándar.	49
Tabla 4. Determinación del pH de la fase de recuperación al finalizar cada ciclo de operación de 8 hrs.	51
Figura 1. Representación del transporte de una membrana.	19
Figura 2. Región del espectro electromagnético que aplica la UV-VIS	22
Figura 3. Imagen de un espectrofotómetro Ultravioleta-Visible	23
Figura 4. Arreglo óptico de un espectrofotómetro Ultravioleta-Visible de simple haz	25
Figura 5. Arreglo óptico de un espectrofotómetro Ultravioleta-Visible de doble haz	26
Figura 6. Celdas de espectrofotometría de cuarzo y de plástico.	28
Figura 7. Diagrama de la absorción de un haz de luz atravesando una celda de tamaño $l$ .	31
Figura 8. Imagen de un microscopio electrónico de barrido.	34
Figura 9. Gráfica que muestra la eficiencia de una membrana en función de la composición de 1,2-tetradecanodiol	38

Figura 10. Representación de una celda de permeación.	39
Figura 11. Diagrama de predominancia de áreas de las especies Au (III), OH <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> . Las líneas indican las condiciones bajo las cuales las especies adyacentes están presentes en concentraciones iguales.	42
Figura 12. Representación tridimensional de la molécula del complejo AuCl <sub>4</sub> <sup>-</sup> .	43
Figura 13. Transporte de oro de la fase de alimentación a la de recuperación de una membrana en medio 3M durante 8 horas.	45
Figura 14. Transporte de oro de la fase de alimentación a la de recuperación de una membrana en medio 3M durante 10 horas.	45
Figura 15. Porcentaje de oro(III) en la fase de recuperación en 8 horas de transporte.	47
Figura 16. Representación gráfica de la permeabilidad de la membrana de la fase de alimentación.	50
Figura 17. Morfología de la superficie de una membrana utilizada en el transporte de oro.	52
Figura 18. Acercamiento a un nódulo de la membrana utilizada en el transporte de oro.	53
Figura 19. Representación gráfica que muestra los elementos químicos presentes: C, O, Cu	54
Figura 20. Puntos blancos que representan al oro incrustado en la membrana.	55
Figura 21. Representación gráfica que muestra la presencia de oro.	56
Figura 22. Imagen en la que se puede apreciar el espesor de la membrana óptima. Espesor de la membrana = 17.5 µm	57
Figura 23. Curva de calibración de Au(III).	61

## RESUMEN

El oro es uno de los metales más caros, tanto por su difícil extracción como por su importancia en la economía mundial, además por sus propiedades como la conductividad eléctrica o la maleabilidad; por estas últimas razones es empleado en los microprocesadores de las computadoras. Por lo anterior, se estudió la manera de recuperar el oro en niveles de trazas de soluciones concentradas de HCl mediante el método de separación por membranas. Una membrana polimérica impide el flujo hidrodinámico entre dos líquidos de diferentes concentraciones, pero es permeable con respecto a la sustancia buscada, reteniendo a otras.

Los resultados muestran que al variar la cantidad de 1,2-tetradecanodiol utilizado como extractante en la síntesis de la membrana se obtuvo una composición óptima con la que se obtiene un mejor transporte de oro (III), además se cambiaron las condiciones de acidez con la finalidad de observar la eficiencia del transporte del metal y la estabilidad de la membrana. Para determinar la variación de las concentraciones de oro (III) se empleó una metodología analítica por Espectrofotometría UV-VIS. Se estudió la estabilidad de la membrana al evaluar su eficiencia en el transporte de oro (permeabilidad) para un gran número de ciclos de operación (10 ciclos). El incremento de acidez en la fase de recuperación permitió comprobar que el oro no se transporta solo, sino junto con el  $H^+$  del ácido.

Además, se utilizó la Microscopía Electrónica de Barrido con la finalidad de observar las características morfológicas de la membrana, los elementos químicos que la componen, así como determinar su espesor.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES

Los procesos de separación por membranas son métodos para la separación de elementos usando membranas artificiales. Al largo de los últimos 30 años, las membranas comenzaron a ser utilizadas en varios procesos industriales como agentes de separación de compuestos. Su aplicación se ha ampliado con el tiempo y actualmente los procesos de separación por membranas son utilizados en áreas tan diversas como la separación de gases, la desalinización del agua o la hemodiálisis.

Las tecnologías de separación por membranas beneficiaron el desarrollo de nuevos tipos de membranas más selectivas, más permeables y se hicieron más competitivas. En muchas áreas de actividad, estas tecnologías tienen costos de capital y de funcionamiento inferiores a los de los procesos de separación clásicos, tales como la extracción líquido-líquido o la destilación.

Una de estas áreas es el tratamiento de soluciones acuosas en procesos industriales. Las soluciones son concentradas y purificadas por procesos de separación por membranas como la ultrafiltración o la ósmosis inversa. Como ejemplo, la ultrafiltración es más competitiva en la deshidratación de productos alimenticios.

La ósmosis inversa y la ultrafiltración son procesos implementados en celdas de permeación con las mismas características básicas. La celda de permeación posee dos compartimientos: el lado de alimentación y el lado de recuperación. Los compartimientos están separados por una membrana que retiene parcialmente el soluto y es permeable al solvente [1].



Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico. La membrana funciona como una pared de separación selectiva. Ciertas sustancias pueden atravesar la membrana, mientras que otras quedan atrapadas en ella [2]. En la membrana hay tres componentes: un polímero, un plastificante y un extractante o acarreador.

Los sistemas de separación por membranas son actuales y novedosos debido a las grandes ventajas que presentan como son bajos costos de operación, utilizar extractantes baratos y selectivos, además no emplean disolventes orgánicos como es el caso de la extracción por disolventes [3]. La característica principal de estos sistemas es precisamente la membrana polimérica que separa dos fases líquidas. El analito de interés debe migrar de una fase a la otra a través de la membrana. Las membranas poliméricas se emplean, principalmente, para la separación de elementos a nivel de trazas; así como para su concentración o enriquecimiento.

La **estabilidad** se evalúa en función del número de ciclos de operación que una membrana puede ser utilizada presentando la misma capacidad de separación del analito. La capacidad o eficiencia en la separación se determina por la velocidad de transporte del metal expresada como la permeabilidad de la membrana.

La extracción del Au(III) en forma de halocomplejos es efectiva con aminas y sales de amonio cuaternario [4-5]. La tiourea y la ditizona son compuestos orgánicos que tienen átomos de azufre en su molécula y son extractantes reconocidos para Au(III) [6-7]. Otros extractantes empleados son el metilisobutilcetona, dietileter, isopropileter, diclorodietiléter y etilacetato [8].

## JUSTIFICACIÓN

El oro tiene un precio elevado y una importancia estratégica que ha llevado a un creciente interés en el desarrollo de métodos para determinar, separar, concentrar y purificar este metal. Sin embargo, este incremento en el número de nuevos métodos de separación y determinación no ha ido siempre paralelo a la importancia económica del metal como cabría esperar. Así, algunas de las separaciones más utilizadas se basan en métodos propuestos a principios del siglo pasado. Este hecho se ha atribuido a las dificultades analíticas que provoca la complejidad de la química de los metales preciosos.

La investigación en química analítica en el área de los metales preciosos puede contribuir asimismo a la eficiencia de los procesos de extracción industrial y de purificación de este metal.

Los procesos y métodos de separación basados en la tecnología de membranas, tanto a escala industrial como a nivel de laboratorio, han experimentado en los últimos años un desarrollo muy importante. Además de los ya considerados clásicos como la diálisis, ósmosis inversa y separaciones de gases; los procesos de membrana se han introducido en áreas muy diversas como el control de la contaminación o el suministro controlado de fármacos.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Estudiar la estabilidad de una membrana polimérica empleada para la separación de Au (III) en medios concentrados de ácido clorhídrico 1M, 3M y 5M con el acarreador comercial 2,4-tetradecanediol.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Optimizar el sistema de separación por membranas poliméricas a través del estudio de la influencia de factores tales como: concentración de ácido clorhídrico, (pH) de la fase acuosa, concentración del acarreador y la permeabilidad de la membrana.
- Establecer la composición de la membrana que presente una mejor permeabilidad.
- Estudiar la estabilidad de la membrana polimérica para las diferentes concentraciones de ácido clorhídrico.
- Implementar la metodología analítica por Espectrofotometría UV-VIS para evaluar la variación de concentración del metal en estudio.
- Caracterización de la membrana mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

## HIPÓTESIS

Se pretende separar eficientemente Au(III) a nivel de trazas disuelto en medios concentrados ácido clorhídrico utilizando una membranas polimérica que contiene como acarreador selectivo el 1,2-tetradecanodiol. La membrana debe ser permeable al metal y poder utilizarla para varios ciclos de operación. Esto se podrá determinar mediante la estimación de la permeabilidad de la membrana y su estabilidad, es decir, conocer la vida útil de la misma. Se podrá evaluar el espesor y su morfología física mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

## CAPÍTULO 2. GENERALIDADES

### PROPIEDADES DEL ORO

Es un metal de transición blando, brillante, amarillo, pesado, maleable y dúctil. El oro no reacciona con la mayoría de los productos químicos, pero es sensible al cloro y al agua regia. Este metal se encuentra normalmente en estado puro, en forma de pepitas y depósitos aluviales. Se cree que el oro se forma de gases y líquidos que se elevan desde el estructura interna de la Tierra, los cuales se trasladan a la superficie a través de fallas de la corteza terrestre.

El oro exhibe color amarillo cuando se encuentra en bruto. Es considerado como el metal más maleable y dúctil que se conoce. Una onza (31.10 g) de oro puede moldearse en una lámina que cubra 28 m<sup>2</sup>. Como es un metal blando, son frecuentes las aleaciones con otros metales con el fin de proporcionarle dureza.

Además, es buen conductor del calor y de la electricidad y no le afecta el aire ni la mayoría de los agentes químicos. Exhibe alta resistencia a la alteración química por parte del calor, la humedad y la mayoría de los agentes corrosivos, por lo que ha sido útil en la acuñación de monedas y en la joyería.

Se trata de un metal muy denso, con alto punto de fusión y alta afinidad electrónica. Sus estados de oxidación más importantes son 1+ y 3+. También se encuentra en el estado de oxidación 2+, así como en estados de oxidación superiores, pero es menos frecuente. La estabilidad de especies y compuestos de oro con estado de oxidación III, frente a sus homólogos de grupo, hay que razonarla considerando los efectos relativistas sobre los orbitales 5d del oro, estas propiedades se señalan en la siguiente Tabla 1. [9]

Tabla 1. Características y propiedades del oro.

Oro	
	
Información general	
Nombre, símbolo, número	Oro, Au, 79
Serie química	Metales de transición
Grupo, periodo, bloque	11, 6, d
Densidad	19 300 kg/m <sup>3</sup>
Apariencia	Amarillo metálico 
No. CAS	7440-57-5
Propiedades atómicas	
Masa atómica	196.966569 (4) u
Radio medio	135 pm
Radio atómico (calc)	174 pm (Radio de Bohr)
Radio covalente	144 pm
Radio de Van der Waals	166 pm
Configuración electrónica	[Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>
Electrones por nivel de energía	2, 8, 18, 32, 18, 1
Estado(s) de oxidación	3, 1
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras

<b>Propiedades físicas</b>		
Estado ordinario	Sólido	
Punto de fusión	1 337.33 K	
Punto de ebullición	3 129 K	
Entalpía de vaporización	334. 4 KJ/mol	
Entalpía de fusión	12.55 KJ/mol	
Presión de vapor	0.000237 Pa a 1 337 K	
Velocidad del sonido	1.740 m/s a 293.15 K (20 °C)	
<b>Varios</b>		
Electronegatividad (Pauling)	2.54	
Calor específico	128 J/(K·kg)	
Conductividad eléctrica	45.5 x 10 <sup>6</sup> S/m	
Conductividad térmica	317 W/(K·m)	
1ª. energía de ionización	890.1 KJ/mol	
2ª. energía de ionización	1980 KJ/mol	
<b>Isótopos más estables</b>		
Iso	AN	Periodo
<sup>197</sup> Au	100%	Estable con 118 neutrones
Nota: unidades según el SI y en CNPT, salvo indicación contraria.		

### Países productores de oro

Los principales países que obtienen oro de sus recursos naturales son: Sudáfrica, Zimbabwe, Uganda, Tanzania, Namibia, Mauritania, Mali, Guinea, Ghana y Etiopía. También en América se extrae oro, en países como: República Dominicana, Nicaragua y Perú. [10]

## Obtención del oro

Debido a que es relativamente inerte, el oro se suele encontrar como metal, a veces como pepitas grandes, pero generalmente se encuentra en pequeñas inclusiones en algunos minerales, vetas de cuarzo, pizarra, rocas metamórficas y depósitos aluviales originados de estas fuentes. El oro está ampliamente distribuido y a menudo se encuentra asociado a los minerales cuarzo y pirita, y se combina con telurio en los minerales calaverita ( $\text{AuTe}_2$ ), silvanita  $[(\text{Au-Ag})\text{Te}_4]$  y kalgoorlita  $[(\text{Au-Ag})_2\text{Te}]$  entre otros. [11]

El trabajo de lixiviación (proceso en el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido) es el método que se utiliza para la extracción de oro. Se desarrolla en menas, concentrados y material refractario (sulfurado), en pulpa o partículas (agitación o pilas) a temperatura ambiente con tiempo de lixiviación mínimo de quince días, usando como medio el ácido sulfúrico concentrado adicionando sales oxidantes como los cloruros y nitrato de sodio o nitrato de amonio en distintas proporciones. Los resultados obtenidos respecto a la recuperación de oro alcanzan el 98%.

Si el oro está encapsulado en el cuarzo o arena aurífera, deberá adicionarse fluoruro de sodio (nunca usar el calcio, porque forma yeso que entorpece el proceso) con la finalidad de disolver el cuarzo, no disuelve ni forma complejos con el oro, además sirve para dejar en libertad metales nobles como el titanio, platino, talio, germanio, etc. los cuales luego son recuperados con el medio lixivante al cual se ha denominado Proceso Severo.

Hay una gran cantidad de oro en los mares y océanos, siendo su concentración de entre  $0.1 \mu\text{g}/\text{kg}$  y  $2 \mu\text{g}/\text{kg}$ , pero en este caso no hay ningún método rentable para recuperarlo.



El oro puede encontrarse en la naturaleza en los ríos. Algunas piedras de los ríos contienen pepitas de oro en su interior. La fuerza del agua separa las pepitas de la roca y las divide en partículas minúsculas que se depositan en el fondo del cauce. [9]

### Compuestos del oro

El oro forma bastantes complejos pero pocos compuestos sencillos. No se ha aislado un óxido con Au(I), pero el estado (I) solo es estable en estado sólido o en forma de complejos estables como el anión lineal  $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ .

El óxido  $\text{Au}_2\text{O}_3$  se obtiene, como precipitado amorfo,  $\text{Au}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , de color marrón, en medio alcalino a partir del halurocomplejo planocuadrado  $[\text{AuCl}_4]^-$ . La cloración de polvo de oro a 200 °C da moléculas diméricas planas de  $\text{Au}_2\text{Cl}_6$ , de color rojo, que es el reactivo de partida para preparar muchos compuestos de oro; cuando se calienta a 160°C nos da el AuCl. Se conocen los tres monohaluros AuX (X = Cl, Br, I) cuya estructura se define por cadenas en zigzag, ...X-Au-X..., con puentes angulares Au-X-Au (72°-90°).

El ion dicianoaurato  $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$  de gran importancia metalúrgica se forma con facilidad cuando se hace reaccionar oro con disoluciones de cianuros en presencia de aire. La disolución de oro en agua regia o de  $\text{Au}_2\text{O}_3$  en ácido clorhídrico concentrado, genera el ion tetracloroaurato(III),  $[\text{AuCl}_4]^-$ , que se usa como "oro líquido" para decorar cerámicas y vidrios, ya que cuando se calienta deja una película de oro.

La evaporación de estas disoluciones generan cristales amarillos de  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; las disoluciones acuosas de esta sal genera un medio fuertemente ácido. Este anión tetracloroaurato(III),  $[\text{AuCl}_4]^-$ , se hidroliza fácilmente a  $[\text{AuCl}_3\text{H}]^-$ .

El tricloruro de oro,  $\text{AuCl}_3$ , y el ácido cloroáurico,  $\text{HAuCl}_4$ , son algunos de los compuestos más comunes de oro.

También existen otros aniones planocuatros del tipo  $[\text{AuX}_4]^-$ , siendo X:  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{SCN}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ; al igual que en los complejos equivalentes de Pd(II) y Pt(II). [4-7]

### Usos y aplicaciones del oro

El oro se puede alea con otros metales para darle características especiales. Cuando es mezclado con otros metales, tales como plata, cobre, cinc, el níquel, el platino, el paladio, el telurio, y el hierro, crea las varias tonalidades del color que se extienden de plata-blanco a verde y a naranja-rojo. Generalmente, los tonos del rojo, amarillos y verdes son hechos agregando cantidades que varían de cobre y de la plata para producir las aleaciones de 10 a 14 quilates. Los tonos blancos han sido hechos tradicionalmente aleando el níquel, el cinc y el cobre con oro, pero más recientemente la plata y el paladio han substituido el cinc. Estos tratamientos de variaciones de color del oro se utilizan sobre todo en joyería. [11]

En joyería fina se denomina oro alto o de 18k aquél que tiene 18 partes de oro por 6 de otro metal o metales (75% en oro), oro medio o de 14k al que tiene 14 partes de oro por 10 de otros metales (58,33% en oro) y oro bajo o de 10k al que tiene 10 partes de oro por 14 de otros metales (41,67% en oro).

En joyería, el oro de 18k es muy brillante y vistoso, pero es caro y poco resistente; el oro medio es el de más amplio uso en joyería, ya que es menos caro que el oro de 18k y más resistente, y el oro de 10k es el más simple.

Debido a su buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, así como una buena combinación de propiedades químicas y físicas, se comenzó a emplear a finales del siglo XX como metal en la industria.

En joyería se utilizan diferentes aleaciones de oro alto para obtener diferentes colores, a saber:

- Oro amarillo: 1 000 g de oro amarillo contienen 750 g de oro, 125 g de plata y 125 g de cobre.
- Oro rojo: 1 000 g de oro rojo contienen 750 g de oro y 250 g de cobre.
- Oro rosa: 1 000 g de oro rosa contienen 750 g de oro, 50 g de plata y 200 g de cobre.
- Oro blanco: 1 000 g de oro blanco contienen 750 g de oro y 160 g de paladio y 90 g de plata.
- Oro gris: 1 000 g de oro gris contienen 750 g de oro, alrededor de 150 g de níquel y 100 g de cobre.
- Oro verde: 1 000 g de oro verde contienen 750 g de oro y 250 g de plata.
- Oro azul: 1 000 g de oro azul contienen 750 g de oro y 250 g de hierro.

Cabe mencionar que el color que se obtiene, excepto en oro blanco, es predominantemente amarillo, es decir, el "oro verde" no es verde, sino amarillo con una tonalidad verdosa.

En la actualidad se le ha dado algunos usos terapéuticos: algunos compuestos de oro se emplean como antiinflamatorios en el tratamiento de la artritis reumatoide y otras enfermedades reumáticas. No se conoce bien el funcionamiento de estas sales de oro. El uso del oro en medicina es conocido como crisoterapia.

La mayoría de estos compuestos son poco solubles y es necesario inyectarlos. Algunos son más solubles y se pueden administrar por vía oral. Este

tratamiento suele presentar efectos secundarios, generalmente leves, pero es la principal causa de que los pacientes lo abandonen.

El cuerpo humano no absorbe bien este metal, pero sus compuestos pueden ser tóxicos. Hasta el 50% de pacientes con artrosis tratados con medicamentos que contenían oro han sufrido daños hepáticos y renales.

Algunos otros usos y aplicaciones son:

- El oro ejerce funciones críticas en comunicaciones, naves espaciales, motores de aviones de reacción y otros muchos productos.
- Su alta conductividad eléctrica y resistencia a la oxidación ha permitido un amplio uso como capas delgadas electrodepositadas sobre la superficie de conexiones eléctricas para asegurar una conexión buena, de baja resistencia.
- Al igual que la plata, el oro puede formar fuertes amalgamas con el mercurio que a veces se emplea en empastes dentales.
- El oro coloidal (nanopartículas de oro) es una solución intensamente coloreada que se está estudiando en muchos laboratorios con fines médicos y biológicos. También es la forma empleada como pintura dorada en cerámicas.
- El ácido cloroaúrico se emplea en fotografía.
- El isótopo de oro  $^{198}\text{Au}$ , con un periodo de semidesintegración de 2,7 días, se emplea en algunos tratamientos de cáncer y otras enfermedades.
- Se emplea como recubrimiento de materiales biológicos permitiendo ser visto a través del microscopio electrónico de barrido (MEB).
- Se emplea como recubrimiento protector en muchos satélites debido a que es un buen reflector de la luz infrarroja.
- Se utiliza para la elaboración de flautas traveseras finas debido a que el color del sonido de una flauta de oro es cálido mientras que el de una flauta de plata es más brillante, se suelen combinar entre las diferentes partes de las flautas.

- El oro se usó en los primeros cables en vez del cobre, debido a su gran conductividad. Sin embargo, fue sustituido por plata debido a los robos que se producían. Asimismo, cambiaron la plata por cobre por los robos.
- El oro se localiza en el teléfono, en el transmisor en su boquilla, debido a su capacidad de transportar una señal superior, se utiliza para recubrir terminales del teléfono y los cables que conectan. [9]

Una computadora tiene partes que poseen oro que son las siguientes:

- 1.- el microprocesador
- 2.- la tarjeta principal o mainboard
- 3.- tarjetería (sonido, video, etc.)

De estos tres el que posee mayor concentración de oro es el microprocesador (90%), los otros dos restantes un 10%.

El microprocesador tiene el oro en forma de bañado electrolítico en sus puntos de contacto o pines y en su interior. En la placa están en los contactos PCI, VESA y ISA, principalmente y en menor concentración en otras partes. La tarjetería posee filamentos de contacto es ahí donde se encuentra el oro.

Los tipos de procesadores que contienen oro son:

- Microprocesador Intel 386 DX® 17/10/85 16 MHz. 20 MHz. 25 MHz. 33 MHz.
- Microprocesador Intel 386 SX® 16/6/88 16 MHz. 20 MHz. 16 Bits
- Microprocesador Intel 486 DX® 10/4/89 25 MHz. 33 MHz. 50 MHz. 32 Bits
- Microprocesador Intel 486 SX® 22/4/91 16 MHz. 20 MHz. 25 MHz. 33 MHz.
- Procesador Pentium® 22/3/93 60 MHz. 66 MHz. 75 MHz. 90 MHz. 100 MHz. 120 MHz. 133 MHz. 150 MHz. 166 MHz. 200 MHz.
- Procesador PentiumPro® 27/3/95 150 MHz. 180 MHz. 200 MHz.

Un microprocesador es una pastilla envuelta en plástico o cerámica de unos pocos milímetros de longitud que alberga en su interior un gran número de

transistores de silicio. La base de un microprocesador es de silicio y sobre él están alojados los transistores o switches electrónicos.

Las uniones entre el microchip y los pines metálicos de conexión son por medio de finos cables. La fabricación de los microprocesadores se debe realizar en ambientes casi perfectamente limpios, ya que una pequeña partícula de polvo que ingrese a la parte interna de estos puede deteriorarlo definitivamente. Debido a esto, el aire de las salas de impresión de microchips es entre 7 y 10 veces más puro que el de una sala quirúrgica [13].

Por sus características físicas y sus aplicaciones tanto tecnológicas como ornamentales y su escasez, hacen que el oro tenga un elevado precio, lo que ha impulsado el estudio y la explotación de procesos para su recuperación.

### **Efectos del Oro sobre la salud**

Efectos de la sobre-exposición:

- Inhalación: Puede provocar irritación si la exposición es prolongada o excesiva.
- Ingestión: No se esperan efectos adversos.
- Piel: Puede provocar irritación y reacción alérgica.
- Ojos: Puede provocar irritación.

### **Efectos ambientales del Oro**

La ecotoxicidad del oro no ha sido evaluada. Sin embargo, se espera que la degradación del oro bajo condiciones aerobias sea muy pobre y no hay evidencia que sugiera que pueda crear problemas ecológicos al ser vertido en el medio. Ya que el oro es insoluble, se cree que tiene características mínimas de bioacumulación y biodisponibilidad.

En cambio la minería del oro ha sido tradicionalmente una de las que mayor impacto ambiental produce, por un lado las explotaciones suelen ser a cielo abierto produciéndose grandes impactos sobre el paisaje y el suelo, que deben ser restaurados en la fase de abandono de la explotación y por otro lado, el proceso mineralógico para obtener el oro metálico a partir de la mena, que normalmente utiliza cianuro como complejante y disolvente del oro de la mena, produce elevados vertidos de aguas cianuradas que constituyen un elevado peligro medioambiental. Un ejemplo claro de esta problemática ha sido la ruptura de una laguna de residuos en la mina de oro AURUL (Sasar, Rumania) y el vertido al Río Danubio de 10 000 m<sup>3</sup> de aguas cianuradas en febrero de 2000, que supuso a los países afectados (Rumania, Hungría, Yugoslavia, Bulgaria y Ucrania) una catástrofe ecológica de gran magnitud. [11]

## **PROCESOS DE SEPARACIÓN**

La separación de mezclas en componentes esencialmente puros es de gran importancia en la fabricación de productos químicos. La mayor parte del equipo de una planta química típica tiene como fin la purificación de materias primas, productos intermedios y productos finales, mediante operaciones de transferencia de materia.

Las operaciones de separación son procesos de transferencia de materia entre fases debido a que implican la creación, mediante la adición de calor, como ocurre en destilación o de un agente material, como en absorción o extracción, de una segunda fase, y la subsiguiente separación selectiva de componentes químicos de la mezcla monofásica original por transferencia hacia la nueva fase creada.

Los procesos químicos industriales manufacturan productos que difieren en la naturaleza química de las alimentaciones del proceso, que son materias primas naturales de los reinos mineral, animal o vegetal, productos intermedios, productos químicos comerciales, o residuos [14].

### **Extracción líquido-líquido**

Esta técnica se utiliza para separar dos líquidos miscibles utilizando un disolvente que disuelve preferentemente en uno de ellos. En extracción es preciso recuperar el disolvente, generalmente por destilación, para su reutilización. Puesto que la mayor parte de los métodos de extracción continua usan contactos en contracorriente entre dos fases, muchos de los fundamentos de la absorción de gases se pueden aplicar a la extracción líquido-líquido, cuestiones como etapas ideales, eficiencias, etcétera.

En extracción, lo mismo que en absorción de gases, es preciso poner en contacto dos fases para permitir la transferencia de materia y separar después las fases. Con frecuencia las fases son difíciles de mezclar y todavía más difíciles de separar. El extracto es la capa de disolvente más el soluto extraído y el refinado es la capa de la que se ha separado el soluto: el extracto puede ser más o menos denso que el refinado, de forma que pueda salir por la parte superior del equipo y otras por el fondo. Las gotas del líquido ligero ascienden a través de la masa de líquido más pesado que desciende por la torre como una corriente continua. Las gotas se recogen en la parte superior y forman la corriente del líquido más ligero que sale por la cima del equipo. El líquido más pesado sale por el fondo. Hay una transferencia continua de materia entre las fases, y la composición de las fases varía a medida que circula. La velocidad de transferencia es relativamente baja en comparación con absorción o destilación y un equipo alto puede ser equivalente a sólo unas pocas etapas ideales [15].



Un proceso basado en la extracción líquido-líquido para la separación y purificación de metales nobles tiene varias ventajas sobre el proceso de precipitación convencional: disminuye el número de etapas de reciclado debido a que las separaciones son más selectivas, con lo que se reduce el tiempo total del proceso; también se mejoran los rendimientos ya que hay menores pérdidas de metales preciosos, que tienen un precio elevado. Todo esto hace que disminuyan los costos de producción. Por otra parte, las técnicas de extracción ofrecen una mayor versatilidad y flexibilidad, y la posibilidad de operación y control en continuo o semi-continuo del proceso.

Una de las limitaciones importantes de los procesos de extracción líquido-líquido, especialmente a escala industrial, es el elevado consumo de disolvente y reactivos orgánicos. Dos son los problemas asociados con este gasto: por un lado el costo de reactivos especialmente diseñados para la separación de los distintos metales va a restringir su utilización a aquellos que sean rentables; por otro lado, la interacción de disolventes orgánicos con disoluciones acuosas, así como el propio uso de los disolventes, es una fuente de contaminación del medio al mismo tiempo que una pérdida económica.

### **Separación a través de membranas**

Las separaciones por medio de membranas se están volviendo cada vez más importantes en las industrias de proceso. En esta operación unitaria relativamente nueva, la membrana actúa como una barrera semipermeable y la separación ocurre porque la membrana controla la cantidad de movimiento de varias moléculas entre dos fases líquidas, dos fases gaseosas o una fase líquida y una gaseosa. Las dos fases fluidas suelen ser miscibles y la barrera de la membrana impide el flujo hidrodinámico normal, su fuerza de transporte puede ser por una diferencia de concentración, de presión, temperatura, etc. lo cual permite el transporte del soluto, como se puede apreciar en la siguiente figura 1[16-17].

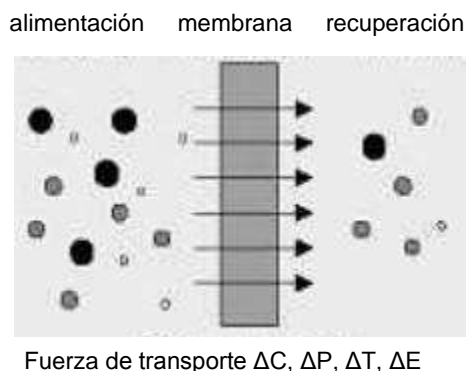


Figura 1. Representación del transporte de una membrana.

Una membrana se puede definir como una barrera que separa dos fases y que presenta diferentes grados de permeabilidad para las distintas sustancias o especies químicas que componen estas fases. El mecanismo mediante el cual esta barrera puede restringir el movimiento de partículas o moléculas puede ser muy variado, por exclusión por tamaño, por diferencia de solubilidad y/o de coeficientes de difusión de los distintos componentes en la membrana.

En los procesos de membrana el grado de separación viene determinado por la diferente velocidad de permeación de las distintas especies a través de la membrana. Esta es la principal característica diferencial respecto a la mayoría de los procesos de separación, que están basados en el equilibrio entre fases, como en el caso de la extracción líquido-líquido o la destilación [18].

El uso de técnicas de separación por membrana de líquidos o gases resulta muy válido para separar mezclas de compuestos con propiedades físicas y químicas similares, mezclas de isómeros y mezclas que contienen sustancias térmicamente inestables. Este tipo de procesos es particularmente útil como técnica de separación cuando otras más convencionales no son económicamente recomendables para obtener unas especificaciones de producto determinadas [16].

## Tipos de membranas

Las membranas se pueden clasificar por:

- Naturaleza: biológicas o sintéticas. Difieren tanto en su estructura como en su funcionalidad.
- Morfología o estructura: simétricas o asimétricas. La estructura de la membrana determina sus propiedades de separación y su aplicación.
- *Simétricas*: Pueden ser porosas o no porosas. Su resistencia a la transferencia se debe a su grosor 10-200 micras.
- *Asimétricas*: Compuestas de una capa densa 0,1- 0,5 micras. Soportada en un sustrato poroso 50-150 micras. También pueden estar formadas por composites, materiales de distinta naturaleza química.

Asimismo las membranas se pueden clasificar de acuerdo a su uso:

- Ultrafiltración
- Nanofiltración
- Microfiltración
- Membranas líquidas emulsionadas
- Diálisis
- Electrodialisis
- Membranas líquidas soportadas

## Propiedades de membranas poliméricas

Las membranas sintéticas orgánicas están formadas de materiales poliméricos, sus propiedades dependen de las propiedades del polímero. Las membranas inorgánicas están formadas por materiales arcillosos, zeolitas, óxidos de aluminio, etc.

### *Membranas porosas*

Se utilizan en micro y ultrafiltración. La selectividad se debe al tamaño de los poros y a procesos de adsorción, por lo que son importantes las propiedades de resistencia mecánica y térmica junto con las propiedades de adsorción para evitar el ensuciamiento.

### *Membranas no porosas*

Se utilizan principalmente en procesos de separación de gases. La selectividad y permeabilidad vienen determinadas por las propiedades intrínsecas del polímero. Se utilizan tanto polímeros vítreos como gomosos dependiendo de las condiciones especiales de aplicación.

## **Ventajas y desventajas de membranas poliméricas**

### *Ventajas:*

- El proceso se lleva a cabo de forma continua
- Poco consumo de energía
- No se requieren aditivos
- Se pueden producir sistemas muy específicos
- Se utilizan pequeñas cantidades de compuestos para su síntesis.
- Costo bajo de fabricación

### *Desventajas:*

- Polarización de la concentración y ensuciamiento
- Bajo tiempo de vida útil de las membranas
- Baja selectividad o flujo
- Proceso lento
- Frágil a altas concentraciones de ácido
- Deformación a altas temperaturas

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### ESPECTROFOTOMETRÍA ULTRAVIOLETA/VISIBLE

La espectroscopia UV-visible se utiliza para identificar algunos grupos funcionales de moléculas, y además, para determinar el contenido de una sustancia. Se utiliza de manera general en la determinación cuantitativa de los componentes de soluciones de iones de metales de transición y compuestos orgánicos altamente conjugados. Se utiliza extensivamente en laboratorios de química y bioquímica para determinar pequeñas cantidades de cierta sustancia, como las trazas de metales en aleaciones o la concentración de cierto medicamento que puede llegar a ciertas partes del cuerpo.

#### Principio físico

El principio de la espectroscopia ultravioleta-visible involucra la absorción de radiación violeta-visible por una molécula, causando la promoción de un electrón de un estado basal a un estado excitado, liberándose en exceso de energía en forma de calor. La longitud de onda ( $\lambda$ ) comprende entre 200 y 800 nm, como se puede apreciar en la siguiente figura, la región de luz visible del espectro.[19]

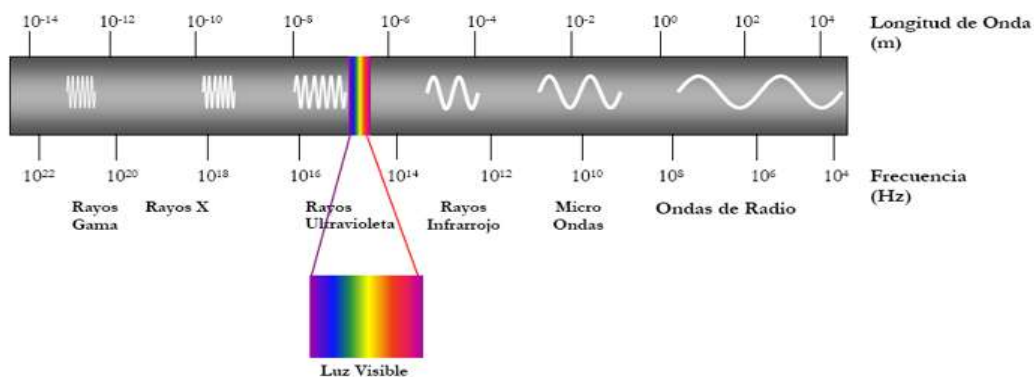


Figura 2. Región del espectro electromagnético que aplica la UV-VIS

La luz visible o UV es absorbida por los electrones de valencia, éstos son promovidos a estados excitados (de energía mayor). Al absorber radiación electromagnética de una frecuencia correcta, ocurre una transición desde uno de estos orbitales a un orbital vacío. Las diferencias entre energías varían entre los diversos orbitales. Algunos enlaces, como los dobles, provocan coloración en las moléculas ya que absorben energía en el visible así como en el UV, como es el caso del  $\beta$ -caroteno.

Cuando un haz de radiación UV-VIS atraviesa una disolución conteniendo un analito absorbente, la intensidad incidente del haz ( $I_0$ ) es atenuada hasta un valor  $I$ . Esta fracción de radiación que no ha logrado traspasar la muestra es denominada transmitancia ( $T$ ) ( $T = I/I_0$ ). Por aspectos prácticos, se usa la absorbancia ( $A$ ) en lugar de la transmitancia ( $A = -\log T$ ), por estar relacionada linealmente con la concentración de la especie absorbente según la Ley de Beer-Lambert:  $A = \alpha \cdot l \cdot C$ , donde:  $\alpha$  = coeficiente de absorbancia molar ( $M^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ),  $l$  = camino óptico (cm),  $C$  = concentración de la especie absorbente (M).

### El espectrofotómetro ultravioleta-visible



Figura 3. Imagen de un espectrofotómetro Ultravioleta-Visible

El espectrofotómetro, como el de la figura anterior, es un instrumento que permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto, y que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia. Todas las sustancias pueden absorber energía radiante. El vidrio, que parece ser completamente transparente, absorbe longitudes de onda que pertenecen al espectro visible; el agua absorbe fuertemente en la región del IR. La absorción de las radiaciones UV, visibles e IR depende de la estructura de las moléculas y es característica para cada sustancia química. El color de las sustancias se debe a que absorben ciertas longitudes de onda de la luz blanca que incide sobre ellas y sólo dejan pasar a nuestros ojos aquellas longitudes de onda no absorbida.

Esta espectrofotometría utiliza radiaciones del campo UV de 80 a 400 nm, principalmente de 200 a 400 nm llamado UV cercano y de luz visible de 400 a 800 nm, por lo que es de gran utilidad para caracterizar las soluciones en la región ultravioleta-visible del espectro.

### **Tipos de espectrofotómetros**

Existe una gran variedad de estos instrumentos, dependiendo de las características de fabricación, podemos mencionar que hay dos tipos de acuerdo a su diseño óptico:

- Ultravioleta-visible de simple haz
- Ultravioleta-visible de doble haz
- Ultravioleta
- Ultravioleta-visible de longitud de onda dual

- Ultravioleta-visible de simple haz

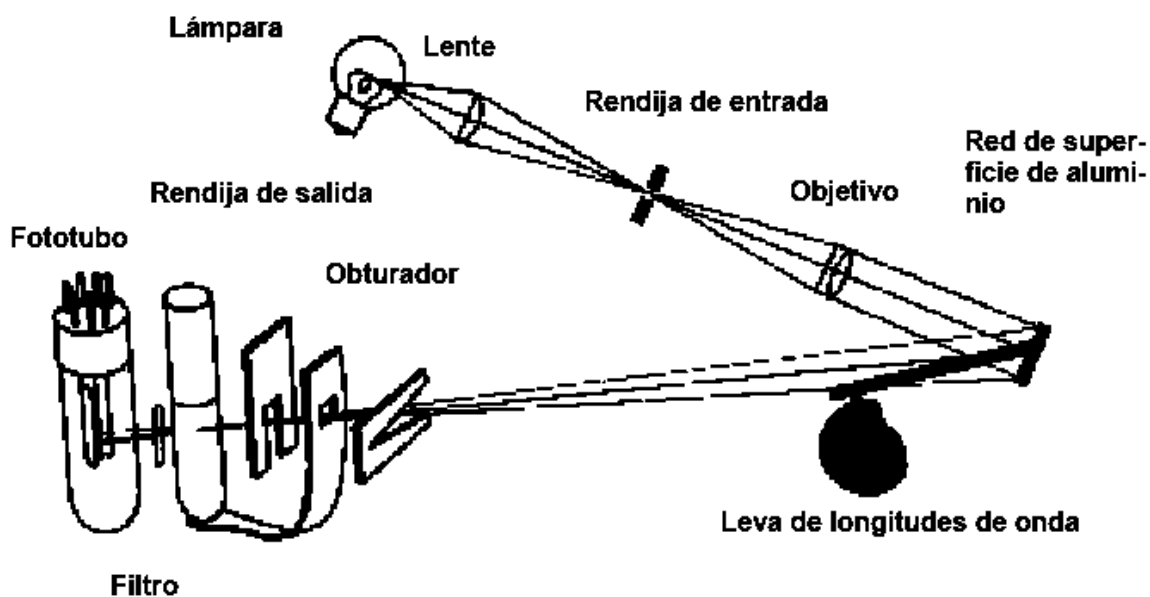


Figura 4. Arreglo óptico de un espectrofotómetro Ultravioleta-Visible de simple haz

Los espectrofotómetros de un solo haz, como el de la figura anterior, requieren el intercambio de la muestra y de las soluciones de referencia para cada longitud de onda, porque están mejor capacitados para la operación manual que para la automática.



- Ultravioleta-visible de doble haz

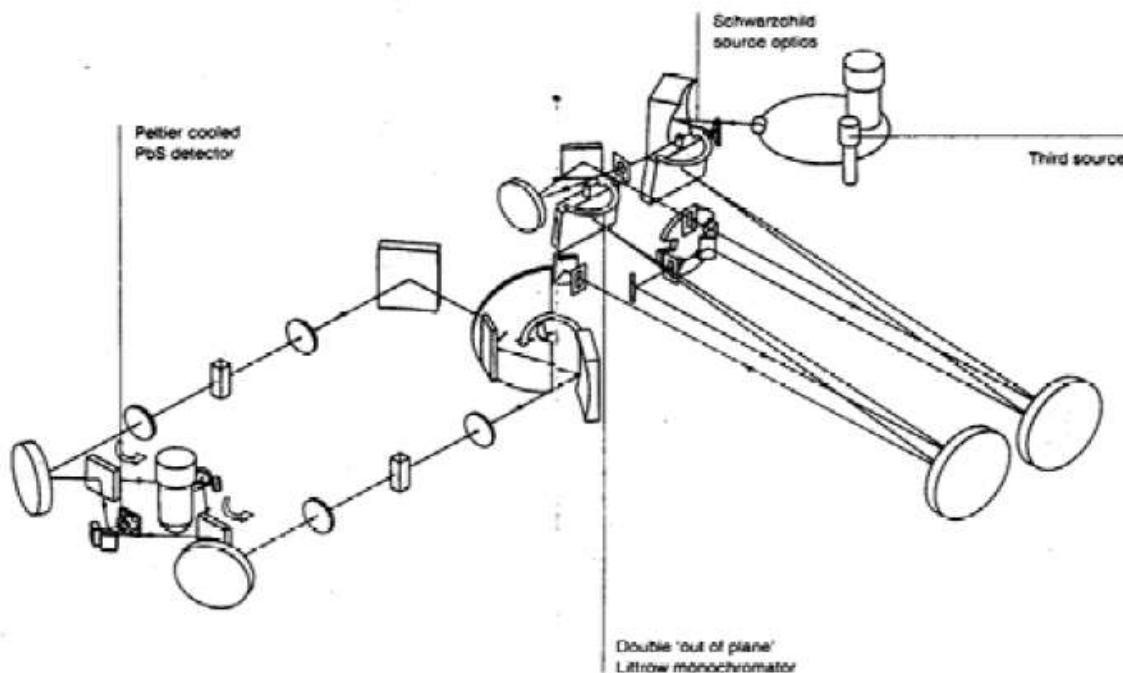


Figura 5. Arreglo óptico de un espectrofotómetro Ultravioleta-Visible de doble haz

Una posible fuente de error en cualquier tipo de espectrofotómetro es la provocada por las fluctuaciones que aparecen en la intensidad de la fuente de radiación. Las variaciones a corto plazo generalmente resultan de la falta de regulación en la potencia de la línea. A largo plazo las variaciones adicionales pueden deberse al deterioro de la lámpara o de otros componentes. Por supuesto, cualquier cambio en la intensidad durante la comparación entre el problema y el tipo, causará un error. La manera más efectiva de eliminar los efectos derivados de las variaciones de la fuente es el empleo de un diseño de doble haz. La ventaja de este espectrofotómetro de doble haz, como el de la figura 5, es que ofrece cortar la radiación en una sucesión de pulsos. Por una parte, facilita el diseño de un sistema electrónico que escoja las señales pertenecientes a los dos canales; por la otra, permite una importante discriminación de las señales indeseables (ruido) y de la radiación extraviada no cortada, gracias a que el amplificador puede sintonizarse para que corresponda solamente a las señales moduladas de la frecuencia interrumpida.

- Ultravioleta

Generalmente los espectrofotómetros para el ultravioleta y el visible tienen como límite inferior el intervalo que va de los 165 a los 210nm. El límite superior nunca es menor de 650 nm, pudiendo extenderse hasta los 1000 nm o más. Hasta 1963 había muy pocos instrumentos que llegaran a 210 nm, límite impuesto principalmente por la absorción del cuarzo natural. El uso de la sílice vítrea de calidad óptima ha abierto grandes posibilidades en la observación de compuestos que contiene dobles ligaduras y de algunos otros grupos que absorben en esta región. El primer espectrofotómetro del ultravioleta con detección fotoeléctrica que apareció en el mercado norteamericano fue el modelo DU de Beckman.

- Ultravioleta-visible de longitud de onda dual

Es posible diseñar un instrumento en donde dos haces de radiación de diferente longitud de onda pasen simultáneamente a través de una sola celda. Este principio se emplea en diferentes formas:

- 1) Puede utilizarse sin ajuste para medir dos componentes, registrando su variación con el tiempo para estudios cinéticos o para procesos de control.
- 2) Una longitud de onda puede fijarse en un punto de absorbancia despreciable mientras que la otra longitud de onda puede ser variable.
- 3) Puede operarse con la misma configuración que para dar espectros de absorción correctos en presencia de una turbidez alta; en este caso la trayectoria de la longitud de onda efectiva es inherentemente incierta debido al efecto de la materia en suspensión, lo que garantiza que la trayectoria de ambos rayos sea la misma.
- 4) Finalmente, las dos longitudes de onda pueden ser revisadas al mismo tiempo, aunque con un desajuste de unos cuantos décimos de nanómetro, de modo que el espectrograma resultante muestra la diferencia entre las dos absorbancias a las dos longitudes de onda contra la longitud de onda promedio, obteniéndose así una curva de derivada [19-20].

## Componentes de un espectrofotómetro



Figura 6. Celdas de espectrofotometría de cuarzo y de plástico.

### Fuente de luz

La fuente de luz que ilumina la muestra debe cumplir con las siguientes condiciones: estabilidad, direccionabilidad, distribución de energía espectral continua y larga vida. Algunos tipos de lámparas son:

- *Lámparas de filamento de tungsteno:* se utilizan para longitudes de onda del espectro visible y el ultravioleta próximo. Son fuentes de un espectro continuo de energía radiante entre 360-950 nm.
- *Lámparas de filamentos de haluros de tungsteno:* son de mayor duración y emiten energía radiante de mayor intensidad.
- *Lámparas de Hidrógeno y Deuterio:* producen un espectro continuo en la región ultravioleta entre 220-360 nm.
- *Lámparas de vapores de Mercurio:* Emiten un espectro discontinuo o espectro de líneas que se utilizan para calibración de longitudes de onda, se emplean solo para espectrofotómetros y cromatografía.

Precauciones:

- Las subidas y bajadas bruscas de tensión producen sufrimiento de la lámpara y cambios en las lecturas de la absorbancia.
- La lámpara tiene una vida útil limitada y se debe vigilar para que funciones correctamente el equipo.

Monocromador

El monocromador aísla las radiaciones de longitud de onda deseada que inciden o se reflejan desde el conjunto, se usa para obtener luz monocromática. Está constituido por las rendijas de entrada y salida, colimadores y el elemento de dispersión. El colimador se ubica entre la rendija de entrada y salida. Es un lente que lleva el haz de luz que entra con una determinada longitud de onda hacia un prisma el cual separa todas las longitudes de onda de ese haz y la longitud deseada se dirige hacia otra lente que direcciona ese haz hacia la rendija de salida.

Celda de muestra

Es donde tiene lugar la interacción con la muestra (debe producirse donde no haya absorción ni dispersión de las longitudes de onda). Es importante destacar, que durante el proceso, se aplica la Ley de Beer-Lambert en su máxima expresión, en base a sus leyes de absorción, en lo que concierne al paso de la molécula de fundamental a excitado. Pueden ser de distintos tipos y tamaños (cuadradas, rectangulares, cilíndricas). Se obtienen mejores resultados usando celdas de bordes paralelos. Si se utilizan celdas cilíndricas se deben marcar e introducir en el aparato siempre en la misma posición. Las celdas suelen estar fabricadas en vidrio o en plástico (Figura 6).

### Detector

Puede ser de dos tipos:

- *Fotocélulas o células fotovoltaicas:*

Es una lámina de cobre sobre la que se extiende una capa de selenio o de óxido de cobre. A esto se le conoce como semiconductor. Sobre el semiconductor hay una capa de metal transparente que sirve de electrodo. La luz incide sobre el selenio y éste desprende electrones, que pasan a la placa de cobre originando una diferencia de potencial por existir carga negativa sobre el cobre y positiva sobre el selenio. El conjunto se conecta a un amperímetro que señala el paso de corriente.

Características: son resistentes, económicas y sensibles desde el ultravioleta hasta los 1 000 nm de longitud de onda; no se requiere batería externa ni vacío. La corriente producida es directamente proporcional a la energía que llega y tienen “efecto fatiga”, es decir, que presentan una subida inicial de corriente, que luego decrece progresivamente hasta el equilibrio. Por eso hay que esperar entre 30-60 segundos entre una lectura y otra.

- *Fototubos multiplicadores:*

Un fototubo multiplicador es un tubo que contiene un cátodo que emite electrones de forma proporcional a la energía que incide sobre él. Tiene un ánodo que recoge los electrones y la corriente se multiplica varias veces al chocar los electrones sobre sucesivos ánodos que van teniendo un voltaje superior al precedente. La señal se amplifica en cientos o miles de veces.

Características: el tiempo de respuesta es muy rápido, no tienen “efecto fatiga” tan altos como la anterior y son muy sensibles.

### Medidor

Son sistemas de lectura de la energía eléctrica que recoge el detector y que puede ser lectura directa (se utiliza una célula fotovoltaica) o puede ser amplificadores de señal como en el caso del fototubo multiplicador. Los actuales aparatos incorporan lectura digital y cálculos automáticos de concentraciones con relación a las curvas de calibración. [21]

### **Ley de Beer-Lambert**

La Ley de Beer-Lambert es una relación empírica que relaciona la absorción de luz con las propiedades del material atravesado.

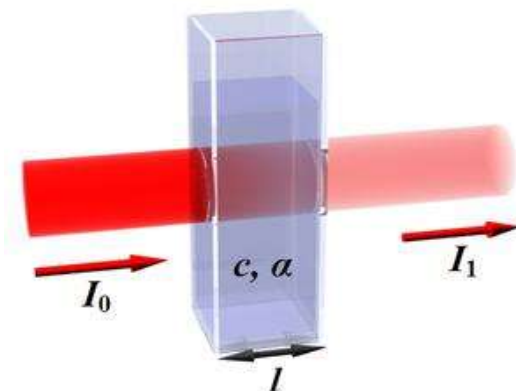


Figura 7. Diagrama de la absorción de un haz de luz atravesando una celda de tamaño  $l$ .

La ley de Beer-Lambert relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción (Figura 7). La relación entre ambas intensidades puede expresarse a través la siguiente relación:

$$T = \frac{I_1}{I_0} = 10^{-\alpha l C} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

T transmitancia, (adimensional)

$I_1$  intensidad de la luz transmitida

$I_0$  intensidad de la luz que proviene de la fuente

$\alpha$  el coeficiente de extinción molar, también llamado coeficiente de absorción. Es constante para un compuesto dado siempre que se fijen condiciones de longitud de onda, de pH, de temperatura, de solventes, etc. ( $M^{-1} \cdot cm^{-1}$ )

l la longitud de trayectoria del haz a través de la muestra. (cm)

C es la concentración del absorbente. (M)

La relación  $I_1/I_0$  se conoce como transmitancia T, y es la medida primaria que se realiza en los instrumentos para medir la absorción de luz por parte de una muestra. Normalmente se expresa en forma porcentual y se llama porcentaje de transmitancia. La luz sería la diferencia entre la intensidad de luz incidente y la intensidad transmitida después de pasar a través de la muestra. En el exponente, el signo negativo se debe a que la energía radiante decrece a medida que el recorrido aumenta.

La ley de Beer-Lambert se puede escribir de distintas formas:

$$\log T = -\alpha l C \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$-\log T = A = \alpha l C \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Las ecuaciones mencionadas anteriormente son válidas solo si:

- La radiación incidente es monocromática.
- Las especies actúan independientemente unas de otras durante la absorción.
- La absorción ocurre en un volumen de sección transversal uniforme.

La aplicación práctica de la Ley de Beer-Lambert es que conociendo la absorbancia de una sustancia podemos averiguar su concentración y esto se puede hacer de dos formas:

- Por comparación con una solución conocida: se tienen 2 soluciones, una problema (P) y una estándar (S).
- A través de una curva de calibración: la curva de calibración es la representación gráfica en un eje de coordenadas de la absorbancia (eje de ordenadas) frente a la Concentración (eje de abscisas). Se ensayan varias soluciones de concentración conocida y se determinan sus absorbancias, construyéndose la curva de calibrado, que debe ser una recta. Una vez ensayadas las soluciones problemas, su concentración se averigua por interpolación de las A de las soluciones problema en la curva de calibración.

Hay que tener en cuenta la linealidad, que es el intervalo de concentraciones del cromógeno entre las cuales existe una relación lineal entre absorbancia y concentración.

Cuando la concentración del cromógeno sobrepasa los límites de linealidad se deja de cumplir la Ley de Beer-Lambert, convirtiéndose la recta en una curva. La lectura de la absorbancia fuera de los límites de linealidad se traduce en una concentración falsamente baja de cromógeno. En esta situación, hay que diluir la muestra para que su concentración se localice entre los límites de la linealidad.



## MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO



Figura 8. Imagen de un microscopio electrónico de barrido.

El Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) o SEM (*Scanning Electron Microscope*), es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Tiene gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución, que significa que características espacialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas con alta magnificación. La preparación de las muestras es relativamente fácil pues la mayoría de MEBs sólo requieren que estas sean conductoras.

En el microscopio electrónico de barrido la muestra es recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el cobre para darle propiedades conductoras a la muestra. Posteriormente es barrida con los electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo

capaz de mostrar figuras en tres dimensiones, proyectados en una imagen de TV o una imagen digital. Su resolución está entre 3 y 20 nm, dependiendo del microscopio. Permite obtener imágenes de gran resolución en materiales pétreos, metálicos y orgánicos. La luz se sustituye por un haz de electrones, las lentes por electroimanes y las muestras se hacen conductoras metalizando su superficie.

## **Funcionamiento**

En el microscopio electrónico de barrido es necesario acelerar los electrones en un campo eléctrico, para aprovechar de esta manera su comportamiento ondulatorio, lo cual se lleva a cabo en la columna del microscopio, donde se aceleran por una diferencia de potencial de 1,000 a 30,000 voltios. Los electrones acelerados por un voltaje pequeño son utilizados para muestras muy sensibles, como podrían ser las muestras biológicas sin preparación adicional, o muestras muy aislantes. Los altos voltajes se utilizan para muestras metálicas, ya que éstas en general no sufren daños como las biológicas, y de esta manera se aprovecha la menor longitud de onda para obtener mejor resolución. Los electrones acelerados salen del cañón, y son enfocados por las lentes condensadora y objetiva, cuya función es reducir la imagen del filamento, de manera que incida en la muestra un haz de electrones lo más pequeño posible (para así obtener mejor resolución). Con las bobinas deflectoras se barre este fino haz de electrones sobre la muestra, punto por punto y línea por línea.

Cuando el haz incide sobre la muestra, se producen muchas interacciones entre los electrones del mismo haz, y los átomos de la muestra; puede haber por ejemplo, electrones rebotados como las bolas de billar. Por otra parte, la energía que pierden los electrones al "chocar" contra la muestra puede hacer que otros electrones salgan despedidos (electrones secundarios), y producir rayos X, electrones Auger, etc. El más común de éstos es el que detecta electrones

secundarios, y es con el que se hacen la mayoría de las imágenes de microscopios de barrido.

También es posible adquirir la señal de Rayos X que se produce cuando se desprenden estos mismos de la muestra, y posteriormente hacer un análisis espectrográfico de la composición de la muestra.

### **Utilización**

Los MEB son ampliamente utilizados en la biología celular. Aunque permiten una menor capacidad de aumento que el microscopio electrónico de transmisión, permiten apreciar con mayor facilidad texturas y objetos en tres dimensiones que hayan sido pulverizados metálicamente antes de su observación. Por esta razón solamente pueden ser observados organismos muertos, y no se puede ir más allá de la textura externa que se quiera ver. Los microscopios electrónicos sólo pueden ofrecer imágenes en blanco y negro puesto que no utilizan luz.

Este instrumento permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características. Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de diversos materiales, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas [22].

## Reactivos

- Triacetato de celulosa, Baker Co.
- 2-nitrofenil octil éter, Aldrich Co.
- 1,2-tetradecanodiol, 90% tech., Aldrich Co.
- Cloroformo, 99.8% Aldrich Co.
- Ácido clorhídrico, 37% Aldrich Co.
- Cloruro de sodio, 99% Aldrich Co.
- Solución estándar de oro (III), 1025 ppm, Aldrich Co.

## Equipo utilizado

- Espectrofotómetro UV.Vis ,Lamda 40, marca Perkin-Elmer.
- Balanza analítica
- Parrilla eléctrica
- Ph-metro
- Desionizador Banrnstead nanopure
- Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL modelo JSM6400 con un microanalizador marca BRUKER modelo XFLASH 4010

## Desarrollo experimental

### *Síntesis de la membrana*

- Se pesaron 0.026 g de triacetato de celulosa que actúa como polímero, 0.05 g de 2-nitrofenil éter como plastificante y 0.045 g de 1,2-tetradecanodiol como extractante.
- Todo lo anterior se mezcló con 5 ml de cloroformo y se agitó durante 1 hora.
- Después se colocó en un molde de teflón y posteriormente se desprende la membrana del molde.

### *Eficiencia de la membrana*

- La membrana que presenta mayor permeabilidad (eficiencia) en el transporte de oro (III) o membrana óptima contiene 37.4% de 1,2-tetradecanodiol.

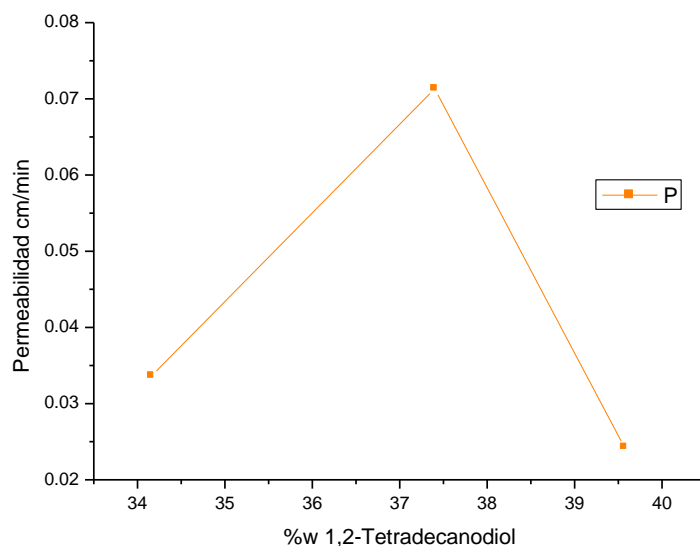


Figura 9. Gráfica que muestra la eficiencia de una membrana en función de la composición de 1,2-tetradecanodiol

En la gráfica anterior se puede observar que se obtienen mejores resultados con 0.045 g de 1,2-tetradecanodiol, por lo que esta será la cantidad de extractante usada.

#### *Estabilidad de la membrana*

- Se prepararon soluciones de oro (III) de concentración 0.0002 M (39.4 ppm) en HCl 1M, 3M y 5M. Estas soluciones se colocaron en el compartimento de la fase de alimentación de la celda de permeación.
- Se preparó una solución de NaCl 1M, pues esta solución se colocó en el compartimento de la fase de recuperación de la celda de permeación para facilitar el transporte del metal.
- El transporte de oro se realizó en una celda de permeación (Figura 10) con dos compartimientos, uno como fase de alimentación y otro como fase de recuperación. La membrana separa ambas fases.

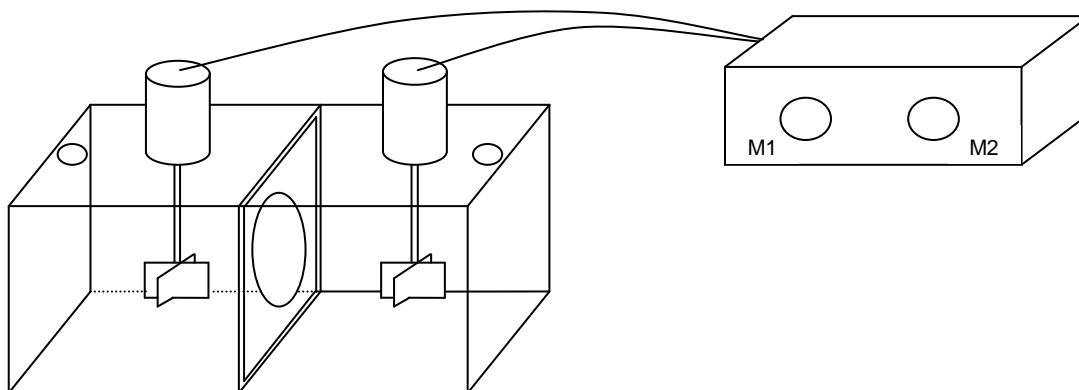


Figura 10. Representación de una celda de permeación.

- Se colocaron volúmenes idénticos (80 ml) de las fases de alimentación y recuperación en cada compartimiento. Los ensayos de estabilidad de la membrana óptima se realizaron para diferentes concentraciones de ácido clorhídrico (1M, 3M y 5M). El ciclo de operación fue de 8 hrs.
- Para determinar la variación de la concentración de oro en ambos compartimientos se utilizó un espectrofotómetro UV-VIS.

- Se calculó la fracción de oro que se transporta de la celda de alimentación a la de recuperación así como la permeabilidad de la membrana.
- Se determinó el pH de la fase de recuperación al finalizar cada ciclo.
- Se caracterizó la membrana por estudio por Microscopía Electrónica de Barrido.

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### OBSERVACIONES TERMÓDINÁMICAS

Los diagramas de estabilidad (Concentración-pH) son representaciones termodinámicas del sistema que permite visualizar de una manera global las zonas de estabilidad de los elementos y compuestos basándose en el pH y el potencial del proceso de oxidación y reducción.

Siempre hay que tener presente que los diagramas representan, en cuanto a exactitud, por los datos experimentales, un aproximado a la realidad. El conocimiento real de las variables permite tener una visión muy clara de lo que está ocurriendo en el proceso desde el punto de vista de las especies que están presentes en el medio.

Una primera evaluación termodinámica, indica que la disolución del oro usando sales oxidantes a temperatura ambiente es un proceso atractivo, que se muestra a través de las siguientes reacciones:



La estabilidad del complejo es parte importante para su extensión en el medio, por lo cual es importante que la reacción sea de izquierda a derecha.

El oro (III) predomina en la forma del complejo,  $\text{AuCl}_4^-$ , tal como se observa en la siguiente figura:



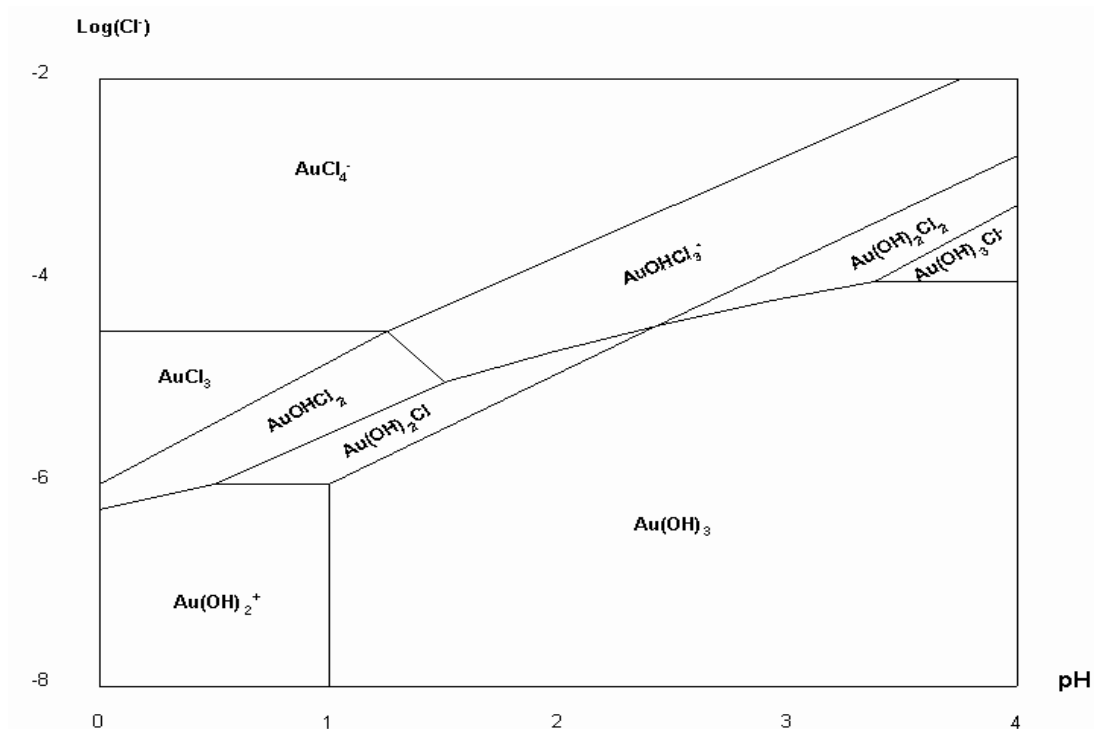


Figura 11. Diagrama de predominancia de áreas de las especies Au (III), OH<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>. Las líneas indican las condiciones bajo las cuales las especies adyacentes están presentes en concentraciones iguales.

Como puede observarse en la figura anterior, el oro forma complejos de cloruro e hidróxido en el intervalo pH ácido; pero a altas concentraciones de ión cloruro forman la especie  $\text{AuCl}_4^-$  que es la más estable, asimismo es convertida a  $\text{AuCl}_3$  a bajas concentraciones del ión cloruro. La especie neutra  $\text{Au(OH)}_3$  es muy estable comparada con otras especies de oro, tomando en cuenta el intervalo amplio de pH y de la concentración de ión cloruro en el cual predomina [20].

El complejo  $\text{AuCl}_4^-$  tiene una forma plano cuadrada, como la que se muestra en la siguiente figura:

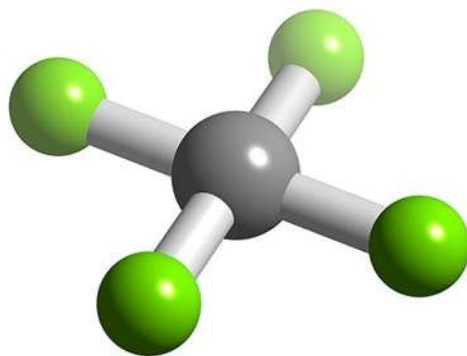
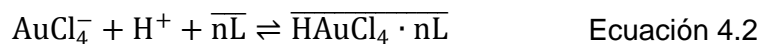


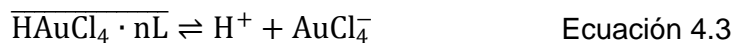
Figura 12. Representación tridimensional de la molécula del complejo  $\text{AuCl}_4^-$ .

De acuerdo al diagrama termodinámico y tomando en cuenta la naturaleza de las fases de alimentación y recuperación el oro forma el complejo  $\text{AuCl}_4^-$ . La membrana contiene como extractante solvantante al 1,2-tetradecanodiol, por lo que se propone el siguiente mecanismo de extracción-reextracción [20]:

*Reacción de extracción en la fase de alimentación:*



*Reacción de reextracción en la fase de recuperación:*



Aquí L representa al extractante y la barra indica las especies presentes en la membrana.

## ANÁLISIS CUANTITATIVO

Para analizar la celda de permeación se realiza un balance de masa de oro en la fase de alimentación y en la fase de recuperación, cumpliendo la siguiente ecuación:

$$[\text{Au}]_0 = [\text{Au}]_F + [\text{Au}]_S \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde:

$[\text{Au}]_0$  es la concentración molar de oro inicial.

$[\text{Au}]_F$  es la concentración molar de oro en la fase de alimentación.

$[\text{Au}]_S$  es la concentración molar de oro en la fase de recuperación.

### Proceso de separación de oro

Para evaluar el transporte del metal de la fase de alimentación (F) a la fase de recuperación (S) se determinó las concentraciones de oro en ambas fases mediante espectrofotometría UV-VIS. El tiempo se determinó que fuera de ocho horas (Figura 12) y para condiciones óptimas de diez horas (Figura 13).

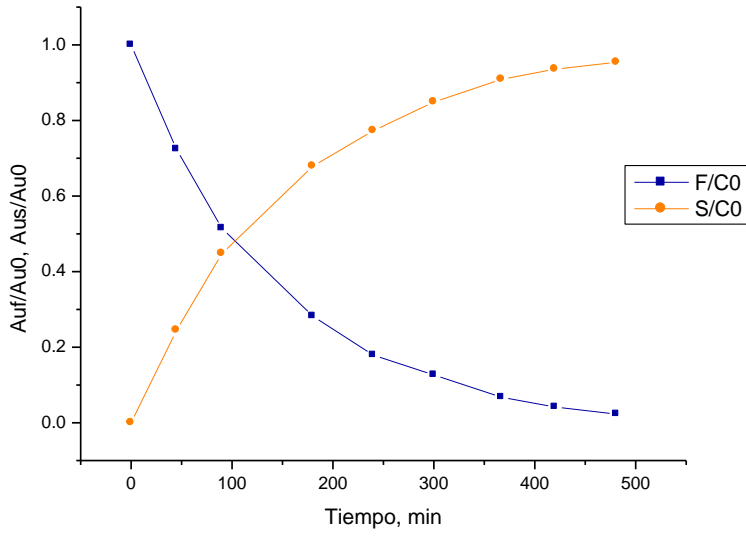


Figura 13. Transporte de oro de la fase de alimentación a la de recuperación de una membrana en medio 3M. Ciclo de operación: 8 horas.

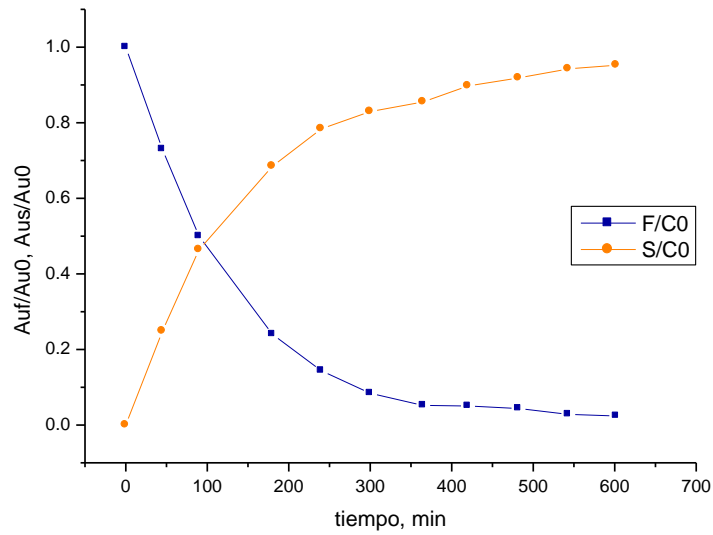


Figura 14. Transporte de oro de la fase de alimentación a la de recuperación de una membrana en medio 3M. Ciclo de operación: 10 horas.

La fracción molar de Au(III) en la fase de alimentación ( $X_F$ ) y recuperación ( $X_S$ ) se determina de la siguiente manera:

$$X_{F,S} = \frac{[Au]_{F,S}}{[Au]_0} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde:

$X_{F,S}$  = fracción molar del metal en la fase de alimentación o en la recuperación.

$[Au]_{F,S}$  = concentración molar de oro en la fase de alimentación (F) o en la fase de recuperación (S).

$[Au]_0$  = concentración molar de oro inicial.

Cabe destacar que la presentación de algunos resultados será en porcentaje molar de alimentación y de recuperación lo cual significa:

$$\%_{F,S} = X_{F,S} \times 100 \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Esto con la finalidad de poder representar mejor los resultados.

A continuación se muestra una tabla donde se puede determinar la eficiencia de la membrana.

Tabla 2. Porcentaje molar de Au(III) transportado a la fase de recuperación con desviación estándar. Ciclo de operación: 8 horas. Composición de la membrana: 37.4 % de 1,2-Tetradecanodiol

EFICIENCIA DE LA MEMBRANA A 480 MIN						
ciclo	1M	$\sigma$	3M	$\sigma$	5M	$\sigma$
1	69.26937	1.01353	79.31703	1.18131	80.66875	0.59489
2	71.15532	0.69108	86.31875	0.55484	76.31555	0.85065
3	70.60371	0.83653	84.85609	0.50827	81.88255	0.50414
4	79.52556	0.81414	83.23670	0.61115	81.06125	0.01700
5	75.55477	0.52227	83.31941	0.67123	79.86614	0.56495
6	73.92963	0.47855	86.66361	0.29286	80.95541	0.68770
7	75.53799	0.51497	88.63024	0.39579	83.12953	0.23887
8	79.76394	0.83906	88.39288	0.46453	82.94394	0.46052
9	72.72278	0.74936	88.59210	0.47307	77.66556	0.64913
10	71.70092	0.61952	88.81264	0.35000	79.67889	0.55609

Los datos anteriores expresados en porcentaje molar se pueden representar gráficamente (figura 15).

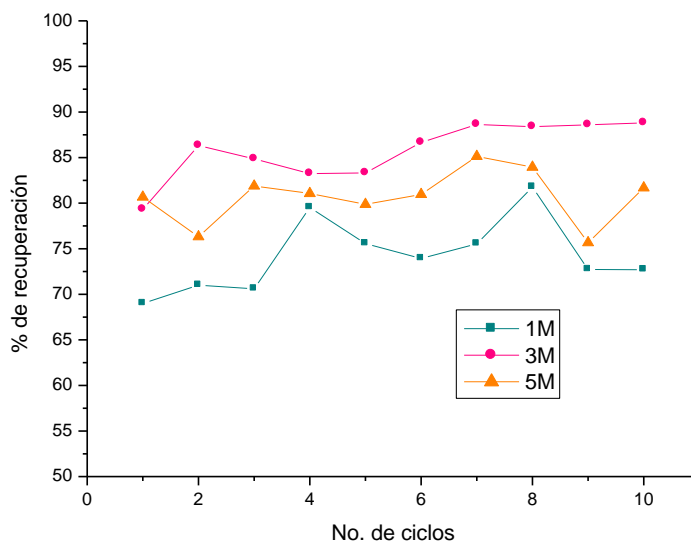


Figura 15. Porcentaje de Au(III) en la fase de recuperación en 8 horas de transporte.

Como se puede observar, la eficiencia de la membrana exhibe su máximo a concentración 3M de HCl; a una concentración de HCl de 5M la eficiencia nuevamente disminuye.

### Cálculos de permeabilidad de la membrana

En los experimentos con membranas se evalúa la permeabilidad (P), con la que se determina la eficiencia de una membrana, usando la ecuación siguiente:

$$P = \frac{J}{[Au](III)_F} = -\frac{V_F}{A} \frac{1}{[Au](III)_F} \frac{d[Au(III)]_F}{dt} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde:

$V_F$  = Volumen en la fase de alimentación (80 cm<sup>3</sup>).

$A$  = Área efectiva de la membrana (4.1548 cm<sup>2</sup>).

$t$  = tiempo (min)

$[Au(III)]_F$  = Concentración de oro en la fase de alimentación (M)

$P$  = Permeabilidad (cm/min)

De acuerdo a la ecuación 4.7, la permeabilidad depende del tiempo, por lo que al integrar dicha ecuación genera la ecuación 4.8.

$$\ln \frac{[Au(III)]_t}{[Au(III)]_0} = -P \frac{A}{V_F} t \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Donde:

$[Au(III)]_t$  = Concentración de oro en la fase de alimentación en un tiempo  $t$ .

$[Au(III)]_0$  = Concentración inicial de oro en la fase de alimentación.

La ecuación 4.8 se puede representar gráficamente en la expresión  $y=mx+b$  que es la ecuación de una línea recta. Por lo tanto, el cálculo de la permeabilidad se puede realizar de manera gráfica.

A continuación se muestran los resultados del cálculo de la permeabilidad de la membrana de acuerdo a la concentración de HCl.

Tabla 3. Permeabilidad de la membrana para diferentes concentraciones de HCl con desviación estándar.

PERMEABILIDAD cm/min						
<i>ciclo</i>	<i>HCl 1M</i>	$\sigma$	<i>HCl 3M</i>	$\sigma$	<i>HCl 5M</i>	$\sigma$
1	0.05904	0.00034	0.09473	0.00056	0.08701	2.67E-05
2	0.07290	7.81E-05	0.10085	0.00023	0.08316	4.51E-05
3	0.07132	2.64E-05	0.09077	3.45E-05	0.09369	0.00032
4	0.07133	2.64E-05	0.08537	8.43E-05	0.09229	2.89E-05
5	0.07802	2E-05	0.09004	0.00031	0.08583	1.45E-05
6	0.07422	1.73E-05	0.10892	6.34E-05	0.09116	0.00021
7	0.07358	0.00011	0.10479	4.45E-05	0.09799	3.91E-05
8	0.07426	2.64E-05	0.11558	2.31E-05	0.08507	4.53E-05
9	0.05933	8.66E-05	0.10340	0.00012	0.07258	3.21E-05
10	0.06002	5.77E-06	0.10798	1.23E-05	0.07673	0.00061

A continuación se muestran de manera gráfica los datos anteriores.



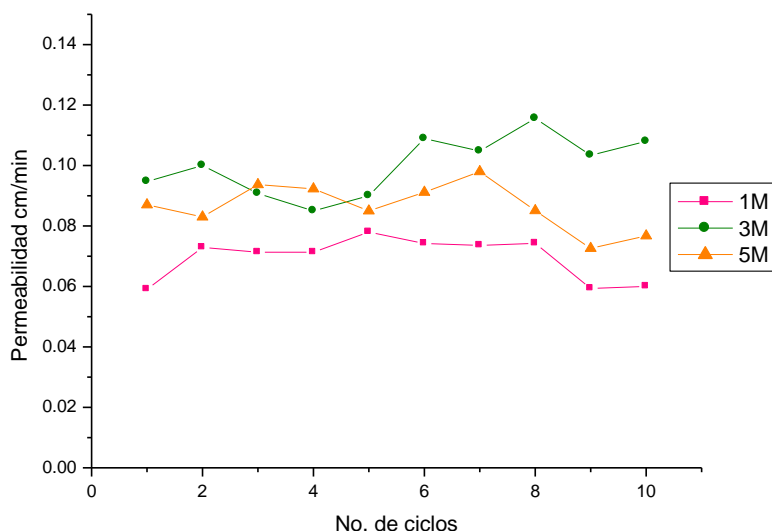


Figura 16. Representación gráfica de la permeabilidad de la membrana.

Como se puede observar en la figura 16, la membrana separa eficientemente al oro en medios 1, 3 y 5 M de HCl, aún en el décimo ciclo de operación de 8 horas., por lo que se puede concluir que la membrana es estable ya que exhibe un largo tiempo de trabajo. Aún más, en la concentración 3M de HCl se presentan valores de permeabilidad más elevados, disminuyendo un poco para una concentración 5M de HCl.

### Determinación del pH en la fase de recuperación

También se determinó el pH de la fase de recuperación al finalizar cada ciclo de operación, esto con la finalidad de comprobar que el Au(III) no se transporta solo, sino también el protón  $H^+$ , lo que permite apoyar las reacciones de extracción y reextracción (Ecuaciones 4.2 y 4.3). En la tabla 5, se muestran los valores de pH.

Tabla 4. Determinación del pH de la fase de recuperación al finalizar cada ciclo de operación de 8 hrs.

<b>pH</b>			
<i>ciclo</i>	<i>1M</i>	<i>3M</i>	<i>5M</i>
1	3.37	1.04	2.74
2	3.16	2.66	1.6
3	2.78	2.5	2.71
4	1.6	2.16	2.35
5	2.5	2.26	2.17
6	2.48	2.08	2.08
7	2.31	2.01	2.2
8	1.71	1.91	1.95
9	2.06	1.74	1.82
10	1.95	1.56	1.62

Como se puede observar en cada ciclo de operación, se presenta un pH ácido en la fase de recuperación, por lo que hay migración de protones junto con el ión Au(III); esto confirma la conservación de cargas propuesta en la Ecuación 4.3.

## CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Este estudio nos permitirá observar la morfología de la superficie de la membrana, así como su espesor, además podemos detectar que elementos químicos se encuentran en ella.

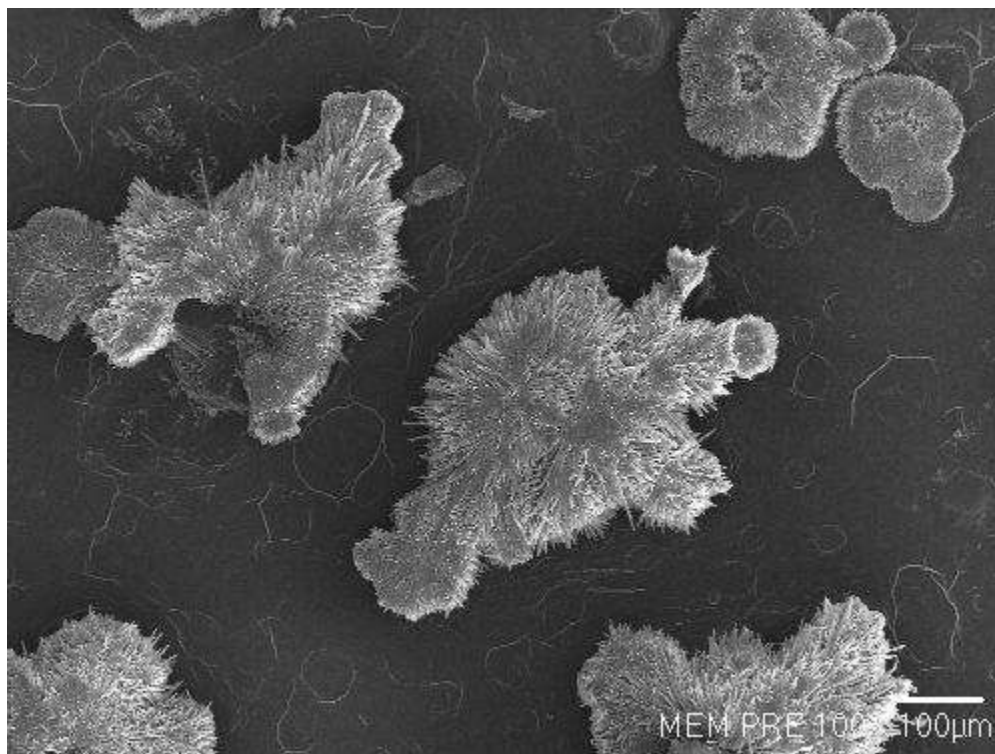


Figura 17. Morfología de la superficie de una membrana utilizada en el transporte de oro.

Los montículos más claros son nódulos de 1,2-tetradecanodiol que se fija a la superficie de la membrana dándole una textura áspera. Las líneas delgadas son parte de la red polimérica de la misma. En la siguiente imagen se hace un acercamiento a uno de los nódulos con la finalidad de poder observar las fibras de que está compuesto.

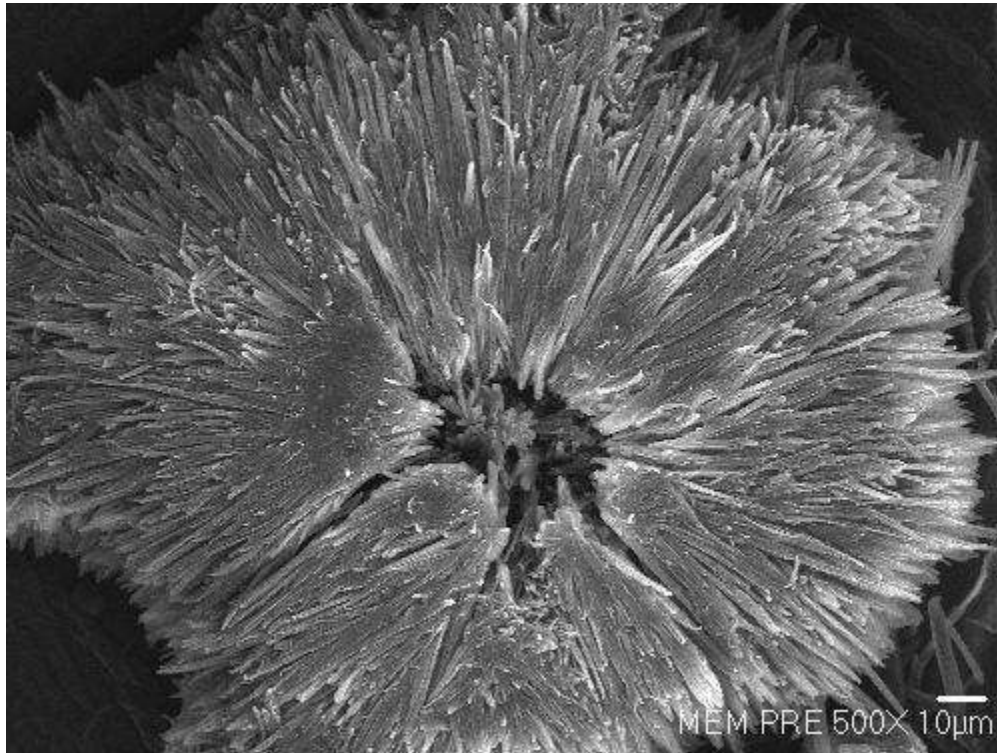


Figura 18. Acercamiento a un nódulo de la membrana utilizada en el transporte de oro.

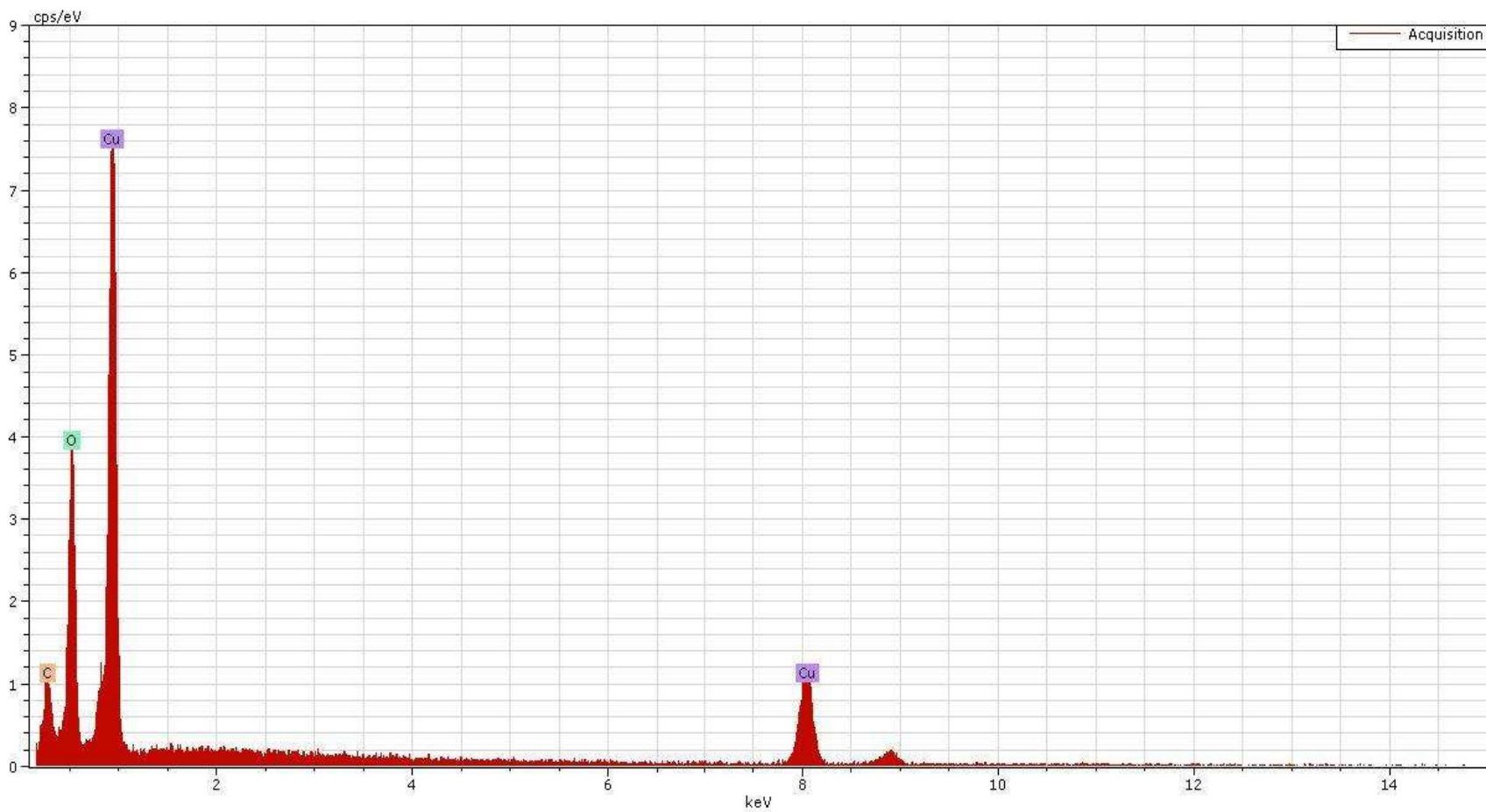


Figura 19. Representación gráfica que muestra los elementos químicos presentes: C, O, Cu

De acuerdo con la gráfica anterior, se puede observar que en los nódulos hay presencia de Carbono y de Oxígeno, elementos que constituyen al extractante 1,2-tetradecanodiol. El Cu aparece ya que la muestra recibe un baño metálico antes de ser analizada en el MEB.

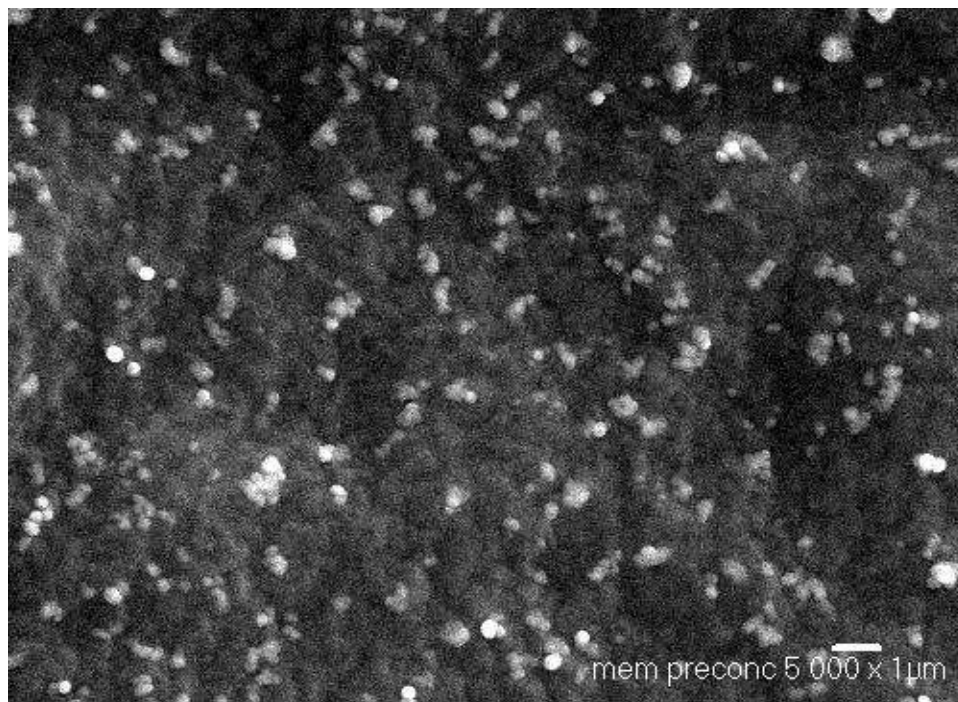


Figura 20. Puntos blancos que representan al oro incrustado en la membrana.

La figura 20, es una imagen que muestra que se hizo un acercamiento a una zona de la membrana donde se pudo encontrar partículas de oro; para demostrarlo se realizó un análisis cualitativo. Los resultados se muestran en la figura 21.



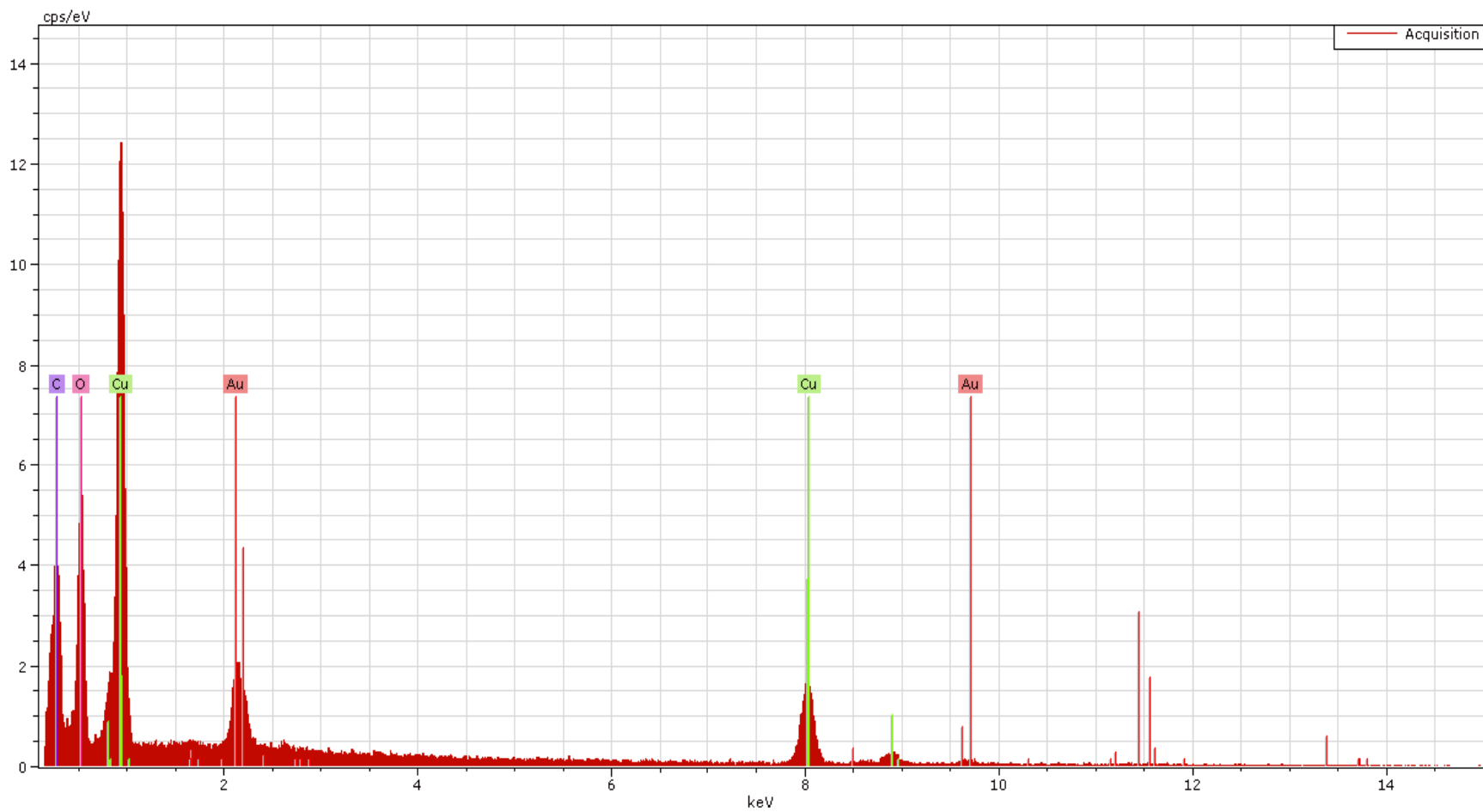


Figura 21. Representación gráfica que muestra la presencia de oro.

Como se puede observar, sigue apareciendo el C, el O y el Cu como se había descrito anteriormente, pero en esta región de la membrana se pudo detectar la presencia de oro.

En figura 22, se puede apreciar a detalle el espesor de la membrana y se puede medir. El espesor de la membrana es de aproximadamente  $17.5 \mu\text{m}$ .

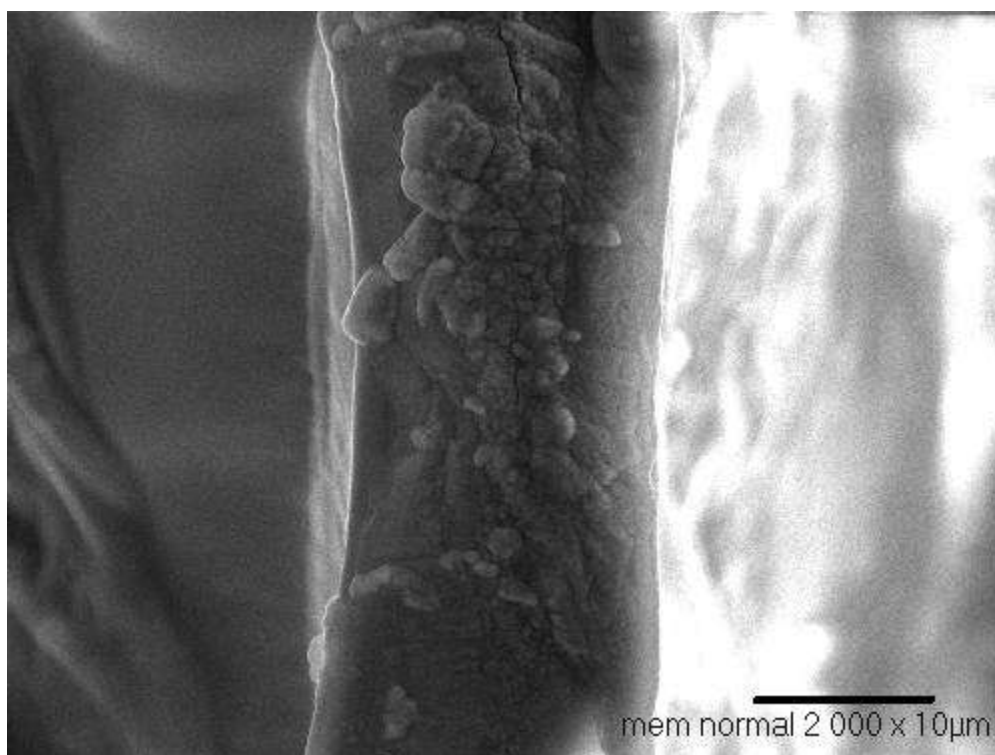


Figura 22. Imagen en la que se puede apreciar el espesor de la membrana óptima  
Espesor de la membrana =  $17.5 \mu\text{m}$ .



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- La membrana de composición óptima es estable aún después de 10 ciclos de operación, ya que separa eficientemente al Au(III) en medios 1M, 3M y 5M de ácido clorhídrico, es decir, presenta una vida útil de trabajo importante.
- La membrana de composición óptima contiene un 37.4% de 1,2-tetradecanodiol y exhibe una permeabilidad de 0.07132 cm/min en la separación de Au(III) en HCl 1M.
- El 1,2 tetradecanodiol es un extractante eficiente para la separación de Au(III) en medios concentrados de HCl mediante membranas poliméricas .
- Se observó que a alta concentración de HCl (5M) se afecta la eficiencia de la membrana, disminuyendo un poco la permeabilidad y el transporte del oro.
- Se determinó que el espesor de la membrana polimérica óptima es de aproximadamente 17.5  $\mu\text{m}$ .

### Recomendaciones

- El 1,2-tetradecanodiol es un excelente extractante con el que se pueden obtener buenos rendimientos de extracción de oro (III) en medio HCl.
- Se puede utilizar otros métodos de caracterización de la membrana, ya que el Microscopio Electrónico de Barrido tiene una sensibilidad de 1% y el oro incrustado en la membrana está en trazas, lo que dificultó su observación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. [http://es.wikilingue.com/pt/Proceso de separaci%C3%B3n por membranas](http://es.wikilingue.com/pt/Proceso_de_separaci%C3%B3n_por_membranas)
2. Treybal Robert E., Operaciones de Transferencia de Masa, 2ª. edición, Ed. Mc. Graw-Hill, 2005.
3. Kirk-Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology, 4<sup>th</sup>. Edition, Ed. John Wiley & Sons, Vol. 12, 1994.
4. Villaescusa I., Miralles N., de Pablo J., Salvadó V., Solvent extraction and Ion Exchange, 1993.
5. Aamrani F.Z., Anil K., Beyer L., Cortina J. L., Sastre A. M., Solvent Extraction and Ion Exchange, 1998.
6. Petrich M., Cortina J. L., Hartung J., Aguilar M., Sastre A., Beyer L., Gloe K., Solvent Extraction and Ion Exchange, 1993.
7. K. Burguer, Organic Reagent in Metal Analysis, Pergamon Press, 1973.
8. T. Sekine & Y. Hasegawa, Solvent Extraction Chemistry Marcel Dekker Inc. 1990.
9. <http://www.wikipedia.com/es>
10. [http://www.aneki.com/gold\\_countries.html](http://www.aneki.com/gold_countries.html)
11. [http://www.monografias.com/trabajo\\_aurico.htm](http://www.monografias.com/trabajo_aurico.htm)
12. [http://www.pobladores.com/channels/naturaleza\\_y\\_ciencia/Oro/area/6](http://www.pobladores.com/channels/naturaleza_y_ciencia/Oro/area/6)
13. [http://www.blogger.com/aprender\\_a\\_reciclar\\_oro.htm](http://www.blogger.com/aprender_a_reciclar_oro.htm)
14. Henley E.J., Seader J.D., Operaciones de separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química, Ed. Reverté, 2000.
15. McCabe W.L., Smith J.C. Operaciones Unitarias de Ingeniería Química McGraw-Hill, 1993.
16. Geankopolis C.J., procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, 3ª. edición, Ed. CECSA, 2005.

17. <http://www.lenntech.es/tecnologia-de-membrana.htm>
18. [http://www.tdr.cesca.es/TSS\\_UAB/Available/TDX-0442316-140146/mhm1de1.pdf](http://www.tdr.cesca.es/TSS_UAB/Available/TDX-0442316-140146/mhm1de1.pdf)
19. <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-07-04-Espectrofotometria.pdf>
20. <http://www.analitica.com.ar/equipos/espectrofotometria.htm>
21. <http://www.monografias.com/trabajos16/proceso-severo/proceso-severo.shtml>
22. [http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio\\_electr%C3%B3nico\\_de\\_barrido](http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido)

## APÉNDICE I

Para la elaboración de la curva de calibración se prepararon soluciones de oro (III) a distintas concentraciones.

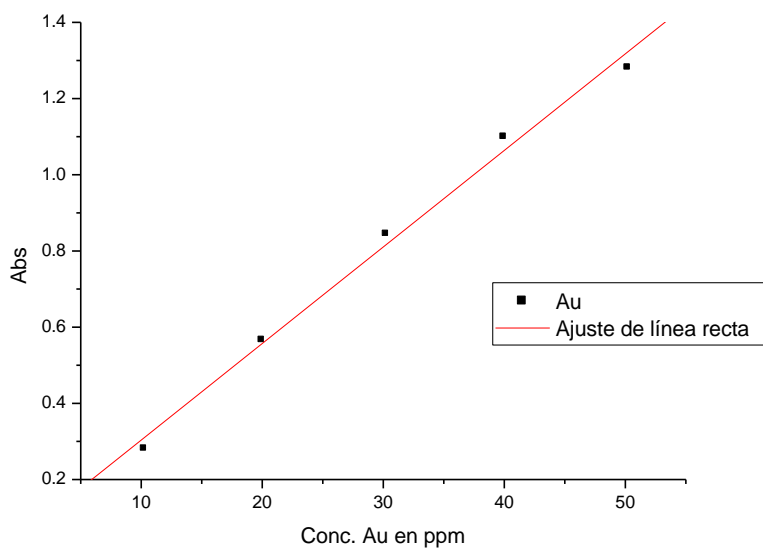


Figura 23. Curva de calibración de Au(III).

Donde se ha obtenido por regresión lineal lo siguiente:

$$y = 0.25343[\text{Au}] + 0.050204$$

$$R^2 = 0.992634$$