



UNIVERSITAT  
JAUME•I

MÁSTER UNIVERSITARIO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD:  
***"MEJORA DE COLECTORES SOLARES DE ABSORCIÓN  
DIRECTA MEDIANTE MODELADO DE NANOFLUIDOS"***

TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Autora - Ivana Guinot Panadero

Tutora - Leonor Hernández López

SEPTIEMBRE - 2020

*Agradecimientos:*

*A Leonor, por su gran implicación,  
su indispensable ayuda y su excelente trato  
Y a mi familia, a todos y cada uno de ellos,  
por permitirme estar ausente  
durante estos últimos meses  
y sobre todo por hacerme sonreír.*

# ÍNDICE

1	ANTECEDENTES .....	1
1.1	Energías renovables .....	2
1.2	Energía solar térmica: .....	2
1.3	Eficiencia de los colectores solares .....	7
2	OBJETIVO Y ALCANCE .....	7
3	MEDIDAS EXPERIMENTALES.....	8
3.1	Caracterización de las muestras.....	8
3.2	Caracterización del recipiente de la muestra:.....	9
3.3	Rango espectral.....	9
3.4	Equipo de medidas ópticas .....	10
3.5	Formulación para la obtención de resultados .....	12
3.6	Resultados experimentales .....	13
3.6.1	Transmitancia:.....	13
3.6.2	Reflectancia:.....	14
3.6.3	Coefficiente de extinción:.....	15
4	MODELOS TEÓRICOS DEL COEFICIENTE DE EXTINCIÓN .....	16
4.1	Análisis teórico de la propagación de la radiación electromagnética.....	16
4.2	Simplificaciones teóricas asumidas .....	18
4.2.1	Luz incoherente.....	18
4.2.2	Incidencia normal de las ondas de radiación: .....	18
4.2.3	Scattering independiente.....	18
4.2.4	Términos no lineales despreciables en la Teoría de Scattering de Mie .....	19
4.3	Modelos teóricos utilizados para la deducción del coeficiente de extinción .....	19
4.3.1	Modelización del coeficiente de extinción del agua pura.....	19
4.3.2	Modelización del coeficiente de extinción de los nanofluidos .....	23
5	METODOLOGÍA.....	25
5.1	Cálculo del coeficiente de extinción para el agua pura .....	25
5.2	Cálculo del coeficiente de extinción para los distintos nanofluidos .....	25
6	RESULTADOS DE LOS MODELOS TEÓRICOS .....	28
6.1	Coefficiente de extinción del agua pura.....	28
6.2	Coefficiente de extinción del nanofluido según tamaño de partícula .....	33
6.2.1	Nanofluido de 5nm.....	33
6.2.2	Nanofluido de 20nm.....	37
6.2.3	Nanofluido de 50nm.....	41

6.2.4	Nanofluido de 60nm.....	45
6.3	Coeficiente de extinción de los nanofluidos según el modelo teórico .....	50
6.3.1	Medidas experimentales.....	50
6.3.2	Aproximación de Large:.....	50
6.3.3	Teoría de Maxwell- Garnett .....	51
6.3.4	Teoría de Scattering de Mie .....	52
7	Análisis de los resultados de los coeficientes de extinción.....	54
7.1	Coeficientes de extinción experimentales .....	54
7.2	Coeficiente de extinción según modelos .....	54
7.2.1	Coeficiente de extinción modelado del agua pura .....	54
7.2.2	Coeficientes de extinción modelados según tamaño de nanopartícula .....	55
8	CONCLUSIONES .....	57
9	BIBLIOGRAFÍA.....	58
10	ANEXOS .....	60
10.1	Anexo 1: Figuras .....	60
10.2	Anexo 2: Tablas .....	62

## 1 ANTECEDENTES

La revolución industrial trajo consigo un gran desarrollo de nuestra sociedad. Fue el detonante de un crecimiento exponencial de nuestra economía, tecnología, nivel de vida, organización de las sociedades, formación de grandes núcleos urbanos....todo ello llevó asociado un incremento del consumo de nuestros recursos energéticos. A su vez este desarrollo se ha ido haciendo extensivo a lo largo de todo el planeta. Así, el consumo de recursos no solo se ha incrementado por el desarrollo de las sociedades sino también por el aumento de usuarios con acceso a este desarrollo.

En la figura 1 se representa el desarrollo de consumo energético mundial desde 1800 hasta la 2019:

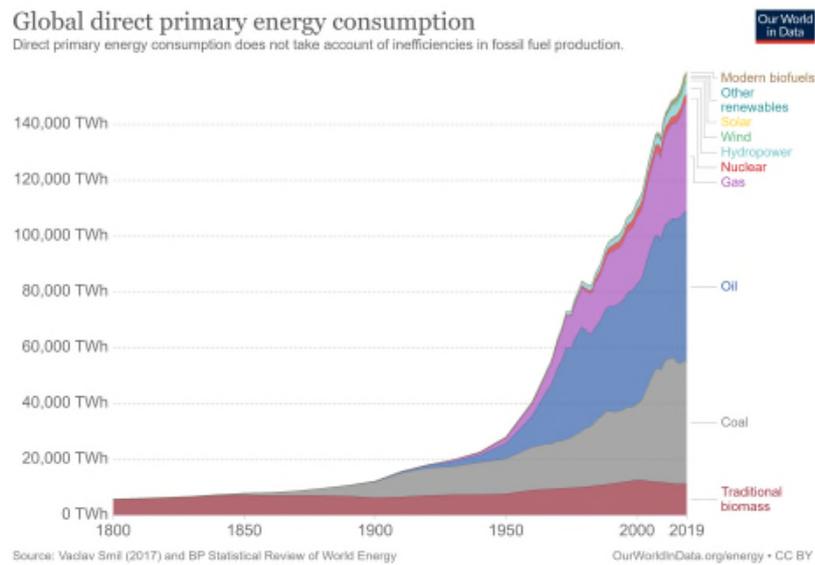


Figura 1. Desarrollo del consumo energético mundial desde 1800 hasta 2019 [1]

De forma más detallada, en la figura 2, se muestra la evolución del consumo energético por fuente de energía de los últimos 50 años:

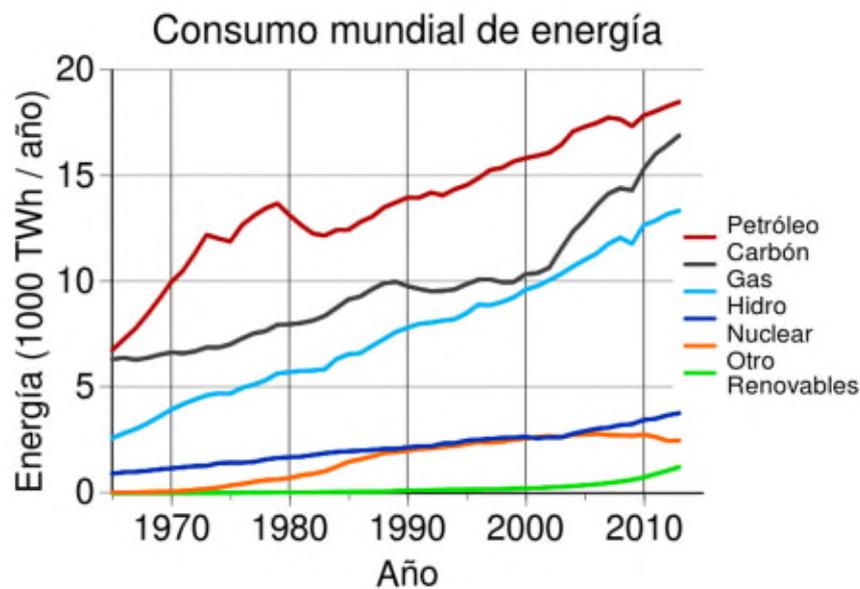


Figura 2. Desarrollo del consumo energético mundial desde 1970 hasta 2016 [2]

El aumento del consumo energético conlleva una serie de problemas que pueden conducir a una involución de la sociedad. Estos problemas son principalmente los siguientes:

- El calentamiento global: Provocado por la emisión de gases de efecto invernadero debido al consumo energético de fuentes fósiles.
- El agotamiento de recursos no renovables.
- Contaminación directa del agua, el aire y la tierra.
- Aumento de residuos y basura.

Las formas más destacadas de producir energía actualmente son:

- Energías no renovables y sucias: Petróleo, Carbón, y gas. Su uso acelera el problema del calentamiento global, el agotamiento de recursos, la contaminación directa del agua, el aire y la tierra y el aumento de residuos y basura.
- Energías no renovables y limpias: Nuclear. Su uso acelera el problema del agotamiento de recursos, y el aumento de residuos.
- Energías renovables que suavizan estos problemas considerablemente.

Por ello para lograr un desarrollo sostenible en este aspecto, debemos optar, en el largo plazo, por el uso de las energías renovables. Sin embargo, su uso satisface solo un 18.9% de la necesidad energética actual en la Unión Europea (dato obtenido de la base de datos de Eurostat 2018-energía consumida durante el año 2018 en la Unión Europea [3]).

Es por ello muy importante el desarrollo de la tecnología necesaria para el uso eficiente de las energías renovables.

### **1.1 Energías renovables**

Son aquellas fuentes de energía basadas en la utilización de recursos naturales: el sol, el viento, el agua, la biomasa vegetal o animal, etc.... Se caracterizan por no utilizar combustibles fósiles, sino recursos naturales capaces de renovarse ilimitadamente en un corto espacio de tiempo.

Los tipos de energías renovables son:

- Energía solar: La energía solar es aquella que obtenemos del sol:
  - Energía Fotovoltaica: Con placas solares se absorbe la radiación solar y se transforma en electricidad.
  - Energía solar térmica, utiliza la radiación solar para calentar un fluido.
- Energía eólica: En este caso la generación de electricidad se lleva a cabo con la fuerza del viento.
- Energía hidroeléctrica: Utiliza la fuerza del agua en su curso para generar la energía eléctrica.
- Biomasa: Consiste en la combustión de residuos orgánicos de origen animal y vegetal.
- Biogás: El biogás es una energía alternativa producida biodegradando materia orgánica.
- Energía del mar: Aprovecha la fuerza de las mareas o de las olas, para producir energía eléctrica.
- Energía geotérmica: Aprovecha las altas temperaturas de yacimientos bajo la superficie terrestre (normalmente volcánicos) para la generación de energía a través del calor, pues suelen encontrarse a 100 o 150 grados centígrados.

### **1.2 Energía solar térmica:**

Según un estudio sobre el potencial de la energía solar térmica en Europa [4] la contribución de la energía solar térmica debería evolucionar según se muestra en la figura 3:

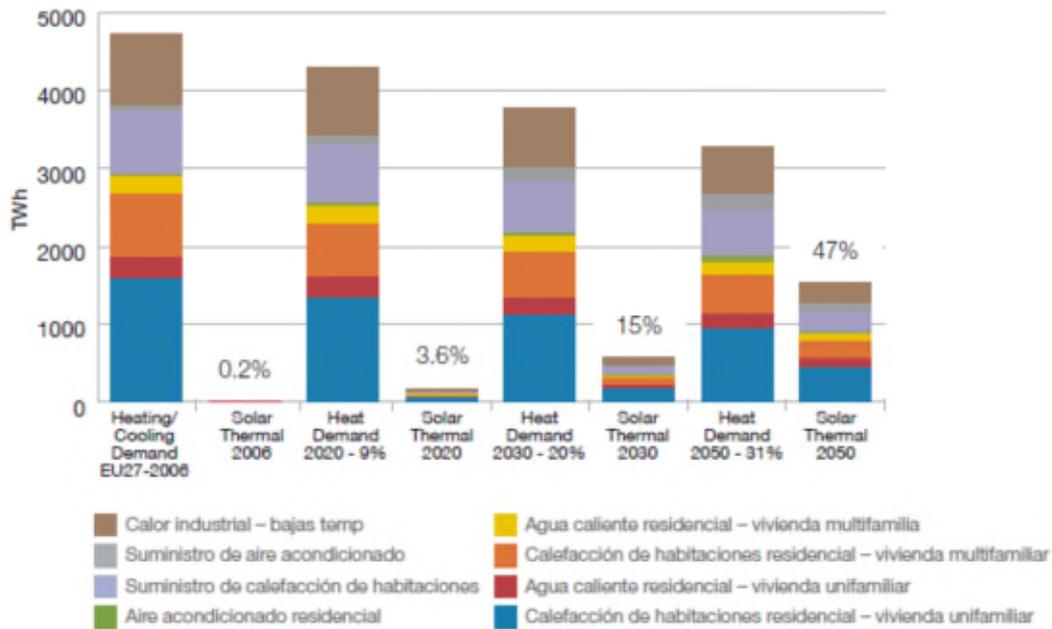


Figura 3. Demanda total de calefacción y refrigeración de los países UE-27 y contribución de la energía solar térmica por sector

La energía solar térmica es la tecnología que convierte la radiación solar en calor.

Dicha tecnología está en continua evolución.

Un colector solar térmico es un dispositivo que realiza dicha conversión, mediante el uso de un fluido de trabajo (líquido o gas).

En función de la temperatura alcanzada por este fluido de trabajo, los colectores solares se pueden clasificar en los de baja temperatura (hasta 120°C), media (entre 120 y 400°C) y alta (por encima de 1000°C) [5]. Cada rango de temperatura requiere de un tipo de fluido de trabajo (agua, glicoles, aceites, sales fundidas, gases, etc.), así como de una tecnología que permita alcanzar dichos valores (sin y con concentración de la radiación solar). En la figura 3 se observan esquemas de las distintas tecnologías.

Los colectores solares se dividen en dos grandes grupos, colectores solares sin concentración y colectores solares de concentración [6].

Los **colectores solares sin concentración** son colectores de baja temperatura. Sus aplicaciones principales son la producción de agua caliente sanitaria y la calefacción. Existen los siguientes tipos:

- **Colector solar de Placa Plana:**  
En general un colector de placa plana actúa como un receptor que recoge la energía procedente del Sol y calienta una placa. La energía almacenada en la placa es transferida al fluido.
- **Colectores de Aire:**  
Son colectores de tipo plano cuya principal característica es tener como fluido calo portador el aire.
- **Colectores de Vacío:**

Son colectores cuya principal característica es que los tubos portadores de fluido se encuentran dentro de unos tubos de vidrio donde se ha hecho el vacío. Se reducen las pérdidas por convección.

- Tubos de Calor:

Poseen una simetría cilíndrica, formados por dos tubos concéntricos; uno exterior de vidrio y uno interior pintado de negro o con pintura selectiva. El fluido circula por el tubo del interno.

- Colectores Cónicos o esféricos:

Su principal característica es que constituyen simultáneamente la unidad de captación y de almacenamiento. Su superficie de captación es cónica o esférica con una cubierta de vidrio de la misma geometría.

Los **colectores solares de concentración** son los colectores que trabajan a media y alta temperatura. Haciendo uso de concentración óptica consiguen elevar la temperatura de los fluidos.

El funcionamiento de este tipo de plantas es similar al de una central térmica, pero en lugar de recursos no renovables utiliza la energía del sol. Los rayos solares se concentran mediante espejos en un receptor que alcanza altísimas temperaturas. Este calor se usa para calentar un fluido y generar vapor, que mueve una turbina y produce la electricidad.

Según la forma de concentrar la energía solar hay cuatro tipos de centrales [6]:

- Central de torre: COMERCIALIZADA

Utiliza un conjunto de espejos orientables (denominados heliostatos) que concentran los rayos solares en un receptor situado en una torre. Es una tecnología probada, eficaz y rentable a medio plazo.

- Central de Disco Parabólico con Motor Stirling: PROTOTIPO

Utiliza un espejo en forma de disco parabólico para concentrar los rayos del sol en un motor Stirling situado en el foco de la parábola, por eso también se denomina central de disco-Stirling. El calor acumulado eleva la temperatura del aire, lo cual acciona el motor Stirling y mueve una turbina que genera electricidad.

- Central de concentrador de cilindro parabólico: COMERCIALIZADA

Usan espejos en forma de cilindros parabólicos por cuyo eje discurre una tubería donde se concentran los rayos del sol. La relación de concentración es de aproximadamente 80:1. La tubería contiene un fluido que se calienta y genera vapor que mueve una turbina.

- Central de Concentrador Lineal Fresnel: PROTOTIPO

Concentran la radiación solar a lo largo de una línea. Estas centrales basan la generación eléctrica en la concentración de la radiación solar a lo largo de un tubo absorbedor situado a varios metros de altura. La relación de concentración es de aproximadamente 20:1. Estas centrales destacan por la sencillez de su construcción y por su bajo coste, debido a que no usan reflectores curvos.

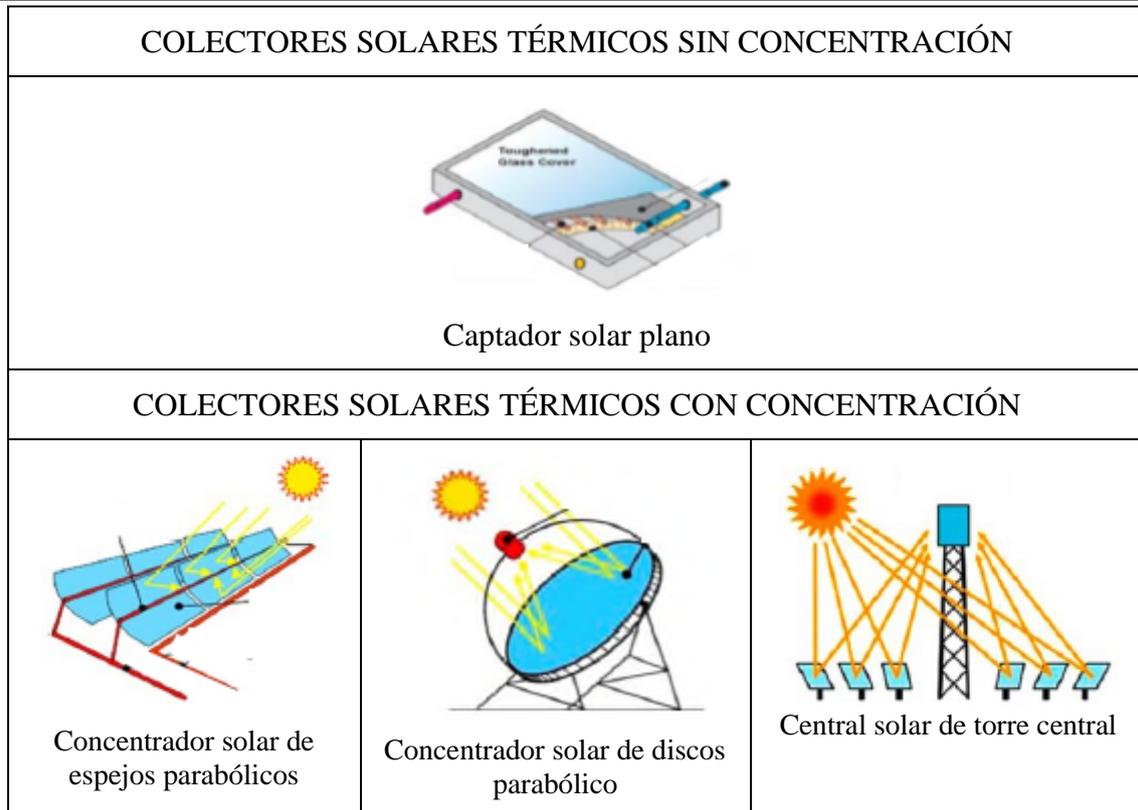


Figura 4. Algunos tipos colectores solares térmicos [7]

En los colectores solares térmicos convencionales (que se usan por ejemplo para agua caliente sanitaria o calefacción doméstica), la absorción de la radiación solar se realiza de manera superficial. Es decir, la energía se absorbe por una superficie exterior, y esta energía térmica se transfiere posteriormente por conducción y convección a un fluido de trabajo que circula por el dispositivo hasta un intercambiador térmico. De esa manera, el sistema presenta importantes pérdidas de calor, lo que resulta en una baja eficiencia del sistema [8].

Buscando eficiencias mayores, en los años 70 se propuso una idea de diseño alternativa en la que el fluido de trabajo se expone directamente a la radiación solar (mediante una superficie transparente que lo confina), de manera que el calor se absorbe volumétricamente por el fluido. Estos diseños recibieron el nombre de Colectores Solares de Absorción Directa (DASC, Direct Absorption Solar Collectors), y tanto su configuración como sus pérdidas térmicas [9] se muestran en la parte derecha de la figura 5 (derecha). Los esquemas análogos para los colectores superficiales convencionales se presentan en la parte izquierda de la figura 5.

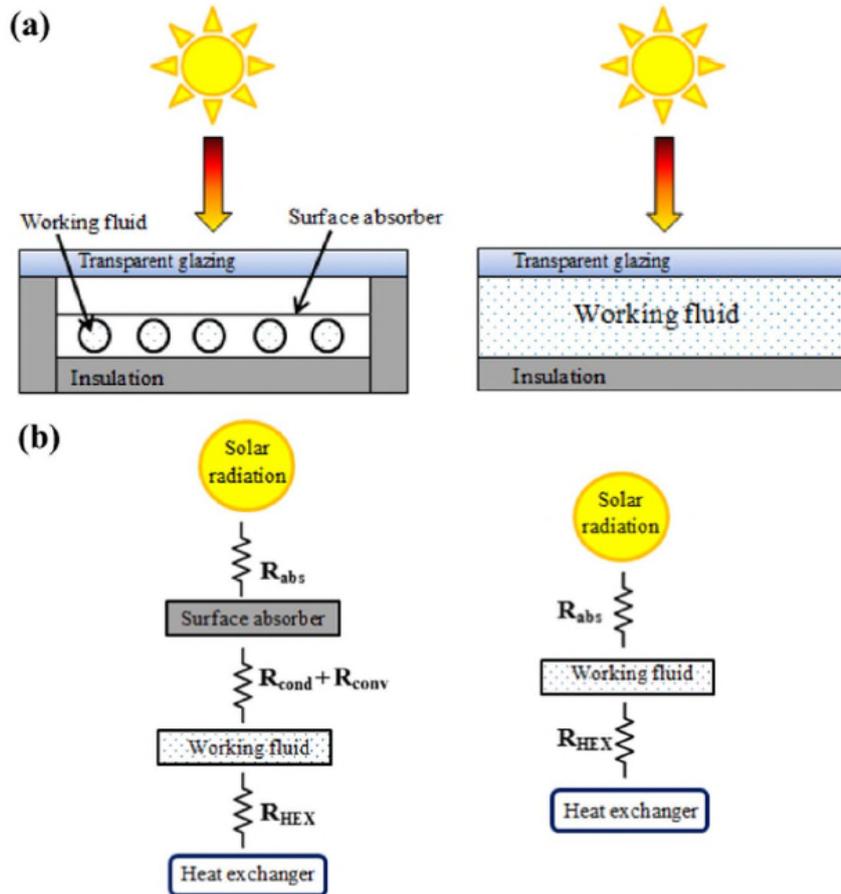


Figura 5. (a) Esquema de los colectores solares térmicos de absorción directa de superficie (izquierda) y volumétricos (derecha) (b) comparación de sus pérdidas térmicas [10]

En el caso de los DASC, la eficiencia del colector está muy vinculada a la capacidad de absorción de la radiación solar de los fluidos de trabajo. Puesto que la mayoría de los fluidos típicos utilizados en los colectores (agua, glicoles, etc.) son transparentes para la mayor parte del espectro solar [11,12], se probó a incorporar partículas de tamaño micrométrico (tinta china, carbón black, etc.) en los DASC para mejorar su rendimiento [13,14]. Aunque el rendimiento aumentó, se comprobó que las partículas micrométricas provocaban varios inconvenientes prácticos, como el ensuciamiento y obstrucción de conductos, erosión y abrasión de tuberías y de sistemas de bombeo con el tiempo [15, 16]. Para solucionar estos problemas, en 2009 Tyagi et al. [16] plantearon el uso de nanopartículas (partículas con una dimensión menor de 100nm) lo que, junto con la madurez de la nanotecnología, supuso el comienzo de la investigación en DASC con nanofluidos (suspensiones coloidales homogéneas de nanopartículas en un fluido base).

Desde entonces, numerosos estudios analizan cómo pequeñas cantidades de nanopartículas dispersas homogéneamente en un fluido base en un DASC, proporcionan coeficientes de absorción solar (y por lo tanto eficiencias) muy mejoradas, a la vez que por su pequeño tamaño evita los problemas de erosión y obstrucción observados con las micropartículas. En la bibliografía, los nanofluidos con concentraciones reducidas de nanopartículas, cuyo principal objetivo es la absorción de la radiación solar, se denominan nanofluidos solares. Debido a sus propiedades ópticas excelentes, las nanopartículas de oro se han convertido en unos candidatos muy interesantes como nanofluidos solares para los DASC [17].

Desde su aparición, mejorar la eficiencia de los DASC ha sido objeto de estudio tanto experimental como de modelado. Particularmente significativa son las publicaciones que

caracterizan el efecto de las nanopartículas para aplicaciones colectores solares térmicos de baja y media temperatura [18, 19, 20].

### 1.3 Eficiencia de los colectores solares

La característica principal que identifica la calidad de un colector solar es su eficiencia, entendida como capacidad de conversión de la energía solar incidente en energía térmica.

Dentro de los muchos aspectos donde se puede mejorar la eficiencia global de los colectores solares, uno de los factores que ayudarán al aumento de su rendimiento será la mejora de la eficiencia de los procesos de absorción de radiación solar mediante el uso de nanofluidos.

Los nanofluidos son suspensiones de nanopartículas dentro de un fluido base. La adición de nanopartículas pretende modificar las propiedades del fluido base.

Existen diversos estudios sobre colectores solares en donde se ha demostrado que el reemplazo de fluidos térmicos convencionales por nanofluidos permite incrementar la eficiencia térmica, por ejemplo, se puede mencionar el estudio de Otanicar que muestra que se obtuvo una mejora del 5% en la eficiencia térmica al reemplazar el agua por nanofluidos. Sin embargo, las mejoras en el desempeño del colector dependen del tipo de nanofluido usado, la concentración de nanopartículas contenidas en el fluido, la forma y tamaño de las partículas, las condiciones de operación, entre otros factores [21].

T. Otanicar propuso en 2009 un nuevo tipo de nanofluido para aplicaciones solares al que se ha denominado *Solar Nanofluid* (Otanicar et al., 2009). Este tipo de nanofluido está basado en agua y aceites térmicos al que se le añaden nanopartículas que tienen un espectro de absorción acoplado al espectro de radiación solar. De esta forma, los nanofluidos solares absorben la radiación solar (convirtiéndola en energía térmica) [21]

En el presente trabajo final de máster se estudian los nanofluidos que utilizan el agua pura como fluido base y nanopartículas de oro, con distintos tamaños y concentraciones.

## 2 OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo del presente TFM es el desarrollo de diferentes modelos teóricos para el coeficiente de extinción de nanofluidos solares, que permitan:

- Reproducir los resultados experimentales.
- Analizar desde distintos métodos los modelos teóricos que mejor describen el comportamiento del nanofluido.
- Predecir a nivel cualitativo, la relación entre las características de los nanofluidos (por ejemplo, tamaño y concentración de nanopartículas) y la absorción de la radiación solar.

El TFM parte de resultados experimentales de coeficiente de extinción de nanofluidos solares y a partir de ahí plantea modelos que permitan establecer una relación, o predecir a nivel cualitativo, la relación entre las características medidas de los nanofluidos y la absorción de la radiación solar [21]. Esto permite, por una parte, optimizar las pruebas experimentales permitiendo acotar los tipos, tamaños, concentraciones... de nanopartículas a utilizar y a su vez permite la predicción del comportamiento de los nanofluidos en relación con todos los parámetros que entran en juego.

El alcance de este TFM se limita el modelado a los nanofluidos en base acuosa y con 4 tamaños y concentraciones diferentes de nanopartículas de oro.

Se modela este nanofluido porque el agua es el fluido típico en colectores solares de baja temperatura y con nanopartículas de oro porque tienen un espectro de absorción muy adecuado para la absorción solar.

En una primera etapa se modelará el agua pura usando distintos métodos analíticos y se compararán con los resultados experimentales.

En una segunda etapa se modelarán los distintos nanofluidos usando los mismos métodos analíticos usados para el agua pura, pero añadiendo el modelado de las nanopartículas.

Finalmente, con los resultados obtenidos se realizará una comparativa de los distintos modelos utilizados.

### 3 MEDIDAS EXPERIMENTALES

#### 3.1 Caracterización de las muestras

Los modelados se van a realizar sobre los datos obtenidos de los ensayos realizados con cuatro nanofluidos comerciales suministrados por la empresa Sigma Aldrich. Estos contienen nanopartículas metálicas de oro de diferentes tamaños, definidos por el fabricante (5, 20, 50, 60nm), todas ellas presentan la siguiente descripción: OD 1, suspensión estabilizada 0,1 mM PBS, libres de reactivos (*OD 1, stabilized suspension in 0.1mM PBS, reactant free*) [22].

Las características principales de los nanofluidos solares evaluados en este TFM, incluyendo fluido base, tamaño de nanopartícula según el fabricante y la concentración de nanopartículas de oro medidas experimentalmente mediante ICP-MS, son las siguientes:

- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 5
  - Fluido base: H<sub>2</sub>O pura
  - Nanopartícula Au:
    - Tamaño 5nm
    - Concentración C=59.6 mg/L
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 20
  - Fluido base: H<sub>2</sub>O pura
  - Nanopartícula Au:
    - Tamaño 20nm
    - Concentración C=41.6 mg/L
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 50
  - Fluido base: H<sub>2</sub>O pura
  - Nanopartícula Au:
    - Tamaño 50nm
    - Concentración C=23.9 mg/L
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 60
  - Fluido base: H<sub>2</sub>O pura
  - Nanopartícula Au:
    - Tamaño 60nm
    - Concentración C=5.91 mg/L

El estudio realizado en el TFM con título "ESTUDIO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE NANOFLUIDOS DE ORO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR" [22] presenta los siguientes resultados experimentales de distribución de tamaño de partícula de los nanofluidos evaluados en este TFM y medidos con DLS a temperatura ambiente que se recogen en la tabla 1:

	Tª amb				
	D <sub>10</sub> (n)	D <sub>50</sub> (n)	D <sub>90</sub> (n)	Z <sub>average</sub>	ε (%)
5 nm	4,61	6,08	8,52	6,03	21%
20 nm	11,77	15,57	22,03	15,45	23%
50 nm	27,73	37,13	54,30	36,90	26%
60 nm	33,83	45,17	66,17	45,75	24%

Tabla 1. Percentiles promedios de los tamaños de las nanopartículas a temperatura ambiente [22]

Siendo:

D<sub>10</sub>(n), es el tamaño de partícula en el que solo el 10% de la distribución está por debajo de ese valor.

D<sub>50</sub>(n), es el tamaño de partícula en el que solo el 50% de la distribución está por debajo de ese valor.

D<sub>90</sub>(n), es el tamaño de partícula en que el 90% de la distribución está por debajo de ese valor.

Z<sub>average</sub>, valores relativos al tamaño promedio, definido por la norma ISO 13321 y la norma ISO 22412 como el diámetro de partícula armónico ponderado por la intensidad.

ε(%), error experimental, mide la desviación entre el valor medido y el valor teórico ( $\epsilon = \frac{\text{VALOR TEÓRICO} - \text{Z}_{\text{AVERAGE}}}{\text{VALOR TEÓRICO}} 100$ ).

Para los modelos se va a escoger el D50 como valor característico y que difiere en cierto grado de los tamaños de nanopartículas definidos por el fabricante.

### 3.2 Caracterización del recipiente de la muestra:

Para albergar las muestras se emplea una cubeta prismática de cuarzo, ya que su óptica y transparencia no interfieren en el paso de la radiación utilizada, con un espesor de pared de 1,5nm y unas dimensiones de: 45mm de alto, 12,5 mm tanto de profundidad como de ancho. Admite un rango espectral de 200 a 2500nm y un volumen de 3500 μL [22].



Figura 6. Cubeta de cuarzo (Hellma Analytics) [22]

### 3.3 Rango espectral

El espectro teórico de radiación solar y terrestre, ver figura 7, se define en el rango de longitud de onda entre 280nm y 4000nm, aproximadamente. A nivel de la superficie terrestre únicamente llega un 9% de radiación ultravioleta, un 42% de luz visible y un 49% de radiación infrarroja.

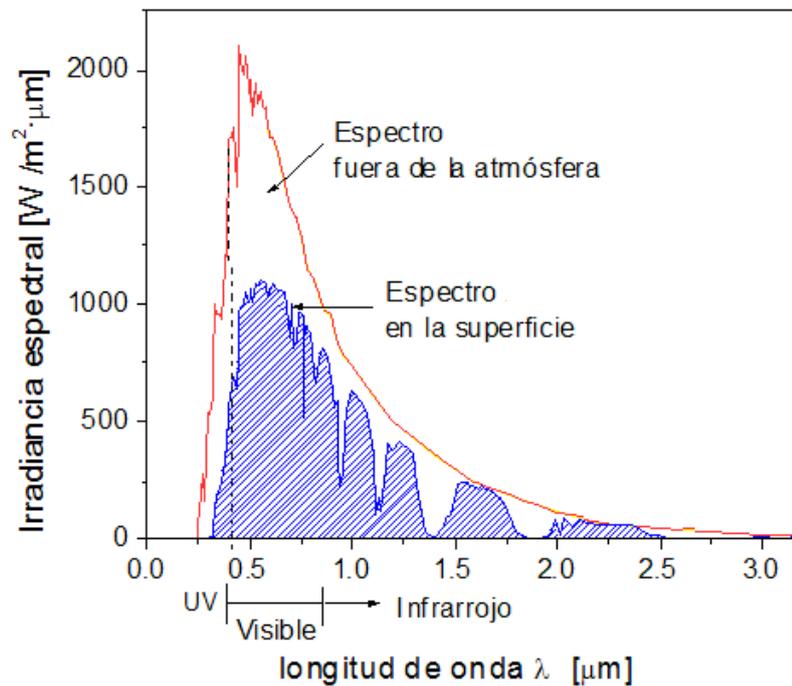


Figura 7. Espectro de radiación solar [23]

En el presente TFM se va a estudiar un nanofluido que usa el agua como fluido base. Se utilizan para absorber la radiación solar mientras circulan por el colector. El agua absorbe de forma muy eficiente radiación en el infrarrojo, sin embargo, su capacidad de absorción en el rango ultravioleta y en el visible es débil.

Se estudia la absorción del espectro de radiación entre 400nm y 1300nm. Casi toda la radiación ultravioleta y gran parte de la infrarroja son absorbidas por la atmósfera. La energía que llega al nivel del mar, como se ha dicho anteriormente, suele ser radiación infrarroja un 49 %, luz visible un 42 % y radiación ultravioleta un 9 %. Con el rango propuesto se está teniendo en cuenta casi la totalidad de radiación que llegando a la superficie terrestre puede ser absorbida por el nanofluido.

### 3.4 Equipo de medidas ópticas

Los datos experimentales que se van a usar para la modelización de los nanofluidos provienen de las mediciones realizadas en el TFM con título "ESTUDIO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE NANOFLUIDOS DE ORO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR" [22]. En el mismo se describe lo siguiente:

En este caso concreto el espectrómetro utilizado es el espectrómetro comercial CARY 5000 UV-Vis-NIR. Este aparato puede analizar el espectro electromagnético y determinar, de este modo, las propiedades de la luz. Realiza análisis en un rango de medida comprendido entre 175 - 3300nm de longitud de onda y con un ancho de banda espectral de 0,01nm [22].

El equipo Cary 5000 UV-Vis-NIR se utiliza con dos configuraciones diferentes. En cada una se usa un tipo distinto de portamuestras, uno que contiene una esfera integradora y otro que simplemente permite el apoyo de la cubeta.

- Transmisión: Para obtener la intensidad de transmisión la muestra, en su correspondiente cubeta, se sitúa en el portamuestras sin esfera. La intensidad incidente,

$I_0$ , se propaga a través de la muestra. La fracción de intensidad que atraviesa la muestra sin modificar su dirección se mide en un detector.

Con esta medición, esquematizada en la figura 8, se obtiene de la intensidad transmitida  $I_T$ , sin modificar su dirección [22].

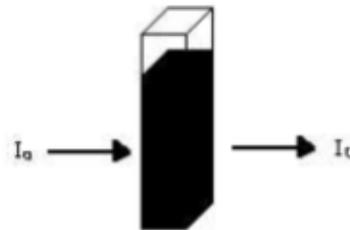


Figura 8. Esquema simple de una cubeta sobre a que incide un haz luminoso con la radiación incidente y transmitida [22]

- Transmisión y dispersión hacia delante:

La cubeta se sitúa en la posición  $S_1$  y la esfera se cierra con un tapón de teflón ubicado en  $S_2$ , la posición de la esfera, en este caso, es especular con una inclinación de  $3^\circ$  respecto a la normal, como se muestra en la figura 9. El haz transmitido entra en la esfera y al chocar con las paredes se dispersa en todas las direcciones.

Con esta medición se obtiene de la intensidad dispersada hacia delante,  $I_{FS}$  en todas las direcciones. La inclinación de la cubeta con respecto a la radiación incidente es de 3 grados [22].

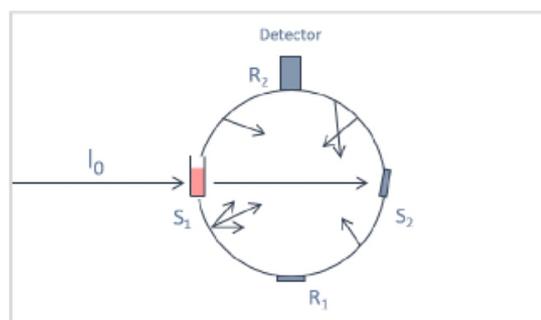


Figura 9. Esquema de la esfera integradora para medir la transmisión y la dispersión hacia delante [22]

- Reflexión y dispersión hacia atrás

La cubeta se sitúa en la posición  $S_2$  sustituyendo al tapón de teflón, la esfera se mantiene en posición especular y la posición  $S_1$  queda al descubierto, como se muestra en la figura 10.

Con esta medición se obtiene de la intensidad de reflexión e intensidad dispersada hacia atrás  $I_{R+BS}$ . La inclinación de la cubeta con respecto a la radiación incidente es de 3 grados [22].

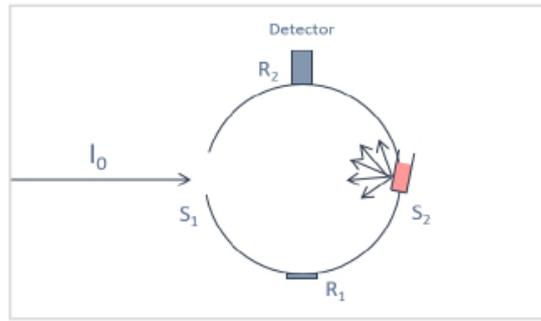


Figura 10. Esquema de la esfera integradora para medir la reflexión y la dispersión hacia atrás. [22]

- **Dispersión hacia atrás:**

Con esta medición se obtiene la dispersión hacia atrás,  $I_{BS}$ , la única modificación a realizar, respecto a la situación anterior, es la inclinación de la esfera. Para este caso, la esfera se encuentra en posición difusa, esto es a  $0^\circ$  respecto a la normal, ver figura 11. Únicamente, lo que se obtiene es el fenómeno de dispersión hacia atrás, puesto que la luz incide perpendicularmente sobre la cubeta, no dando lugar a que se produzca la reflexión [22].

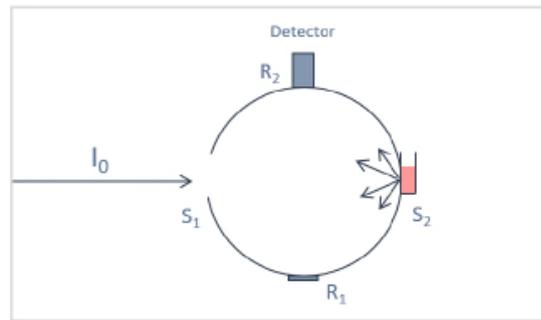


Figura 11. Esquema de la esfera integradora para medir la dispersión hacia atrás [22]

### 3.5 Formulación para la obtención de resultados

La transmitancia,  $T(\lambda)$ , expresada en función de la longitud de onda, se define como la relación entre la intensidad transmitida y la intensidad incidente.

$$T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (1)$$

La reflectancia,  $R(\lambda)$ , expresada en función de la longitud de onda, se define como la relación entre la intensidad reflejada y la intensidad incidente.

$$R(\lambda) = \frac{I_R}{I_0} = \frac{I_{R+BS}(\lambda)}{I_0(\lambda)} - \frac{I_{BS}(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (2)$$

El coeficiente de extinción se proviene de dos fenómenos, la absorción y la dispersión, siendo,

$$\sigma(\lambda) = \mu_{abs}(\lambda) + \mu_{sca}(\lambda) \quad (3)$$

Donde:

$\sigma(\lambda)$ , es el coeficiente de extinción.

$\mu_{abs}$ , es el coeficiente de absorción [ $\text{cm}^{-1}$ ].

$\mu_{sca}$ , el coeficiente de dispersión [ $\text{cm}^{-1}$ ].

Para obtener el coeficiente de absorción y el de dispersión es necesario recurrir a la teoría propuesta por Kubelka-Munk [24]:

$$\frac{\mu_{abs}(\lambda)}{\mu_{sca}(\lambda)} = \frac{R^2(\lambda) - T^2(\lambda) + 1}{2R(\lambda)} \quad (4)$$

$$\mu_{sca}(\lambda) = \frac{1}{C(\lambda)d} \cot^{-1} \frac{T^2(\lambda) - R^2(\lambda) + 1}{2R(\lambda)C(\lambda)} \quad (5)$$

Siendo:

d, el espesor de la muestra [cm].

$$C(\lambda) = \sqrt{\frac{\mu_{abs}(\lambda)}{\mu_{sca}(\lambda)} \left( \frac{\mu_{abs}(\lambda)}{\mu_{sca}(\lambda)} + 2 \right)} \quad (6)$$

### 3.6 Resultados experimentales

En el presente apartado se van a presentar los principales resultados experimentales del TFM con título "ESTUDIO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE NANOFUIDOS DE ORO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR" [22], resultados obtenidos siguiendo lo indicado en los puntos 3.4 y 3.5 de este TFM, y que serán base para el desarrollo de los modelos analíticos:

#### 3.6.1 Transmitancia:

Datos obtenidos realizando las mediciones como se describe en la ecuación (1) de este documento, extracto de TFM con título "ESTUDIO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE NANOFUIDOS DE ORO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR" [22].

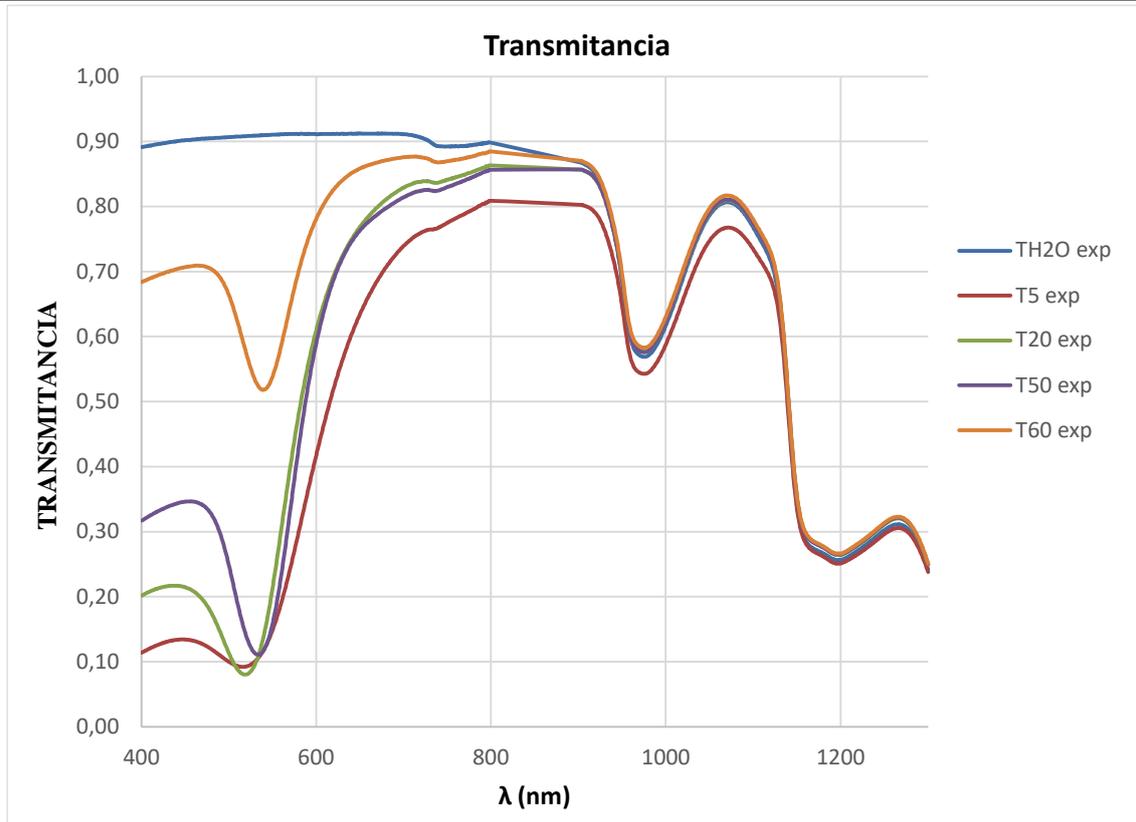


Figura 12. Transmitancia experimental en función de la longitud de onda para los nanofluidos estudiados

### 3.6.2 Reflectancia:

Datos obtenidos realizando las mediciones como se describe en la ecuación (2) de este documento, extracto de TFM con título "ESTUDIO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE NANOFLUIDOS DE ORO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR" [22].

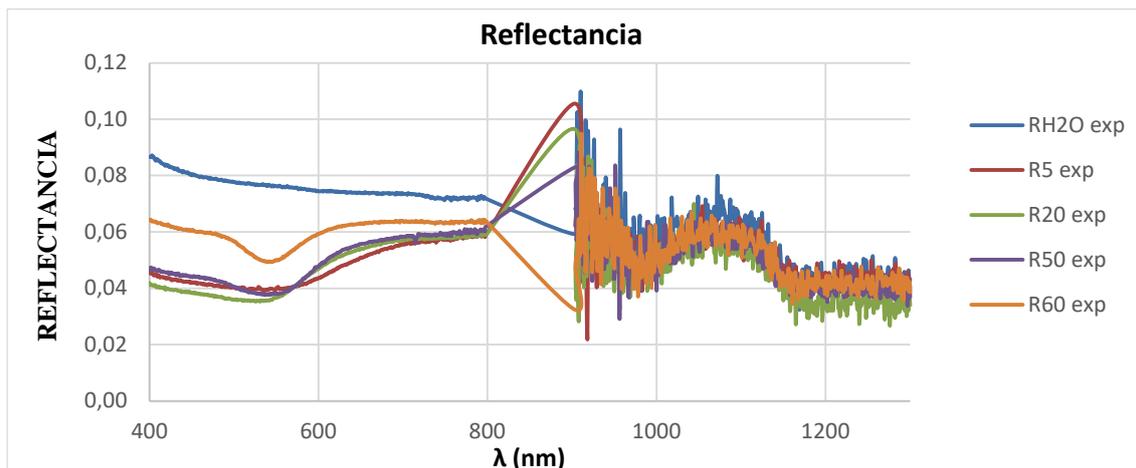


Figura 13. Reflectancia experimental en función de la longitud de onda para los nanofluidos estudiados

### 3.6.3 Coeficiente de extinción:

En la figura 14 se representan los datos obtenidos realizando las mediciones como se describe en la ecuación (3) de este documento, extracto de TFM con título "ESTUDIO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE NANOFLUIDOS DE ORO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR" [22].

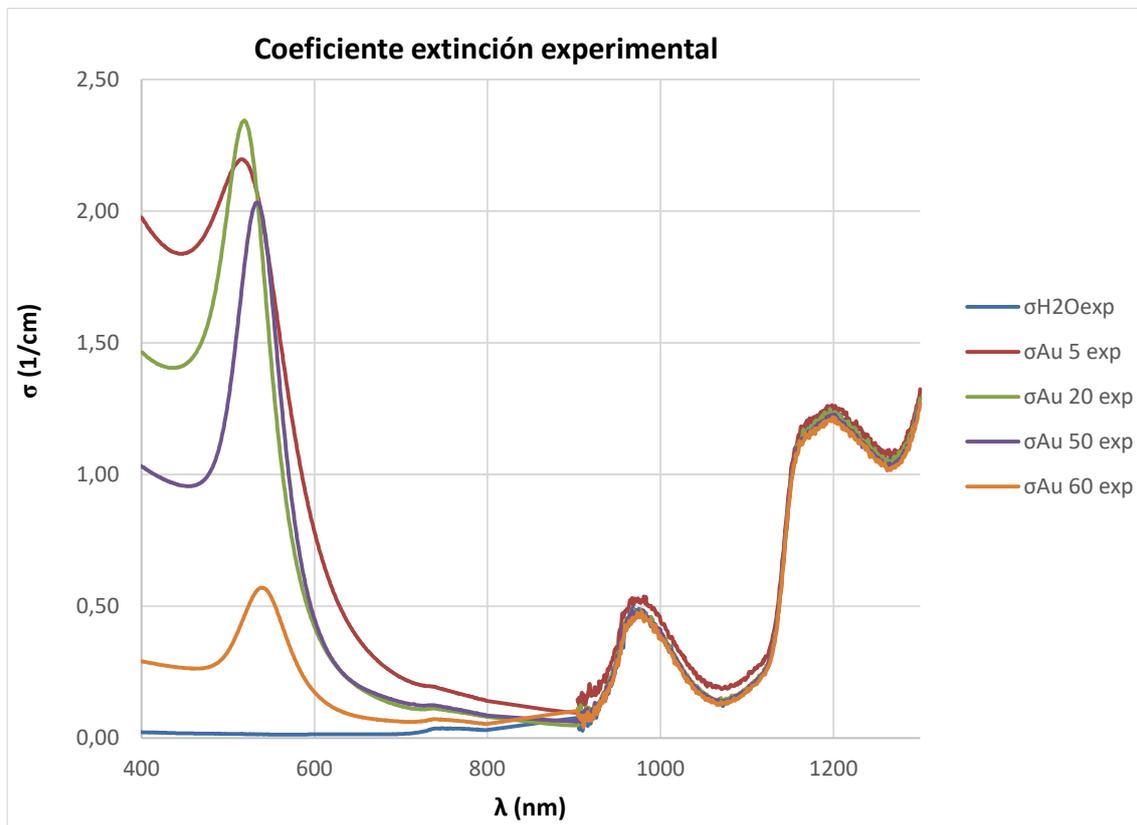


Figura 14. Coeficiente de extinción experimental en función de la longitud de onda para los nanofluidos estudiados

## 4 MODELOS TEÓRICOS DEL COEFICIENTE DE EXTINCIÓN

### 4.1 Análisis teórico de la propagación de la radiación electromagnética

Los campos electromagnéticos en su propagación a través de la materia (dieléctricos) interactúan con ésta a través de distintos mecanismos.

Los procesos macroscópicos que se producen por la interacción son la transmisión, la reflexión y la refracción. Estos procesos son manifestaciones de la dispersión y de la absorción que tienen lugar a nivel submicroscópico [25]. La figura 15 representa un esquema de este proceso.

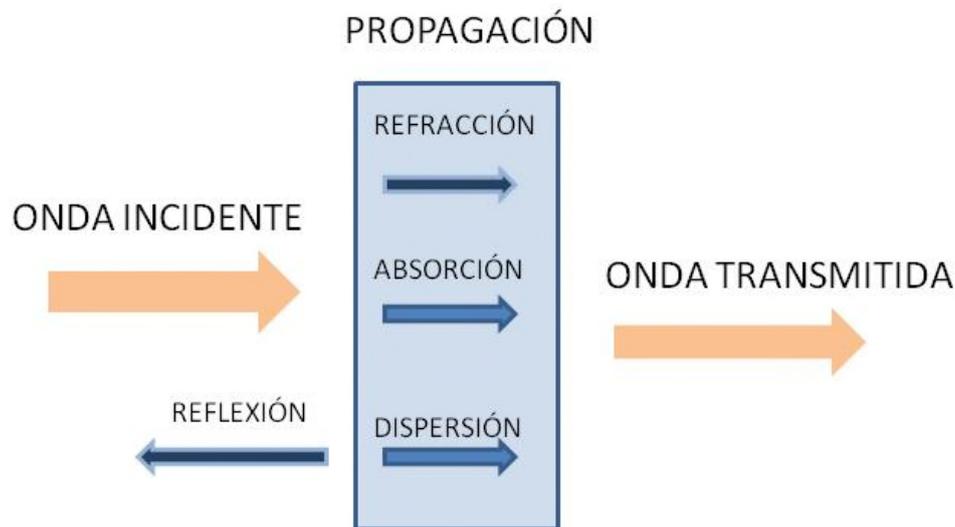


Figura 15. Esquema de propagación de la radiación electromagnética en un medio

Cuando un campo electromagnético llega a un medio material, parte del espectro de radiación se dispersa hacia atrás, a este fenómeno se le llama **reflexión**. La reflexión puede ser especular, cuando la reflexión se produce en una única dirección bien definida, o reflexión difusa, cuando se produce en varias direcciones, ver figura 16:

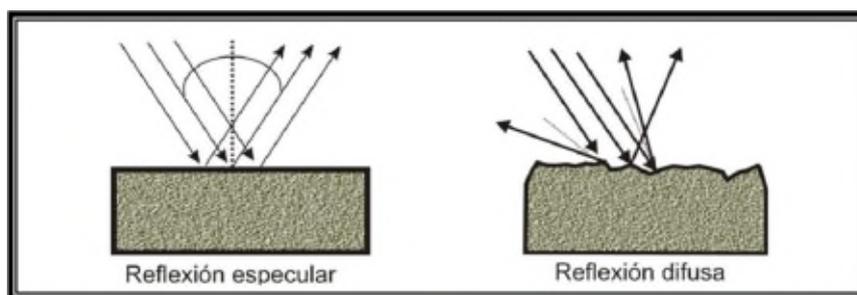


Figura 16. Esquema de tipos de reflexión

El espectro de radiación restante sigue la propagación a través del medio material. Los cambios que sufre la radiación en el medio se le llaman **Refracción**. En el interior del medio la radiación interactúa con los átomos de la materia. Dicha interacción produce una variación en la velocidad de fase de la radiación incidente. A la relación entre la velocidad de fase en el vacío y la velocidad de fase en un material se le llama índice de refracción absoluto. Las velocidades de fase dependen de la permeabilidad del medio al campo eléctrico y de la permeabilidad del medio al campo magnético. A su vez el índice de refracción es variable con la frecuencia de la radiación incidente. Este efecto macroscópico proviene de los siguientes de dos mecanismos:

- **Absorción:** Si la energía del fotón incidente equivale a la de los estados excitados del átomo del medio, el átomo absorberá la luz realizando un salto cuántico hasta ese nivel más alto de energía. En un entorno atómico denso (gases densos, líquidos, sólidos) es muy probable que la energía excitadora del átomo se transfiera rápidamente, por colisiones, al movimiento atómico aleatorio, energía térmica, antes de que pueda emitirse un fotón. A esto se le llama absorción disipativa [25].
- **Dispersión (scattering):** La radiación incidente tiene frecuencias distintas de las de resonancia., esta radiación no es capaz de producir la transición de los átomos a estados excitados superiores, pero puede suponerse que lleve a la nube de electrones a oscilar. Una vez que la nube de electrones empieza a vibrar puede considerarse que se comporta como un dipolo oscilante y empezará a radiar a la misma frecuencia. La luz dispersa resultante sale disparada en alguna dirección que, posiblemente no será la del fotón incidente [25].

A la relación entre la radiación incidente y la radiación que sale del medio se le llama **Transmisión**. Al producirse disipación durante el fenómeno de la propagación, la radiación transmitida, desde un enfoque de la física ondulatoria, habrá reducido su amplitud. A este fenómeno se le llama extinción.

Al estudiar estos fenómenos dentro del campo del electromagnetismo y tratando la radiación como una onda, esta disipación aparece en las ecuaciones a través del índice de refracción, siendo ahora este una magnitud compleja. Definimos el índice de refracción complejo como:

$$m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda) \quad (7)$$

Dirigiendo el estudio hacia las intensidades de radiación, según la Ley de Beer-Lambert podemos definir:

$$I_0 = I_T + I_A + I_S + I_R \quad (8)$$

Siendo:

$I_0$ , la intensidad incidente [W/m<sup>2</sup>].

$I_R$ , la intensidad reflejada [W/m<sup>2</sup>].

$I_A$ , la intensidad absorbida [W/m<sup>2</sup>].

$I_S$ , la intensidad dispersada [W/m<sup>2</sup>].

Normalizando la ecuación anterior con la intensidad incidente, se pueden definir los parámetros ópticos.

$$\frac{I_0}{I_0} = \frac{I_T}{I_0} + \frac{I_A}{I_0} + \frac{I_S}{I_0} + \frac{I_R}{I_0} \quad (9)$$

$$1 = T + A + S + R \quad (10)$$

De esta última expresión, se extraen los coeficientes ópticos. La transmitancia, T, es el cociente entre la intensidad transmitida y la intensidad incidente; la reflectancia, R, es el cociente resultante de dividir la intensidad reflejada entre la intensidad incidente. De igual modo, la absorptancia, A, es el resultado de la potencia absorbida entre la potencia de referencia. Finalmente, la dispersión (en inglés scattering), S, representa la potencia dispersada entre la potencia que incide en la materia.

A su vez, la variación de la intensidad de la radiación a lo largo de un medio, según la Ley de Beer-Lambert se describe de la siguiente forma:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\sigma(\lambda)x} \quad (11)$$

Siendo:

$\lambda$ , longitud de onda.

$\sigma(\lambda)$ , coeficiente de extinción. Recoge la disipación de energía durante la propagación de la radiación a través del medio, durante los procesos de absorción y scattering.

El coeficiente de extinción nos da una medida de la energía retenida en el nanofluido, siendo esta magnitud el objeto de estudio en este trabajo.

## 4.2 Simplificaciones teóricas asumidas

Siendo el objeto del trabajo la comparación de los resultados experimentales del coeficiente de extinción de los nanofluidos con distintos modelos analíticos, aplicaremos las siguientes simplificaciones a nuestro estudio.

### 4.2.1 Luz incoherente

La superposición de dos o más ondas produce, generalmente, interferencias; las ondas se suman o se restan, produciendo con ello máximas o mínimas intensidades. Una luz con estas características se denomina una luz incoherente. La radiación solar es incoherente.

### 4.2.2 Incidencia normal de las ondas de radiación:

Consideramos que la radiación solar interactúa en nuestra muestra de forma normal. Ver punto 3.4 de este documento.

### 4.2.3 Scattering independiente

Dados los tamaños de partículas que vamos a utilizar y las concentraciones de las mismas en el nanofluido, trabajamos en régimen de scattering independiente, como podemos ver en la figura 17:

- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 5: Nanopartícula Au tamaño 5nm, concentración C=59.6 mg/L,  $f_v = 3.06211E-06$  (La densidad del oro es de 19.32 g/cm<sup>3</sup>).
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 20: Nanopartícula Au tamaño 20nm, concentración C=41.6 mg/L,  $f_v = 2.15321E-06$  (La densidad del oro es de 19.32 g/cm<sup>3</sup>).
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 50: Nanopartícula Au tamaño 50nm, concentración C=23.9 mg/L,  $f_v = 1.23706E-06$  (La densidad del oro es de 19.32 g/cm<sup>3</sup>).
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 60: Nanopartícula Au tamaño 60nm, concentración C=5.91 mg/L,  $f_v = 3.05901E-07$  (La densidad del oro es de 19.32 g/cm<sup>3</sup>).

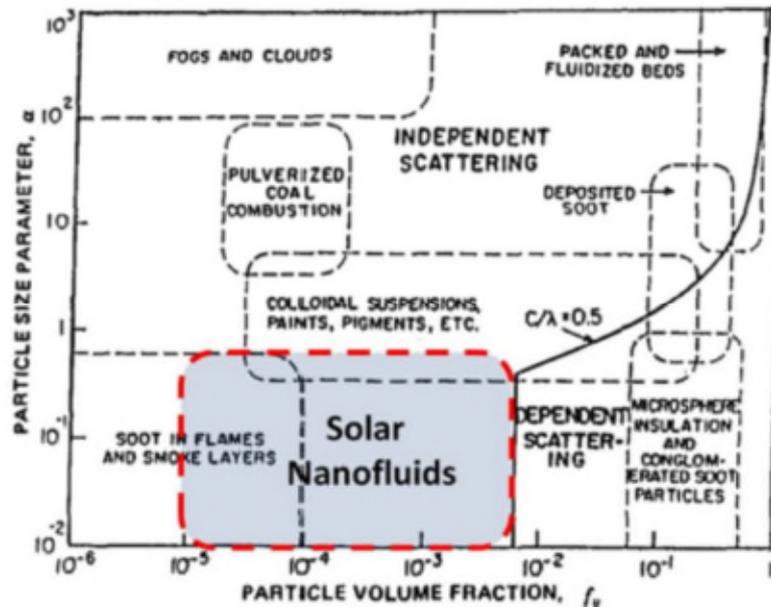


Figura 17. Mapa del régimen de Scattering [26]

#### 4.2.4 Términos no lineales despreciables en la Teoría de Scattering de Mie

Debido a que los tamaños de partícula utilizados en media no superan los 60nm y las longitudes de onda de la radiación incidente son al menos 10 veces mayores, los términos de mayor orden de Mie se pueden despreciar.

### 4.3 Modelos teóricos utilizados para la deducción del coeficiente de extinción

Obtenidos de forma experimental los coeficientes de extinción,  $\sigma$ , para las muestras definidas en el punto 3 de este documento:

- Agua pura H<sub>2</sub>O.
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 5.
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 20.
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 50.
- Nanofluido H<sub>2</sub>O+Au 60.

Se pretende la comparación de los resultados experimentales de los coeficientes de extinción de las distintas muestras con los obtenidos analíticamente utilizando distintos métodos de cálculo.

#### 4.3.1 Modelización del coeficiente de extinción del agua pura

##### 4.3.1.1 Conversión directa

A partir de valores tabulados de  $K$ , componente compleja del índice de refracción complejo del agua, se obtiene el coeficiente de extinción del agua:

$$\sigma_{H_2O} = \frac{4\pi}{\lambda} K_{H_2O} \quad (122)$$

Donde:

$\sigma_{H_2O}$ , coeficiente de extinción del agua pura.

$\lambda$ , la longitud de onda en cm

$K_{H_2O}$ , componente compleja del índice de refracción complejo del agua

#### 4.3.1.2 Sistemas de bloques de Large

Se considera el siguiente diagrama de bloques: [27]

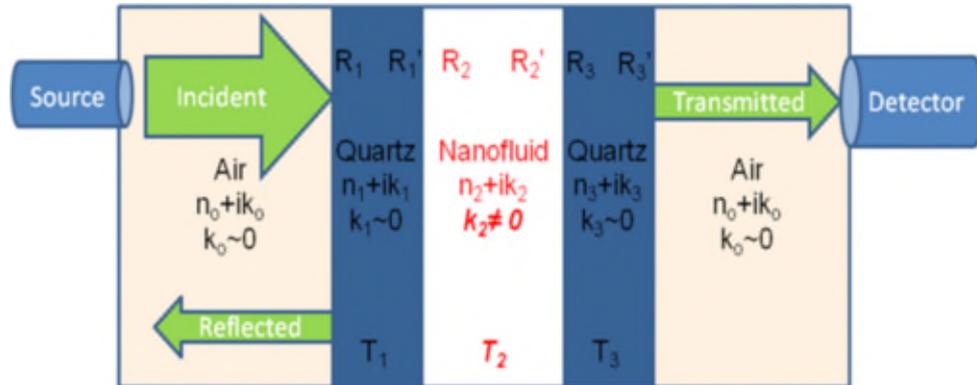


Figura 18. Diagrama de sistema de 3 capas para la espectrometría de un nanofluido en cubeta de cuarzo [27]

Ver figura 6 del punto 3.2 de este TFM donde se muestra la cubeta utilizada para las mediciones. Aunque en la figura 18 se rotula nanofluido, es igualmente válido para el agua pura.

Las variables de nuestro sistema son las siguientes:

$n_0+ik_0$ , índice de refracción complejo del aire.

$n_1+ik_1$  y  $n_3+ik_3$ , índice de refracción complejo del cuarzo.

$n_2+ik_2$ , índice de refracción complejo del agua pura.

$T_1$ ,  $T_3$ , Transmitancias a través de las paredes de cuarzo de la cubeta.

$T_2$ , Transmitancias a través del nanofluido, en este caso agua pura.

$R_1$ , Reflectancia primera frontera del primer bloque de cuarzo.

$R_1'$ , Reflectancia segunda frontera del primer bloque de cuarzo.

$R_2$ , Reflectancia primera frontera de cuarzo-nanofluido, en este caso agua pura.

$R_2'$ , Reflectancia segunda frontera nanofluido, en este caso agua, cuarzo.

$R_3$ , Reflectancia primera frontera del segundo bloque de cuarzo.

$R_3'$ , Reflectancia segunda frontera del segundo bloque de cuarzo.

$T$ , Transmitancia total.

$R$ , Reflectancia total.

$R'$ , Reflectancia total interna.

$L_1$  y  $L_3$ , sección de la pared de la cubeta en cm (0.1 cm).

$L_2$ , sección del interior de la cubeta donde se encuentra en nanofluido en cm (1 cm).

Considerando las siguientes variables conocidas:

Datos aire (solo sirve para longitudes de onda entre 0.23 hasta 1.69 micras, obtenido de [28]).

$$n_o[\lambda] = 1 + \frac{0.05792105}{238.0185 - \lambda^{-2}} + \frac{0.00167917}{57.362 - \lambda^{-2}} \quad (133)$$

$$k_0[\lambda] = 0 \quad (14)$$

Datos cuarzo (solo sirve para longitudes de onda entre 0.198 hasta 2.05 micras [28]):

$$n_1[\lambda] = n_3[\lambda] = \text{Sqrt} \left[ 1.28604141 + \frac{1.07044083 * \lambda^2}{\lambda^2 - 1.00585997 * 10^{-2}} + \frac{1.10202242 * \lambda^2}{\lambda^2 - 100} \right] \quad (145)$$

$$k_1[\lambda] = k_3[\lambda] = 0 \quad (115)$$

Para cada uno de los medios usamos las ecuaciones de Fresnel, válidas para incidencia normal de la luz:

$$R_1[\lambda] = \frac{(n_0 - n_1)^2 + (k_0 - k_1)^2}{(n_1 + n_0)^2 + (k_1 + k_0)^2} \quad (17)$$

$$R_1'[\lambda] = \frac{(n_1 - n_2)^2 + (k_1 - k_2)^2}{(n_2 + n_1)^2 + (k_2 + k_1)^2} \quad (168)$$

$$T_1 = \frac{(1 - R_1 R_1') e^{\frac{-4\pi k_1 L_1}{\lambda}}}{1 - R_1 R_1' e^{\frac{-8\pi k_1 L_1}{\lambda}}} \quad (19)$$

$$R_2[\lambda] = \frac{(n_1 - n_2)^2 + (k_1 - k_2)^2}{(n_2 + n_1)^2 + (k_2 + k_1)^2} \quad (170)$$

$$R_2'[\lambda] = \frac{(n_2 - n_3)^2 + (k_2 - k_3)^2}{(n_3 + n_2)^2 + (k_3 + k_2)^2} \quad (181)$$

$$T_2 = \frac{(1 - R_2 R_2') e^{\frac{-4\pi k_2 L_2}{\lambda}}}{1 - R_2 R_2' e^{\frac{-8\pi k_2 L_2}{\lambda}}} \quad (19)$$

$$R_3[\lambda] = \frac{(n_2 - n_3)^2 + (k_2 - k_3)^2}{(n_3 + n_2)^2 + (k_3 + k_2)^2} \quad (203)$$

$$R_3'[\lambda] = \frac{(n_3 - n_0)^2 + (k_3 - k_0)^2}{(n_3 + n_0)^2 + (k_3 + k_0)^2} \quad (24)$$

$$T_3 = \frac{(1 - R_3 R'_3) e^{\frac{-4\pi k_3 L_3}{\lambda}}}{1 - R_3 R'_3 e^{\frac{-8\pi k_3 L_3}{\lambda}}} \quad (25)$$

Combinando los dos primeros medios:

$$T_{12} = T_1 T_2 + \frac{R'_1 R_2 T_1 T_2}{1 - R_2 R'_1} \quad (26)$$

$$R_{12} = R_1 + \frac{T^2_1 R_2}{1 - R_2 R'_1} \quad (27)$$

$$R'_{12} = R'_2 + \frac{T^2_2 R'_1}{1 - R_2 R'_1} \quad (28)$$

El resultado final:

$$T = T_{12} T_3 + \frac{R'_{12} R_3 T_{12} T_3}{1 - R_3 R'_{12}} \quad (29)$$

$$R = R_{12} + \frac{T^2_{12} R_3}{1 - R_3 R'_{12}} \quad (30)$$

$$R' = R'_3 + \frac{T^2_3 R'_{12}}{1 - R_3 R'_{12}} \quad (31)$$

Se necesitan dos datos para poder resolver el sistema de ecuaciones. Se utilizan los datos experimentales para la transmitancia y la reflectancia totales.

Resolviendo las ecuaciones se halla el valor de  $K_2$ , parte imaginaria del índice complejo de refracción del agua pura en este caso.

Con la siguiente ecuación hallamos el coeficiente de extinción del agua deseado:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda} K_2 \quad (32)$$

#### 4.3.1.3 Teoría de Maxwell-Garnett

Se basa en la búsqueda de las constantes dieléctricas efectivas del agua pura y a través de dichas constantes hallar su índice de refracción complejo [26].

$$n = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon'_{eff}{}^2 + \varepsilon''_{eff}{}^2} + \varepsilon'_{eff}}{2}} \quad (21)$$

$$k = \sqrt{\frac{\epsilon'_{eff}{}^2 + \epsilon''_{eff}{}^2 - \epsilon'_{eff}}{2}} \quad (34)$$

Donde,

$\epsilon_{eff}$ , la constante dieléctrica compleja efectiva agua tabulada =  $\epsilon'_{eff} + i \epsilon''_{eff}$ .

$n$ , parte real del índice de refracción complejo.

$K$ , parte imaginaria del índice de refracción complejo.

#### 4.3.2 Modelización del coeficiente de extinción de los nanofluidos

##### 4.3.2.1 Teoría de Scattering de Mie

Se obtienen los valores analíticos de los distintos nanofluidos utilizando las ecuaciones de la Teoría de Scattering de Mie [26] y válidos para Scattering Independiente (Dispersión Independiente).

La formulación es como sigue:

$$Q_{scat} = \frac{8}{3} \alpha^4 \left[ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]^2 \quad (35)$$

$$Q_{abs} = 4\alpha \text{Im} \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \left[ 1 + \frac{\alpha^2}{15} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right) \frac{m^4 + 27m^2 + 38}{2m^2 + 3} \right] \right\} \quad (36)$$

$$Q_{ext} = Q_{scat} + Q_{abs} \quad (37)$$

$$\sigma_{AU} = \frac{3 f_v}{2 D} Q_{abs} \quad (22)$$

$$\sigma_{H2O} = \frac{4\pi}{\lambda} K_{H2O} \quad (38)$$

$$\sigma = \sigma_{H2O} + \sigma_{AU} \quad (39)$$

Donde:

$Q_{scat}$ , Eficiencia de esparcimiento.

$Q_{abs}$ , Eficiencia de absorción.

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$$

$\lambda$ , la longitud de onda en cm.

$D$ , el diámetro de la partícula en cm.

$f_v$ , la concentración volumétrica de nanopartículas en el agua.

$m$ , índice de refracción complejo del oro como material macroscópico.

$$m = n_{AU}(\lambda) + ik_{AU}(\lambda) \quad (40)$$

$\sigma_{H_2O}$ , coeficiente de extinción del agua pura obtenida de series definidas [8].

$\sigma_{AU}$ , coeficiente de extinción de las partículas de oro.

$\sigma$ , coeficiente de extinción del nanofluido.

#### 4.3.2.2 Sistemas de bloques de Large:

El desarrollo es idéntico al presentado en el punto 4.3.1.2, siendo en este caso  $n_2+ik_2$ , índice de refracción complejo del nanofluido y, con la siguiente ecuación se obtiene el coeficiente de extinción del nanofluido deseado:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda} K_2 \quad (41)$$

#### 4.3.2.3 Teoría de Maxwell- Garnett

Se basa en la búsqueda de las constantes dieléctricas efectivas del nanofluido y a través de dichas constantes hallar su índice de refracción complejo [26].

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_f \left[ 1 + \frac{3f_v \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_f}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_f}}{1 - f_v \frac{\varepsilon_p - 2\varepsilon_f}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_f}} \right] \quad (42)$$

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon'_{eff}{}^2 + \varepsilon''_{eff}{}^2 + \varepsilon'_{eff}}{2}} \quad (43)$$

$$k = \sqrt{\frac{\varepsilon'_{eff}{}^2 + \varepsilon''_{eff}{}^2 - \varepsilon'_{eff}}{2}} \quad (44)$$

Donde,

$\varepsilon_{eff}$ , la constante dieléctrica compleja efectiva del nanofluido =  $\varepsilon'_{eff} + i \varepsilon''_{eff}$ .

$\varepsilon_f$ , la constante dieléctrica compleja efectiva del fluido base =  $\varepsilon_{1H_2O} + i \varepsilon_{2H_2O}$ .

$\varepsilon_p$ , la constante dieléctrica compleja efectiva de la nanopartícula =  $\varepsilon_{1AU} + i \varepsilon_{2AU}$ .

$f_v$ , la concentración en volumen de nanopartículas en el fluido base.

$n$ , la parte real del índice complejo de refracción del nanofluido.

$k$ , la parte imaginaria del índice complejo de refracción del nanofluido.

El coeficiente de extinción del nanofluido se obtendrá al aplicar a dichos valores la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda} k \quad (45)$$

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 Cálculo del coeficiente de extinción para el agua pura

Los resultados modelados se acotan en el rango de valores medidos (entre 400nm – 800nm y 900nm - 1500nm), pero eliminando el rango de 1300nm a 1500nm, donde los resultados experimentales no son fiables.

Valores comparados:

- Valores del coeficiente de extinción medidos experimentalmente  $\sigma_{H_2Oexp}$ .
- Valores del coeficiente de extinción publicados: existen estudios que ofrecen valores para índice de refracción complejo del agua pura para diversas longitudes de onda [28]. Usando la expresión  $\sigma = \frac{4\pi}{\lambda} K$ , obtenemos los coeficientes de extinción deseados:
  - SEGELSTEIN:  $\sigma_{H_2O\text{Segelstein}}$ .
  - KEDENBURG:  $\sigma_{H_2O\text{Kedenburg}}$ .
- Valores del coeficiente de extinción hallados aplicando la aproximación de Large, y hallado los resultados mediante el programa realizado con el software de Mathematica **OTANICAR-T-R EXPERIMENTAL**  $\sigma_{H_2OLARGE}$ . Usamos para iterar la transmitancia (T) y la reflectancia (R) medida experimentalmente y presentada en el punto 3.6 de este documento, en las figuras 12 y 13 [29].
- Valores del coeficiente de extinción hallados aplicando la Teoría de Maxwell- Garnett.

Los datos necesarios en las fórmulas de Maxwell-Garnett de las constantes dieléctricas del agua pura se obtienen de las constantes dieléctricas asociadas al índice de refracción complejo del agua pura para diversas longitudes de onda de los valores listados por KEDENBURG [28].  $\sigma_{H_2O\text{MG}}$ .

Los datos tabulados del coeficiente de extinción del agua pura dados por Selgestein y por Kedenburg son muy similares a lo largo de todo el rango de longitud de onda estudiado, y, aunque los datos tabulados por Selgestein empiezan en  $\lambda$  igual a 400nm y los de Kedenburg en 500nm, esta última serie es más densa que la primera. Considerando que entre las longitudes de onda 400 a 500nm, el aporte del agua a pura al coeficiente de extinción es despreciable frente al de las nanopartículas, se escoge la serie de Kedenburg.

### 5.2 Cálculo del coeficiente de extinción para los distintos nanofluidos

Se pretenden comparar los resultados experimentales del coeficiente de extinción,  $\sigma$ , de un nanofluido formado por agua pura como fluido base y nanopartículas de oro con coeficientes de extinción hallados analíticamente por distintos métodos.

Los nanofluidos estudiados son los siguientes

- H<sub>2</sub>O+Au con tamaño de nanopartícula de  $D_{50}= 6.08\text{nm}$  en una concentración de 59.6 mg/L.
- H<sub>2</sub>O+Au con tamaño de nanopartícula de  $D_{50}=15.57\text{nm}$  en una concentración de 41.6 mg/L.
- H<sub>2</sub>O+Au con tamaño de nanopartícula de  $D_{50}= 37.13\text{nm}$  en una concentración de 23.9 mg/L.

- H<sub>2</sub>O+Au con tamaño de nanopartícula de  $D_{50}= 45.47\text{nm}$  en una concentración de 5.91 mg/L.

El diámetro de partícula realmente utilizado ha sido el valor  $D_{50}$  descritos en la tabla 1 cuya fuente proviene que se desprende de la TFM ESTUDIO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE NANOFUIDOS DE ORO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR,[22]:

Realizamos, siguiendo el mismo esquema que en el punto anterior, la comparación entre los resultados experimentales del coeficiente de extinción para un nanofluido formado por agua pura como fluido base y nanopartículas de oro de los tamaños y concentraciones descritos anteriormente.

Centramos el estudio en el rango de longitudes de onda entre 400nm y 800nm. Por encima de 800nm la contribución de las nanopartículas en el coeficiente de extinción es mucho menor.

Valores comparados:

- Valores del coeficiente de extinción medidos experimentalmente  $\sigma_{Au\ 5\ exp}$ .
  - $\sigma_{Au\ 5\ exp}$  H<sub>2</sub>O+Au con tamaño de nanopartícula de 6.08nm en una concentración de 59.6 mg/L.
  - $\sigma_{Au\ 20\ exp}$  H<sub>2</sub>O+Au con tamaño de nanopartícula de 15.57nm en una concentración de 41.6 mg/L.
  - $\sigma_{Au\ 50\ exp}$  H<sub>2</sub>O+Au con tamaño de nanopartícula de 37.13nm en una concentración de 23.9 mg/L.
  - $\sigma_{Au\ 60\ exp}$  H<sub>2</sub>O+Au con tamaño de nanopartícula de 45.17nm en una concentración de 5.91 mg/L.
- Valores del coeficiente de extinción obtenidos a partir de la Teoría de Scattering de Mie: Para el coeficiente de extinción del fluido base, agua pura, se utiliza la base de datos de KEDENBURG [28] y para los datos de Coeficiente de extinción del material oro usamos las siguientes bases de datos [28]:
  - $\sigma_{Au\ 5\ MCPEAC}, \sigma_{Au\ 20\ MCPEAC}, \sigma_{Au\ 50\ MCPEAC}, \sigma_{Au\ 60\ MCPEAC}$  base de datos MCPEAK.
  - $\sigma_{Au\ 5\ BABER}, \sigma_{Au\ 20\ BABER}, \sigma_{Au\ 50\ BABER}, \sigma_{Au\ 60\ BABER}$  base de datos BABER.
  - $\sigma_{Au\ 5\ BB}, \sigma_{Au\ 20\ BB}, \sigma_{Au\ 50\ BB}, \sigma_{Au\ 60\ BB}$  base de datos RAKIC-BB MODEL.
  - $\sigma_{Au\ 5\ LD}, \sigma_{Au\ 20LD}, \sigma_{Au\ 50\ LD}, \sigma_{Au\ 60\ LD}$  base de datos RAKIC-LD MODEL.
- Valores del coeficiente del extinción hallados aplicando la aproximación de Large, y hallado los resultados mediante el programa realizado con el software de Mathematica **OTANICAR-T-R EXPERIMENTAL**,  $\sigma_{Au\ 5\ LARGE}, \sigma_{Au\ 20\ LARGE}, \sigma_{Au\ 50\ LARGE}, \sigma_{Au\ 60\ LARGE}$  Usamos para iterar la transmitancia (T) y la reflectancia (R) medida experimentalmente y presentada en el punto 3.6 del TFM en la figura 12 y 13 [29].
- Valores del coeficiente de extinción hallados aplicando la Teoría de Maxwell- Garnett.
 

Los datos necesarios en las fórmulas de Maxwell-Garnett de las constantes dieléctricas del agua pura se obtienen de las constantes dieléctricas asociadas al índice de refracción complejo del agua pura para diversas longitudes de onda de los valores listados por KEDENBURG [28] y las constantes dieléctricas asociadas al índice de refracción complejo del oro para diversas longitudes de onda de los valores listados por RAKIC-LD MODEL [28],  $\sigma_{Au\ 5\ MG}, \sigma_{Au\ 20\ MG}, \sigma_{Au\ 50\ MG}, \sigma_{Au\ 60\ MG}$ .

Los datos tabulados de los coeficientes de extinción siguiendo los diferentes modelos propuestos en este TFM son muy similares a lo largo de todo el rango de longitudes de onda estudiado, por lo que las constantes dieléctricas del material macroscópico no

variarán mucho de un modelo a otro. Así, se utilizan los datos del modelo de RAKIC-LD MODEL, porque después de hacer pruebas con las distintas series de datos, son las que dan un resultado un poco más ajustado.

## 6 RESULTADOS DE LOS MODELOS TEÓRICOS

### 6.1 Coeficiente de extinción del agua pura

De la aplicación de los cálculos descritos en el punto 5.1 se derivan los siguientes resultados.

En la figura 19, se representa la evolución del coeficiente de extinción (1/cm) del agua pura con la longitud de onda en el rango de 400nm a 1300nm. Se compara el coeficiente de extinción hallado experimentalmente con los que se derivan de modelos teóricos:

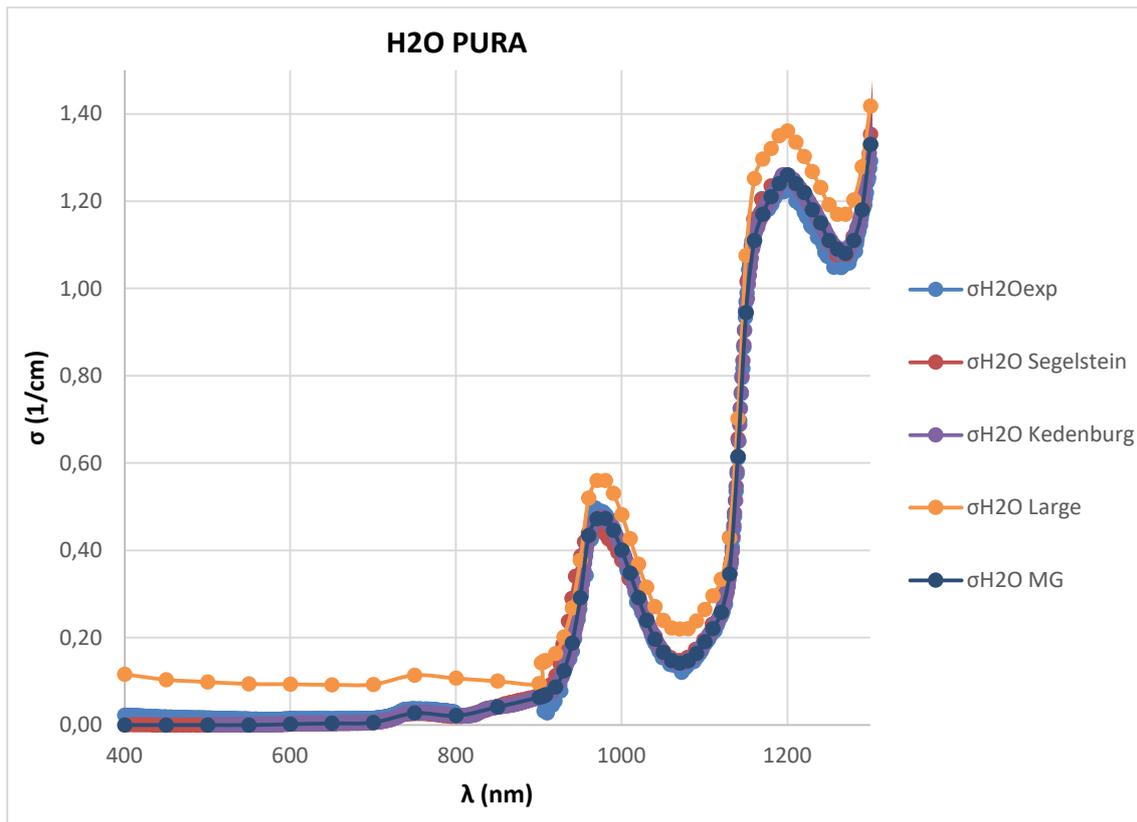


Figura 19. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm

Se observa que a partir de 1300nm los modelos teóricos se alejan de los resultados experimentales. Es una zona donde las nanopartículas no varían el coeficiente de extinción, luego para el modelado teórico del nanofluido no es relevante lo que ocurra. Centraremos el estudio entre las longitudes de onda comprendidas entre 400nm y 1300nm.

Las figuras 20 y 21 son dos ampliaciones de la figura 19. En la figura 20 ampliamos la gráfica entre las longitudes de onda 400nm a 800nm y la figura 21 entre 900nm y 1300nm.

En la figura 20, por ser el coeficiente de extinción muy similar en todo el rango de longitudes de onda el rango del eje de ordenadas se ha reducido, por lo que se aprecian mejor las diferencias entre los distintos modelos.

En la figura 21, el coeficiente de extinción sufre más variaciones a lo largo del rango de longitudes de onda tratados por lo que no se aprecian las diferencias entre modelos de forma tan explícita. Se graficarán con el eje de ordenadas en escala logarítmica para apreciar esas diferencias.

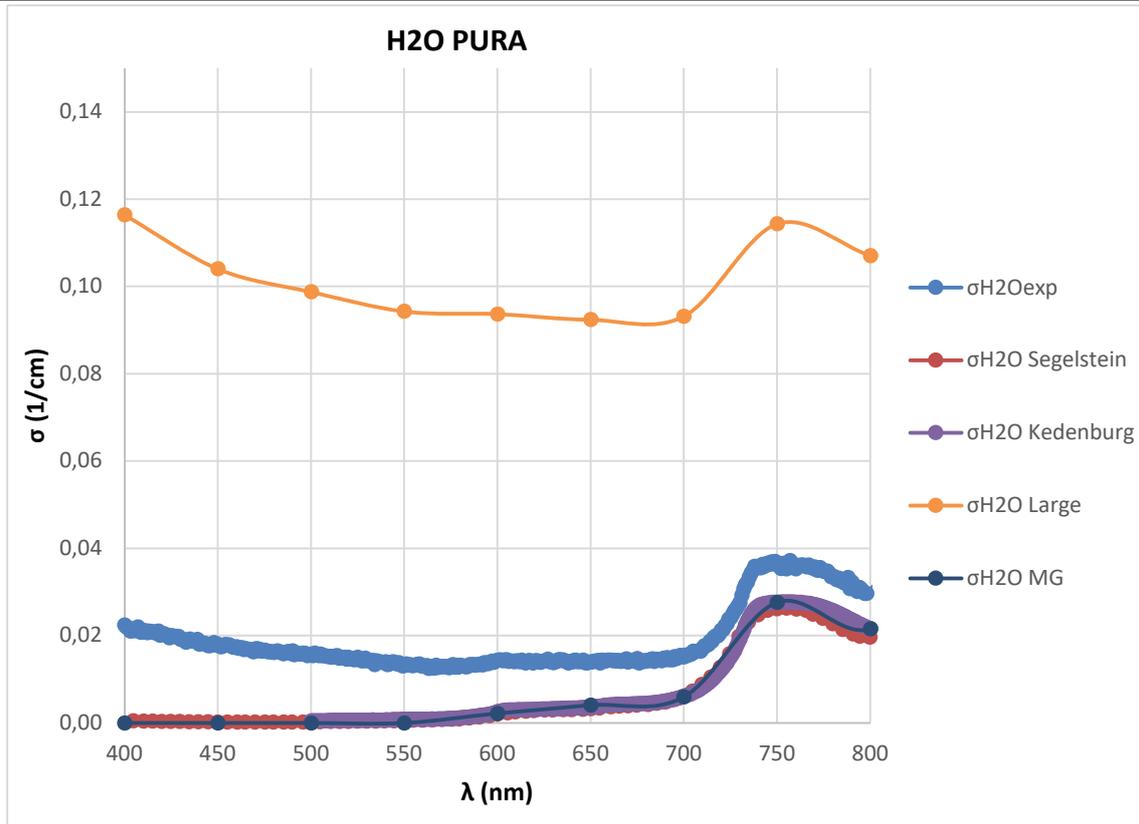


Figura 20. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O entre las longitudes de onda 400nm y 800nm

Se observa en la figura 20 que en este rango el modelo que se deriva de la aplicación de la aproximación de Large es muy superior a los resultados experimentales. El resto de los modelos dan resultados equivalentes e inferiores a los resultados experimentales. A medida que aumentas las longitudes de onda los resultados van convergiendo.

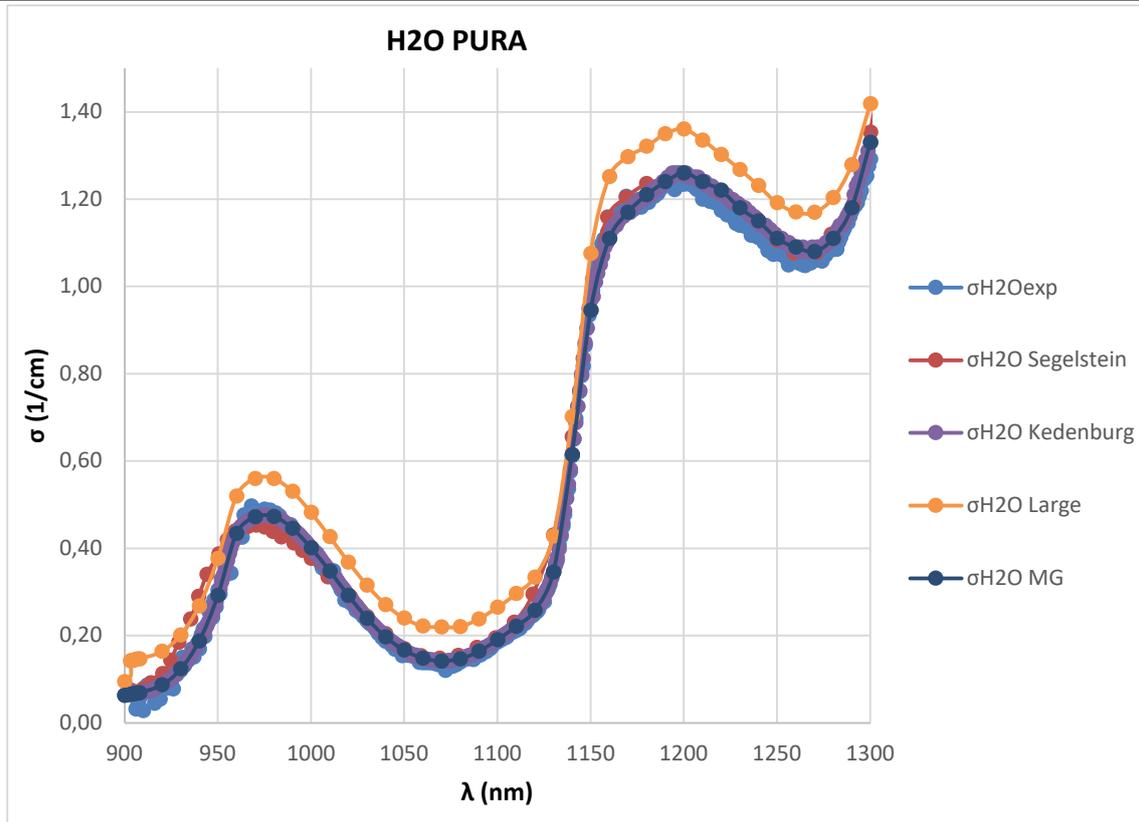


Figura 21. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm

En la figura 21 se observa que los resultados teóricos siguen convergiendo a resultado experimental a medida que aumenta la longitud de onda.

Observamos este efecto más claramente con la representación logarítmica de los resultados en las figuras 22,23 y 24.

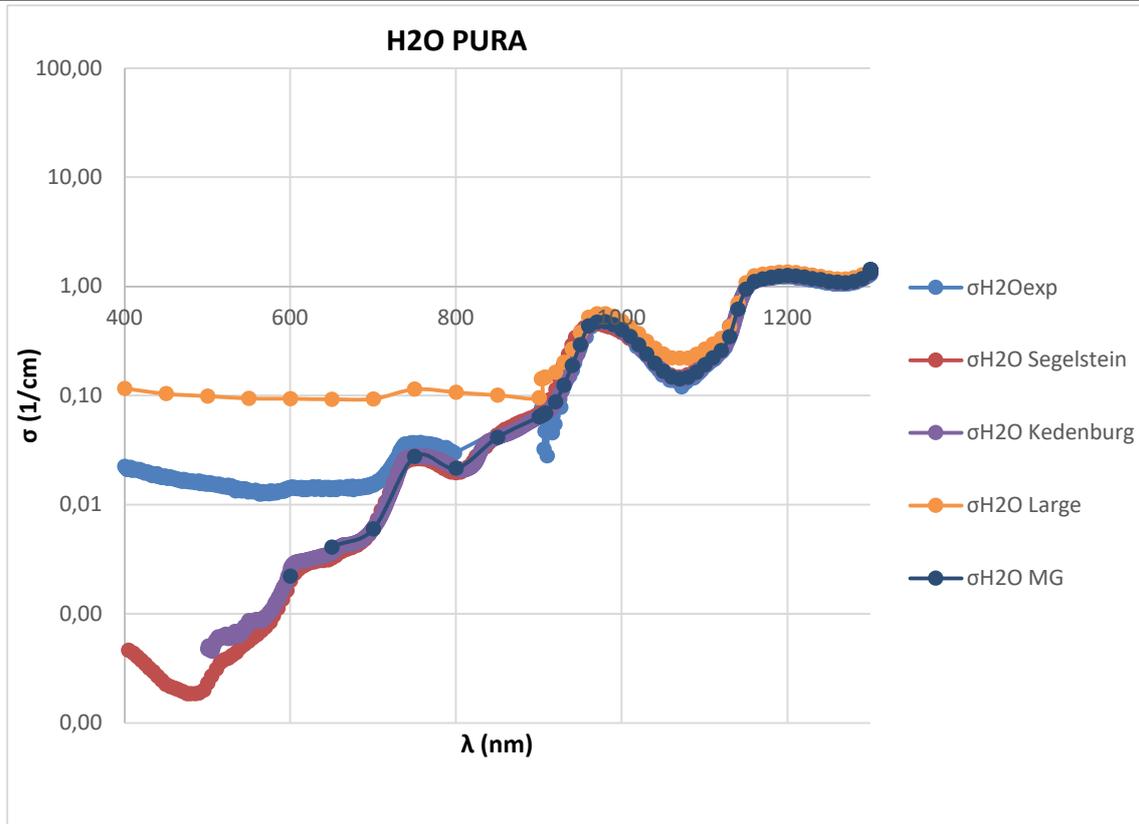


Figura 22. Representación del coeficiente de extinción H2O entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

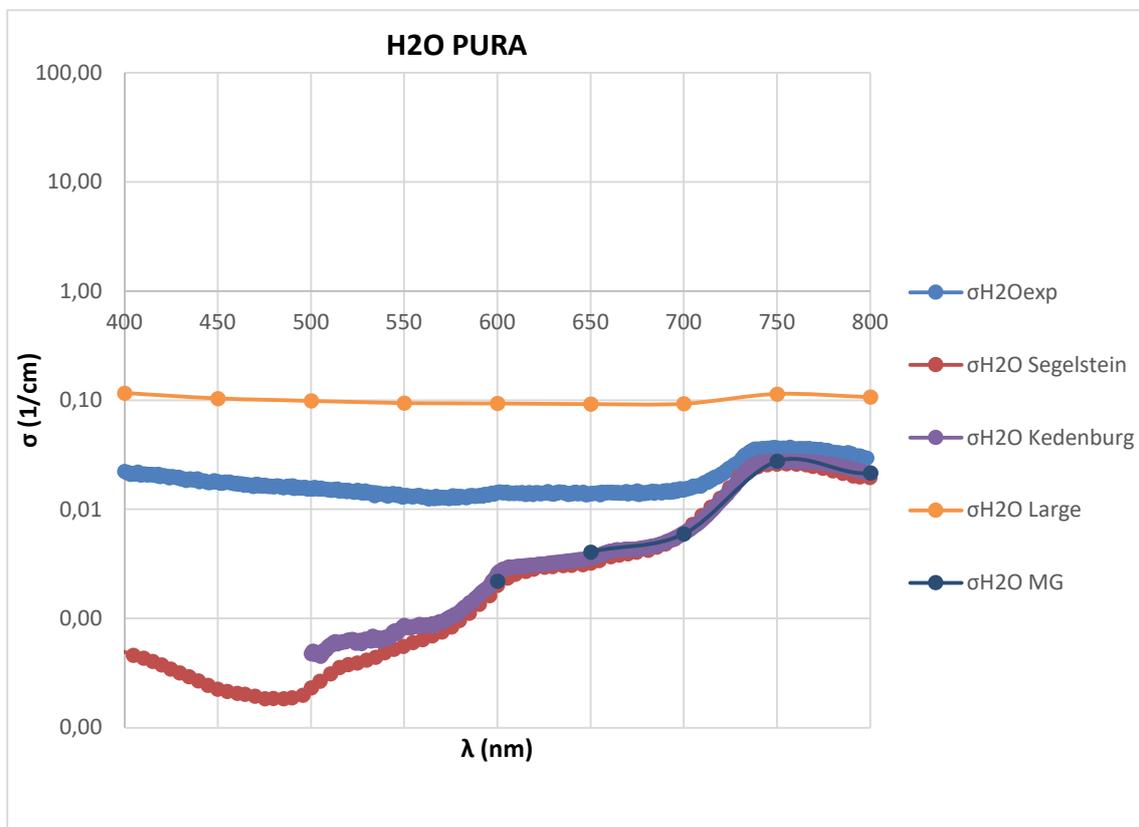


Figura 23. Representación del coeficiente de extinción H2O entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica

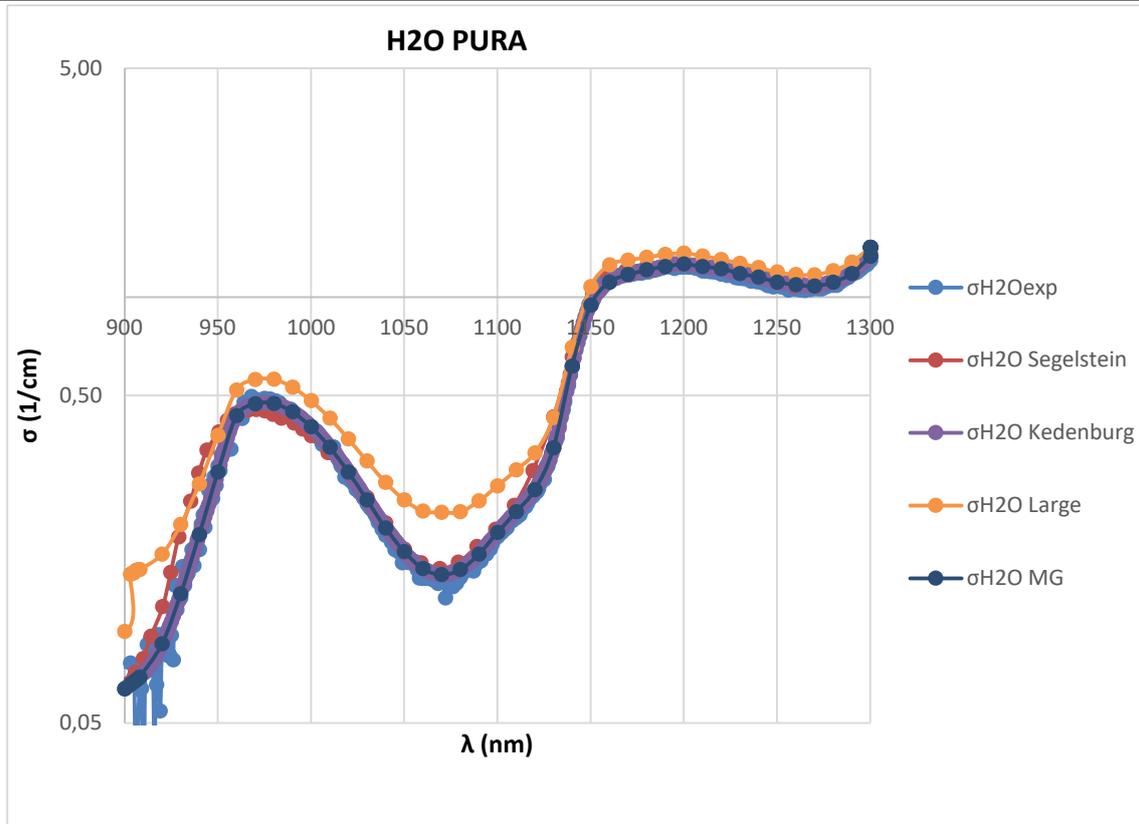


Figura 24. Representación del coeficiente de extinción H2O entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

Observando las figuras 22, 23, y 24, se aprecia que entre las longitudes de onda 400 a 800nm la diferencia entre resultados teóricos y experimentales es mayor, pero el valor del coeficiente de extinción tiende a 0 en este rango, así que no debe ser determinante en el modelo global del nanofluido.

## 6.2 Coeficiente de extinción del nanofluido según tamaño de partícula

### 6.2.1 Nanofluido de 5nm

De la aplicación de los cálculos descritos en el punto 5.2 se derivan los siguientes resultados.

En la figura 25, se representa la evolución del coeficiente de extinción (1/cm) del nanofluido formado por agua pura como fluido base y nanopartículas de oro de tamaño 6.08nm (5nm dato del fabricante) en una concentración de 59.6 mg/L con la longitud de onda en el rango de 400nm a 1300nm. Se compara el coeficiente de extinción hallado experimentalmente con los que se derivan de modelos teóricos:

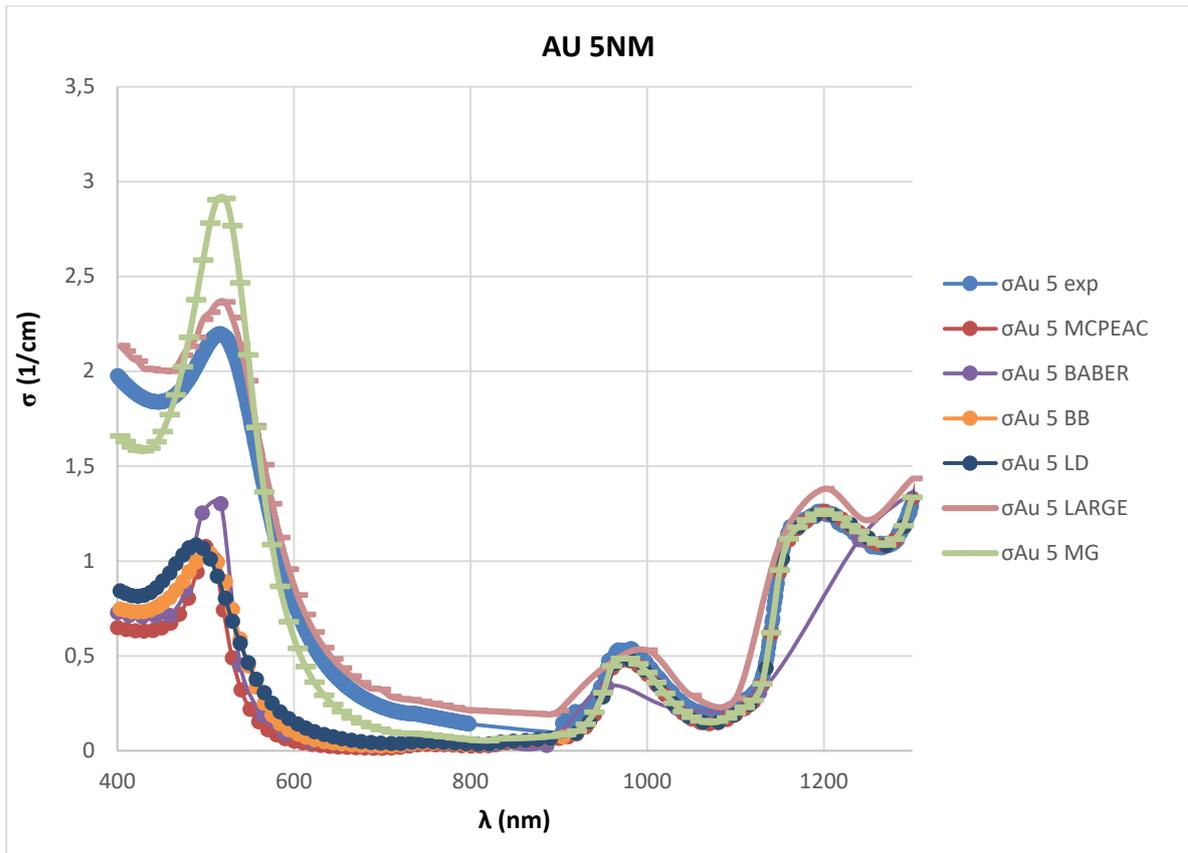


Figura 25. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 5nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm

Las figuras 26 y 27 son dos ampliaciones de la figura 25. En la figura 26 ampliamos la gráfica entre las longitudes de onda 400nm a 800nm y la figura 27 entre 900nm y 1300nm.

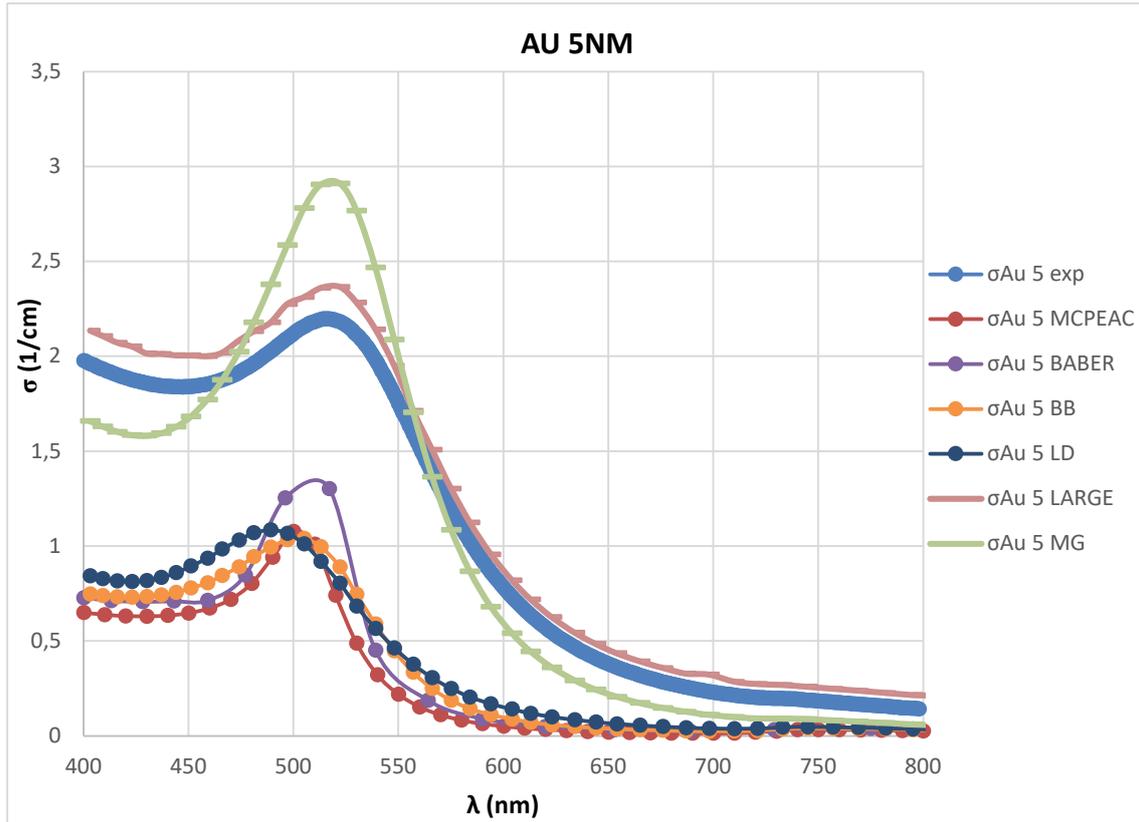


Figura 26. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 5nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm

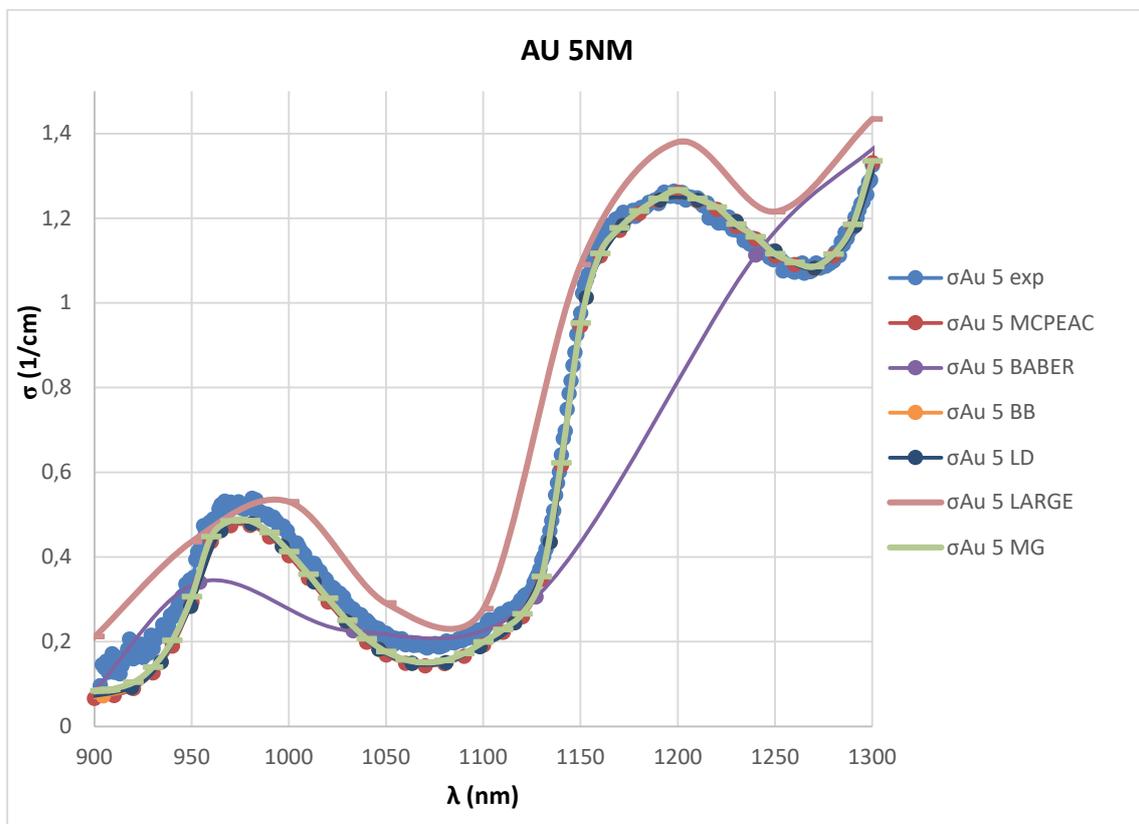


Figura 27. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 5nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm

Representamos los mismos resultados con el eje de ordenadas en escala logarítmica en las figuras 28, 29 y 30:

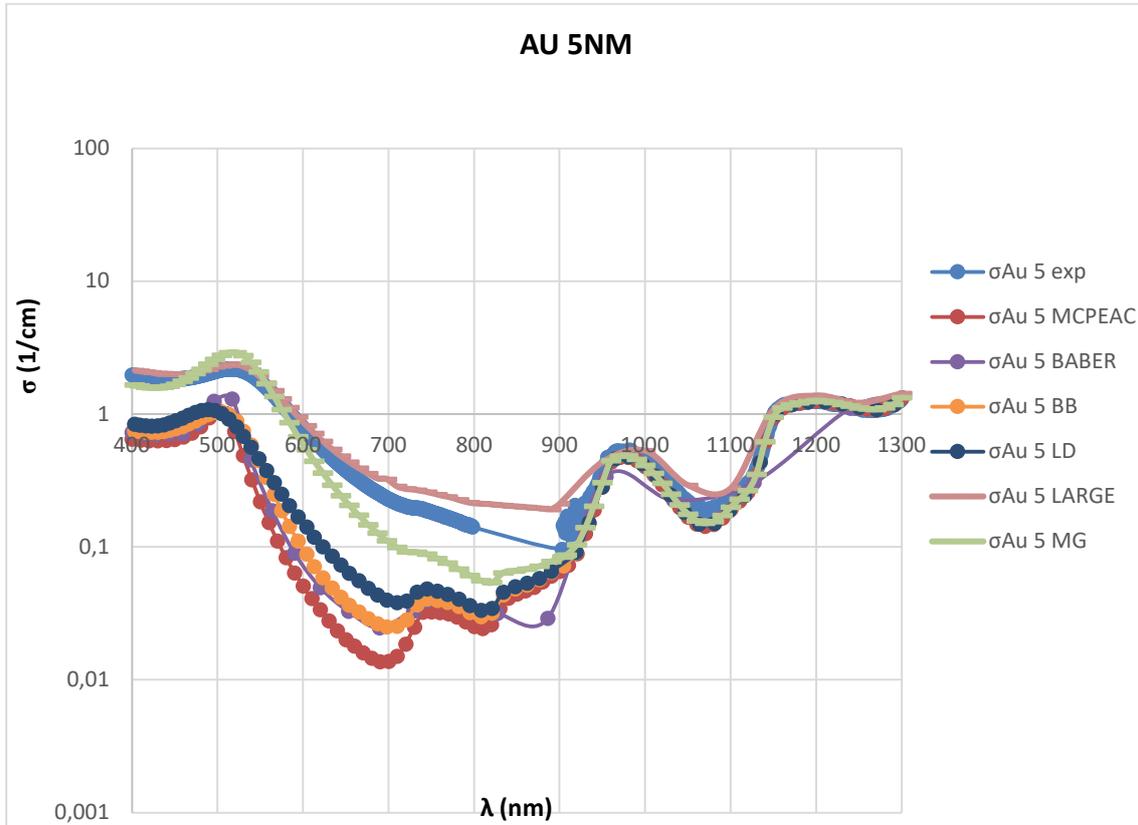


Figura 28. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 5nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

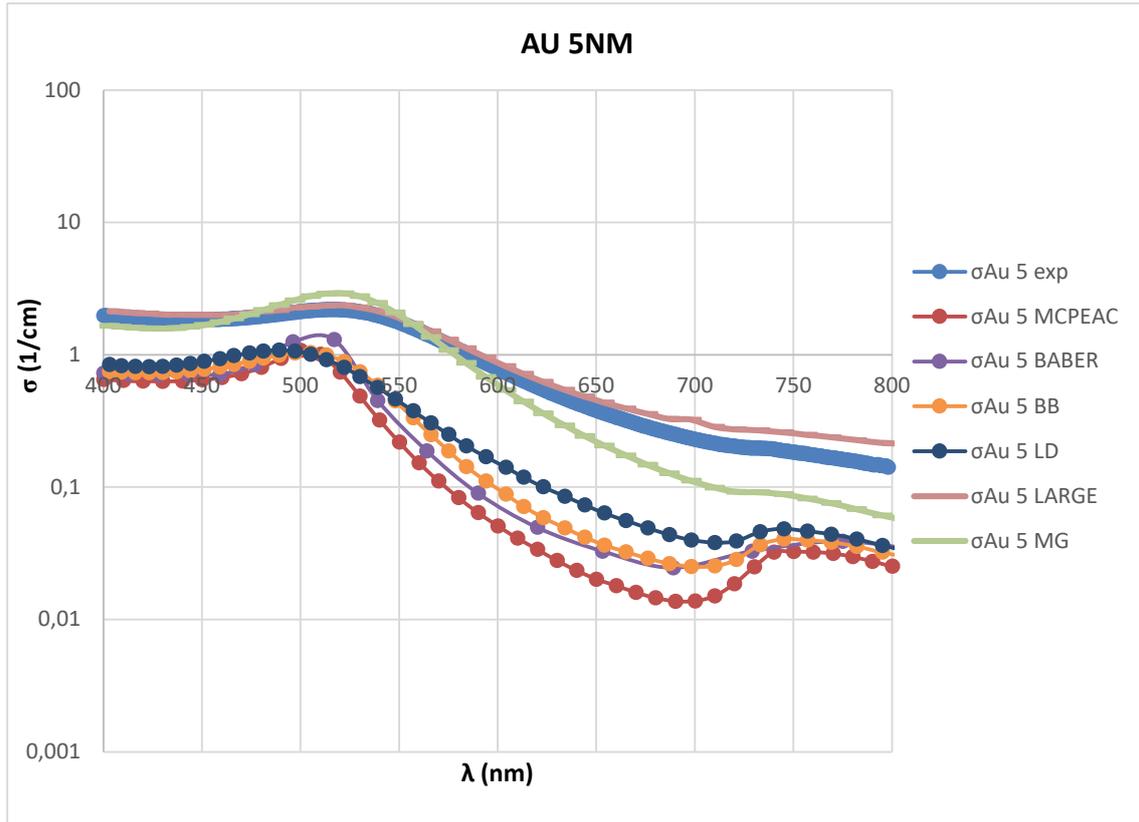


Figura 29. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 5nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica

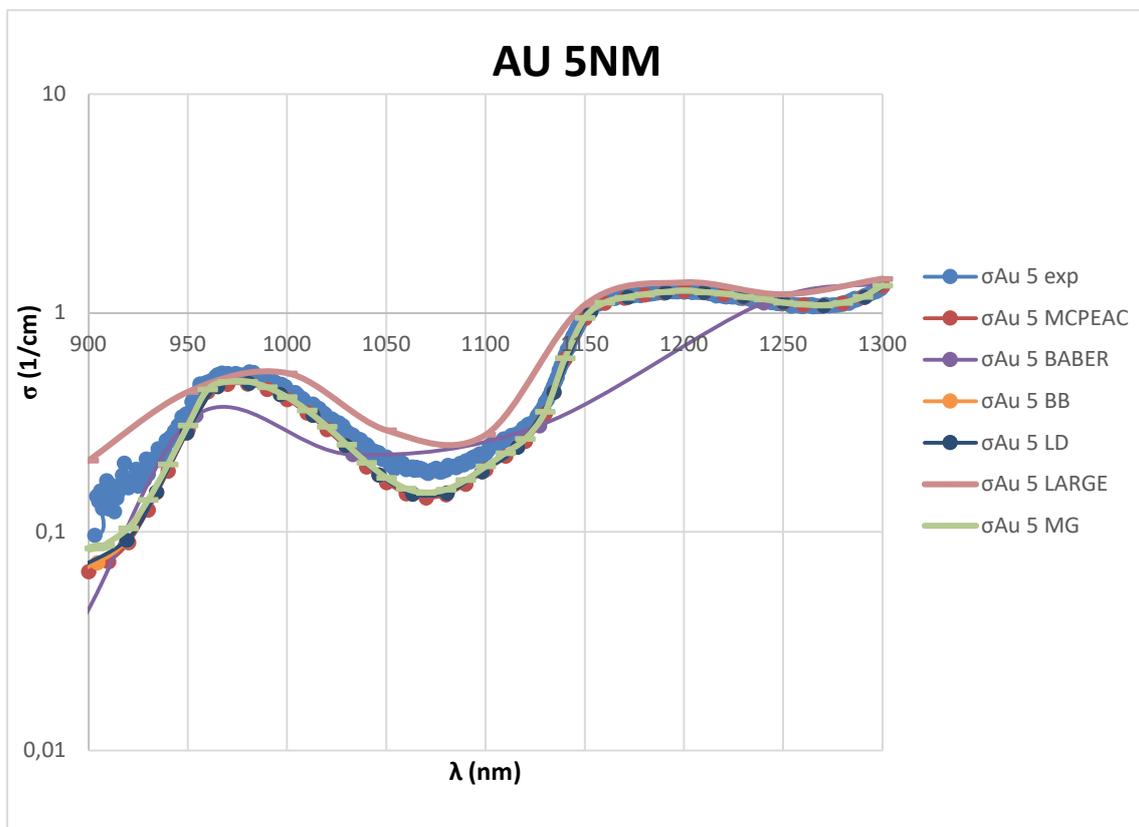


Figura 30. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 5nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

### 6.2.2 Nanofluido de 20nm

De la aplicación de los cálculos descritos en el punto 5.2 se derivan los siguientes resultados.

En la figura 31, se representa la evolución del coeficiente de extinción (1/cm) del nanofluido formado por agua pura como fluido base y nanopartículas de oro de tamaño de tamaño 15.57nm (20nm dato del fabricante) en una concentración de 41.6 mg/L con la longitud de onda en el rango de 400nm a 1300nm. Se compara el coeficiente de extinción hallado experimentalmente con los que se derivan de modelos teóricos:

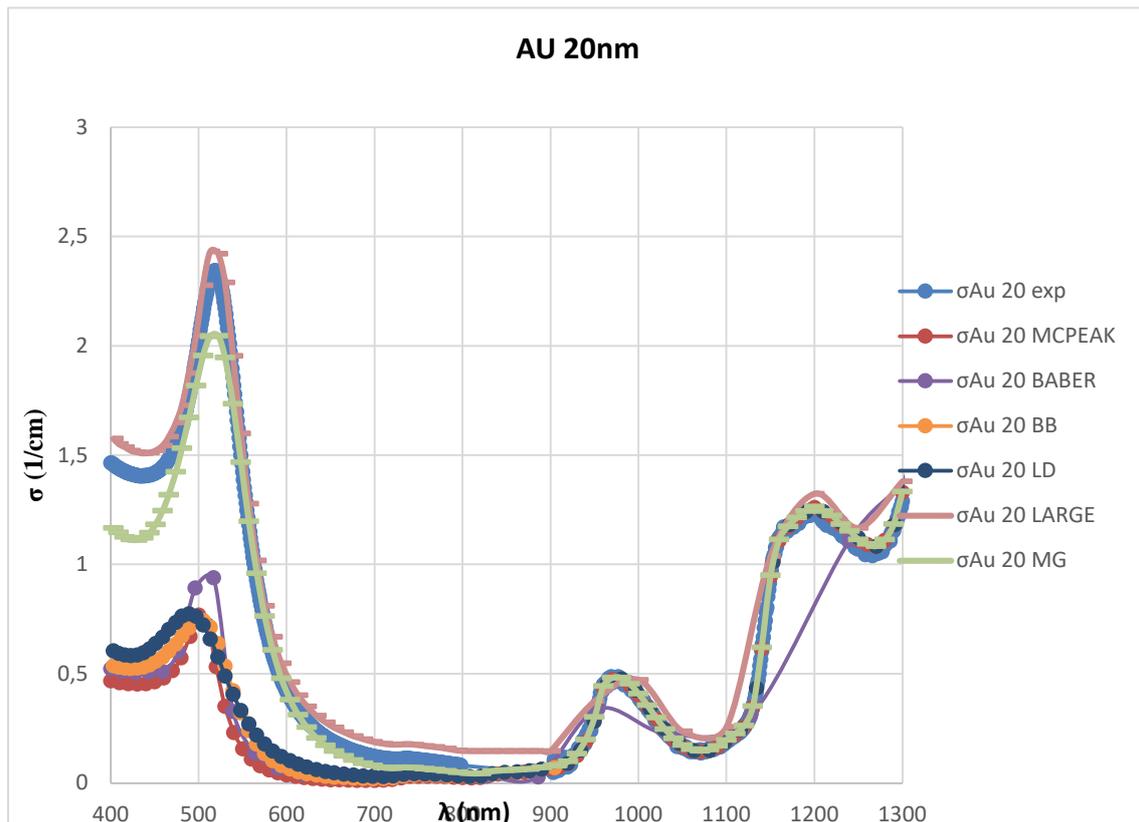


Figura 31. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 20nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm

Las figuras 32 y 33 son dos ampliaciones de la figura 31. En la figura 32 ampliamos la gráfica entre las longitudes de onda 400nm a 800nm y la figura 33 entre 900nm y 1300nm.

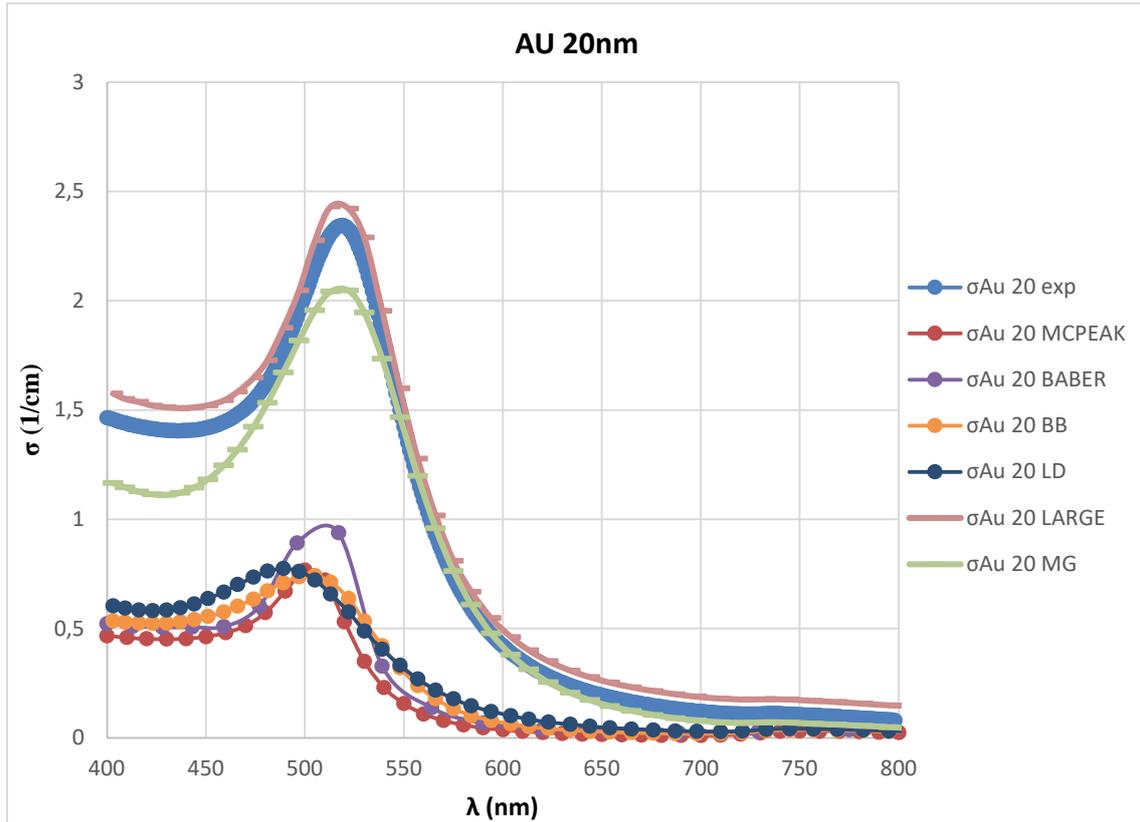


Figura 32. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 20nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm

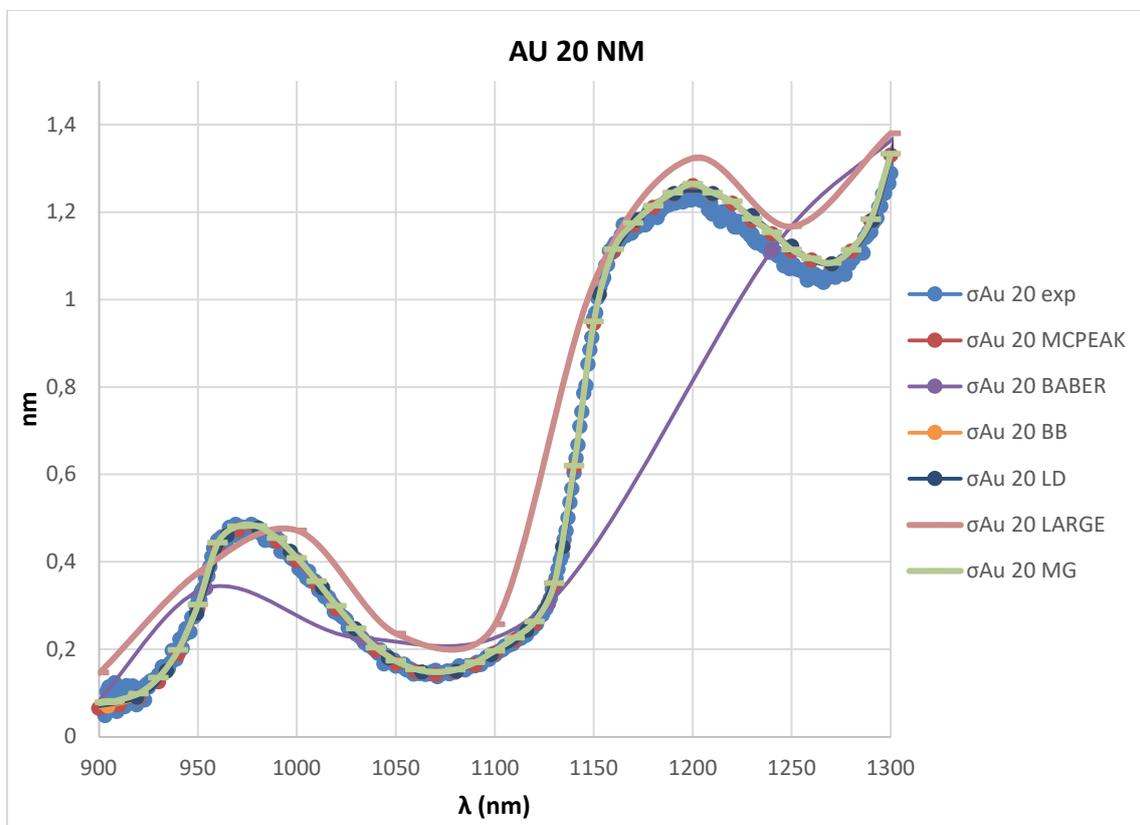


Figura 33. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 20nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm

Representamos los mismos resultados con el eje de coordenadas en escala logarítmica en las figuras 34, 35 y 36:

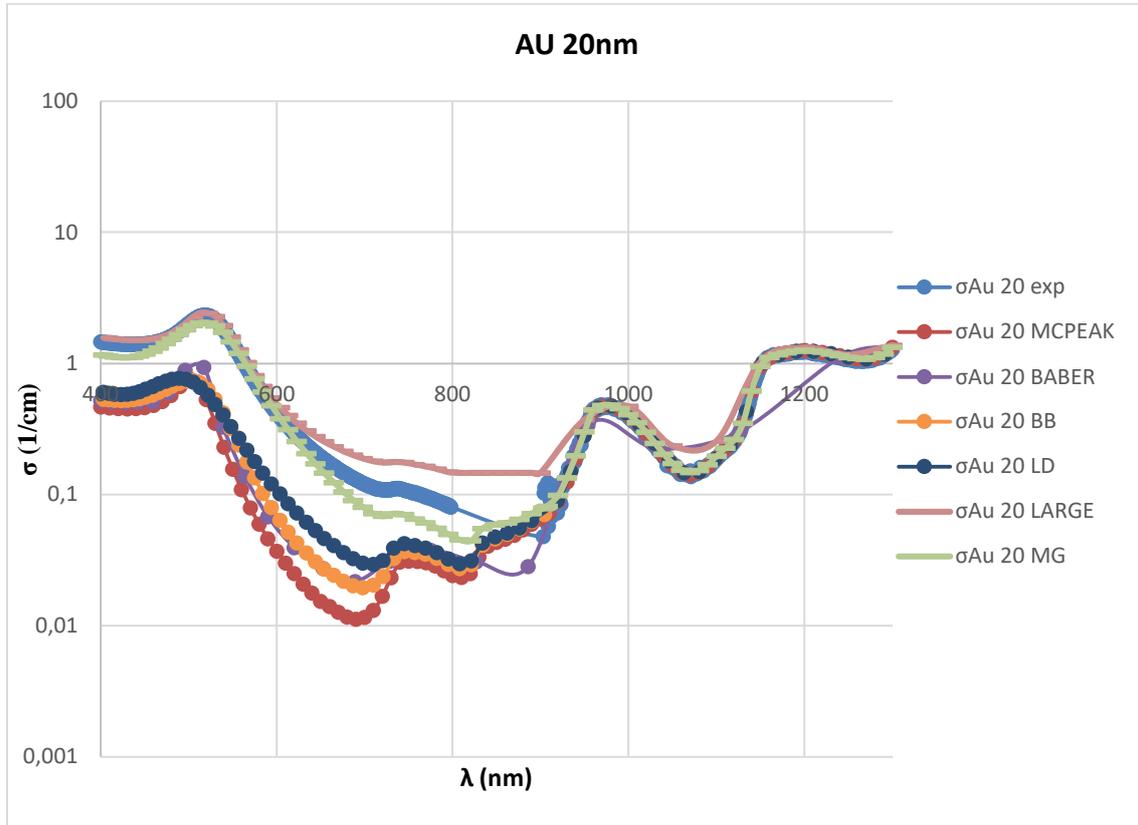


Figura 34. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 20nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

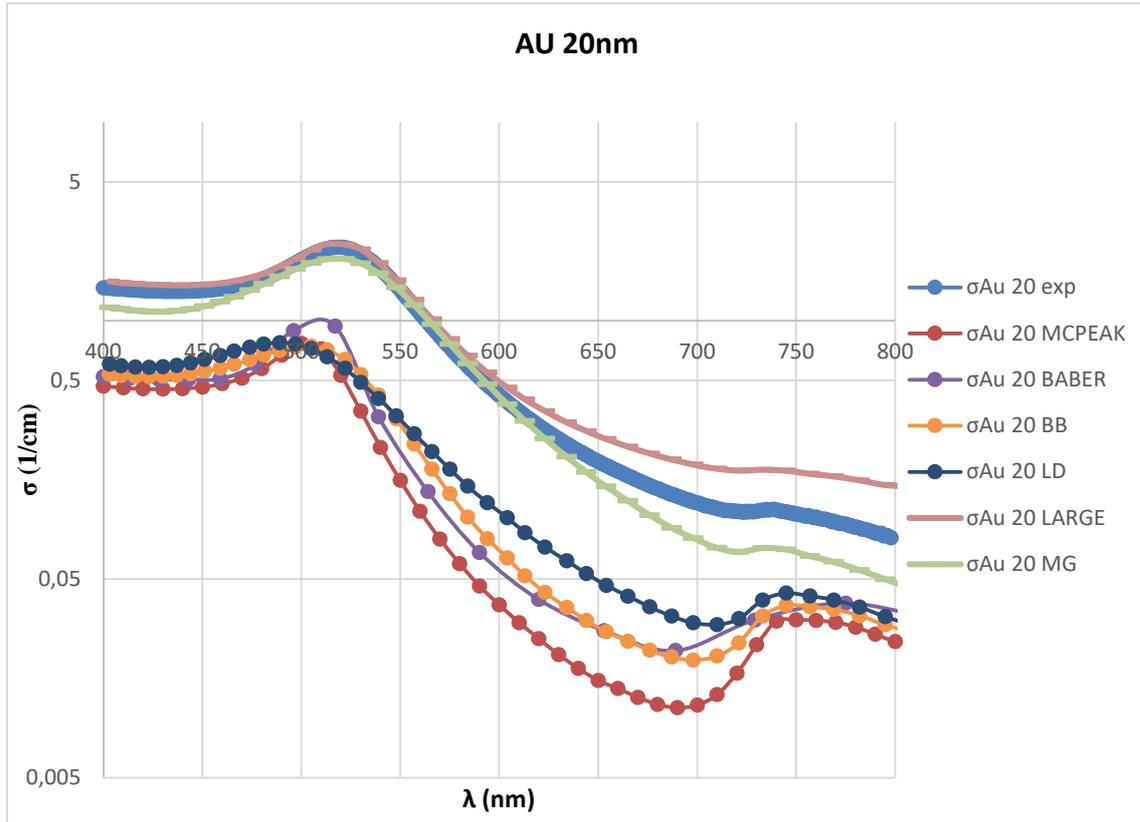


Figura 35. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 20nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica

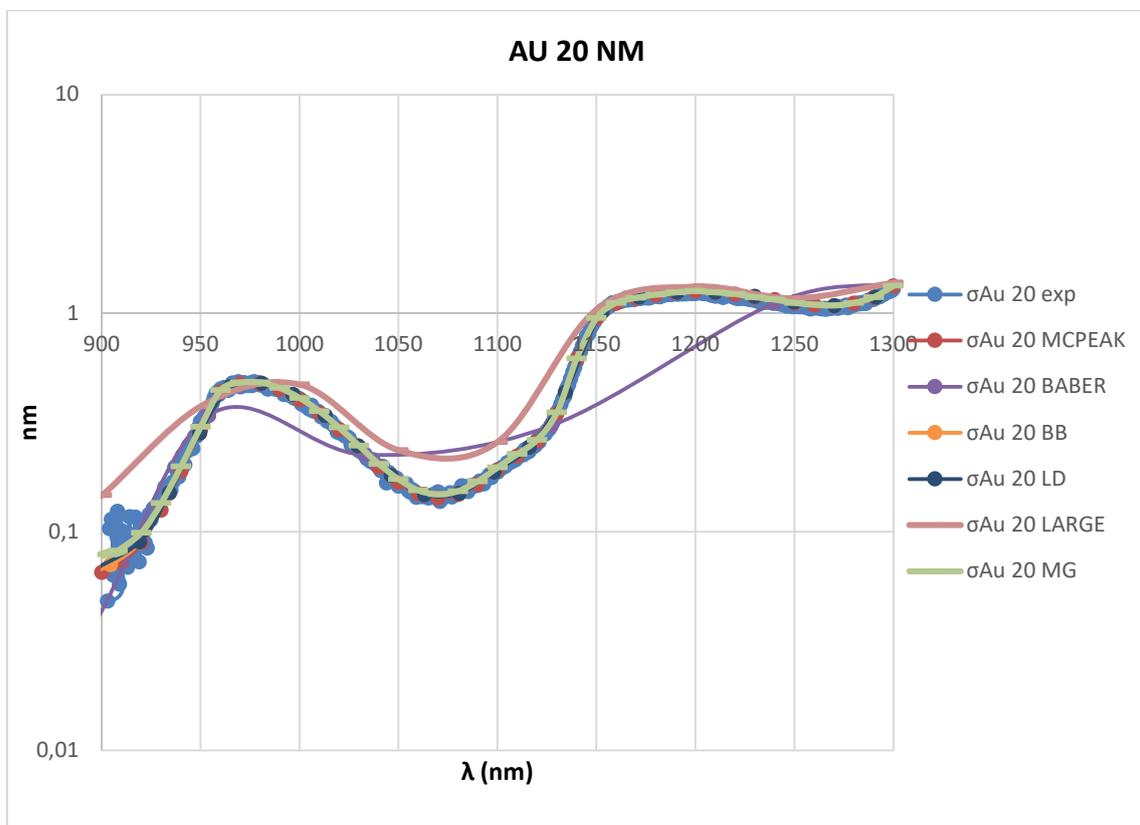


Figura 36. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 20nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

### 6.2.3 Nanofluido de 50nm

De la aplicación de los cálculos descritos en el punto 5.2 se derivan los siguientes resultados.

En la figura 37, se representa la evolución del coeficiente de extinción (1/cm) del nanofluido formado por agua pura como fluido base y nanopartículas de oro de tamaño de tamaño 37.13nm (50nm dato del fabricante) en una concentración de 23.9 mg/L con la longitud de onda en el rango de 400nm a 1300nm. Se compara el coeficiente de extinción hallado experimentalmente con los que se derivan de modelos teóricos:

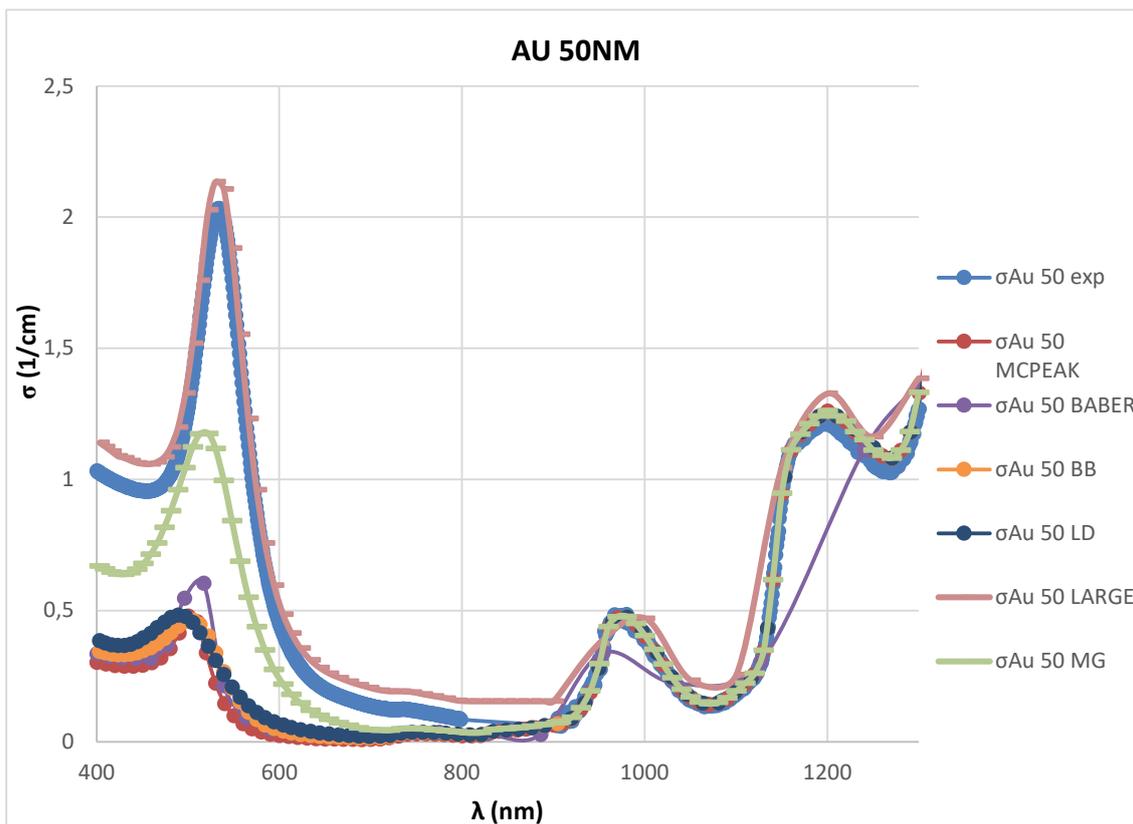


Figura 37. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 50nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm

Las figuras 38 y 39 son dos ampliaciones de la figura 37. En la figura 38 ampliamos la gráfica entre las longitudes de onda 400nm a 800nm y la figura 39 entre 900nm y 1300nm.

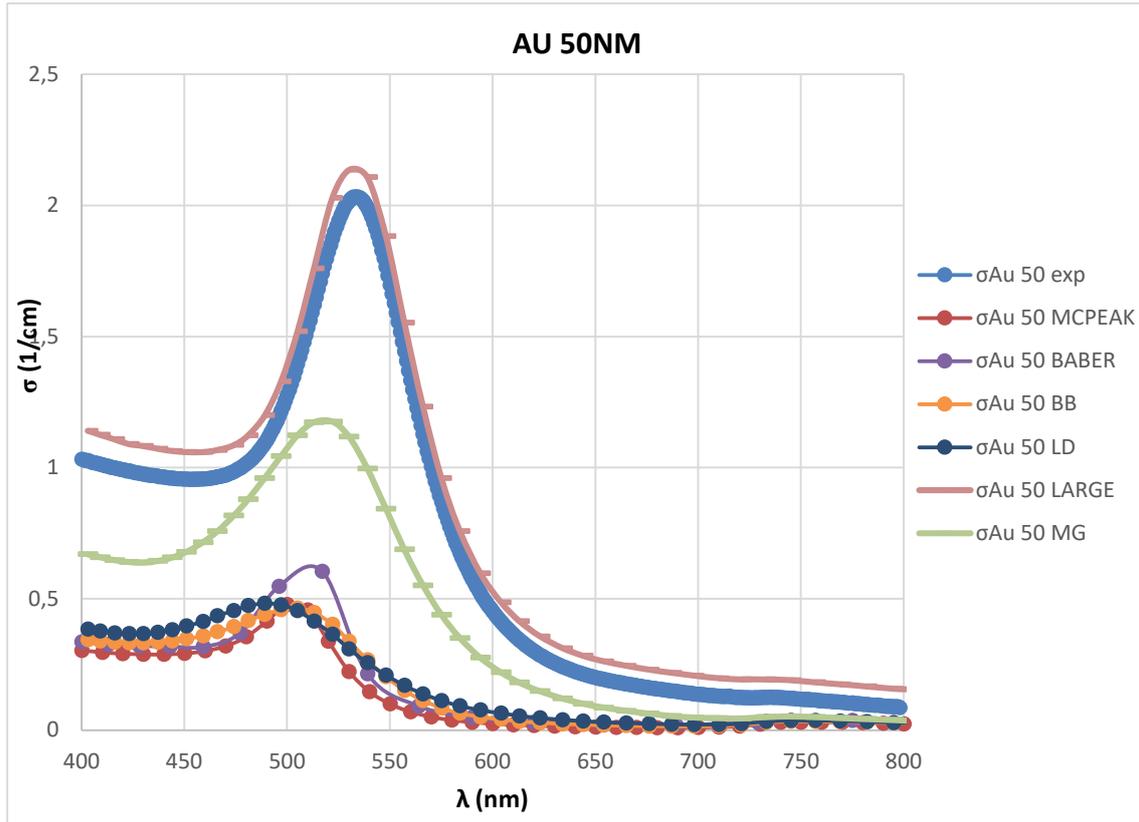


Figura 38. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 50nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm

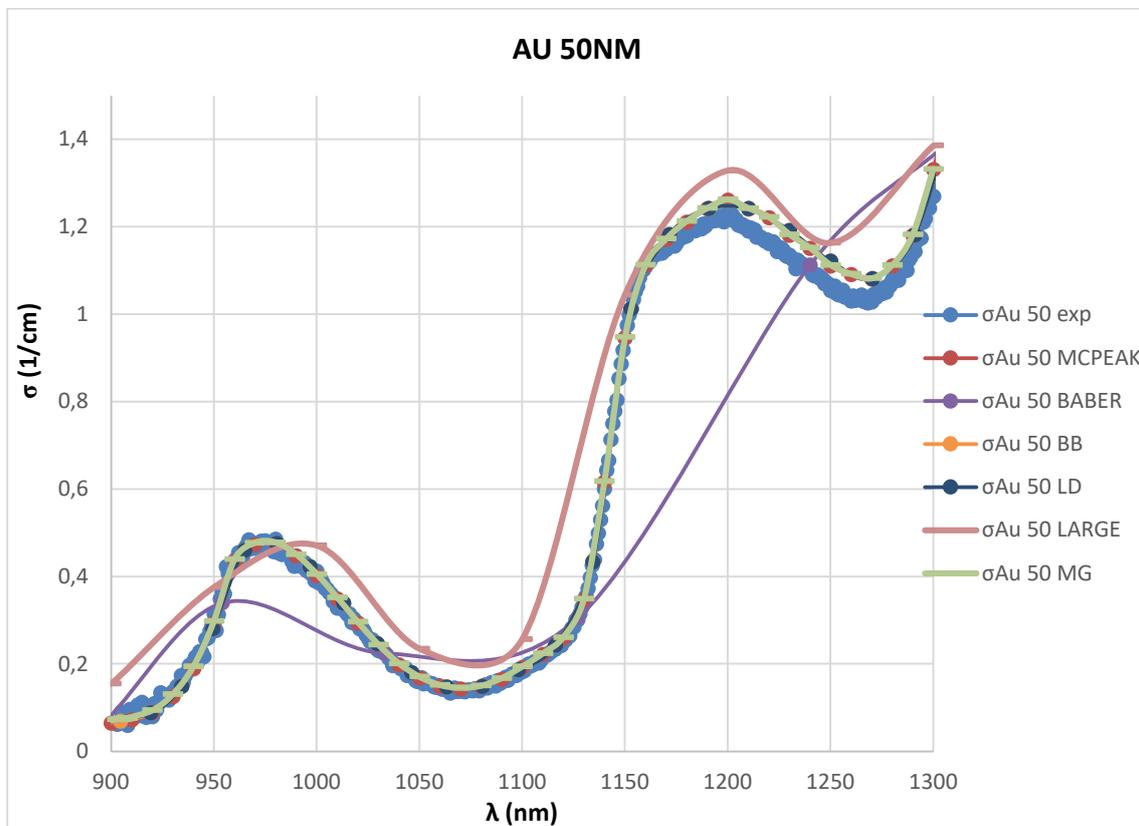


Figura 39. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 50nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm

Representamos los mismos resultados con el eje de coordenadas en escala logarítmica en las figuras 40, 41 y 42:

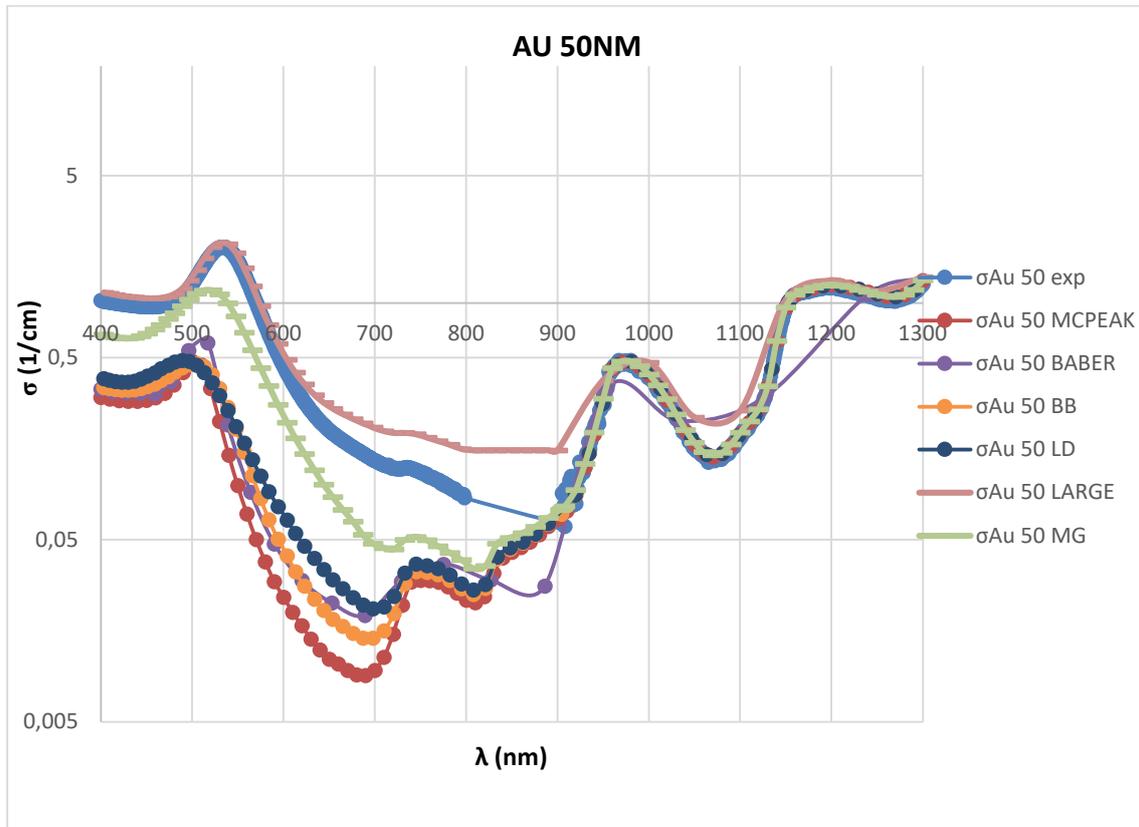


Figura 40. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 50nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

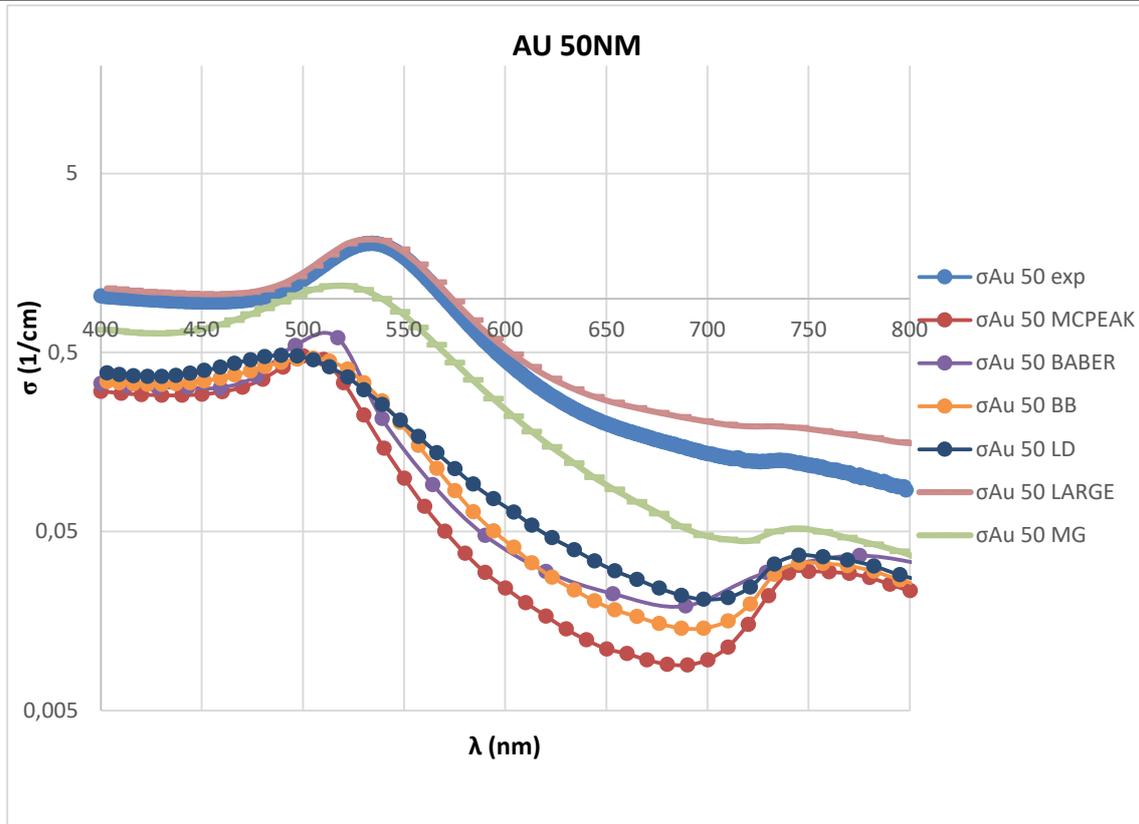


Figura 41. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 50nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica

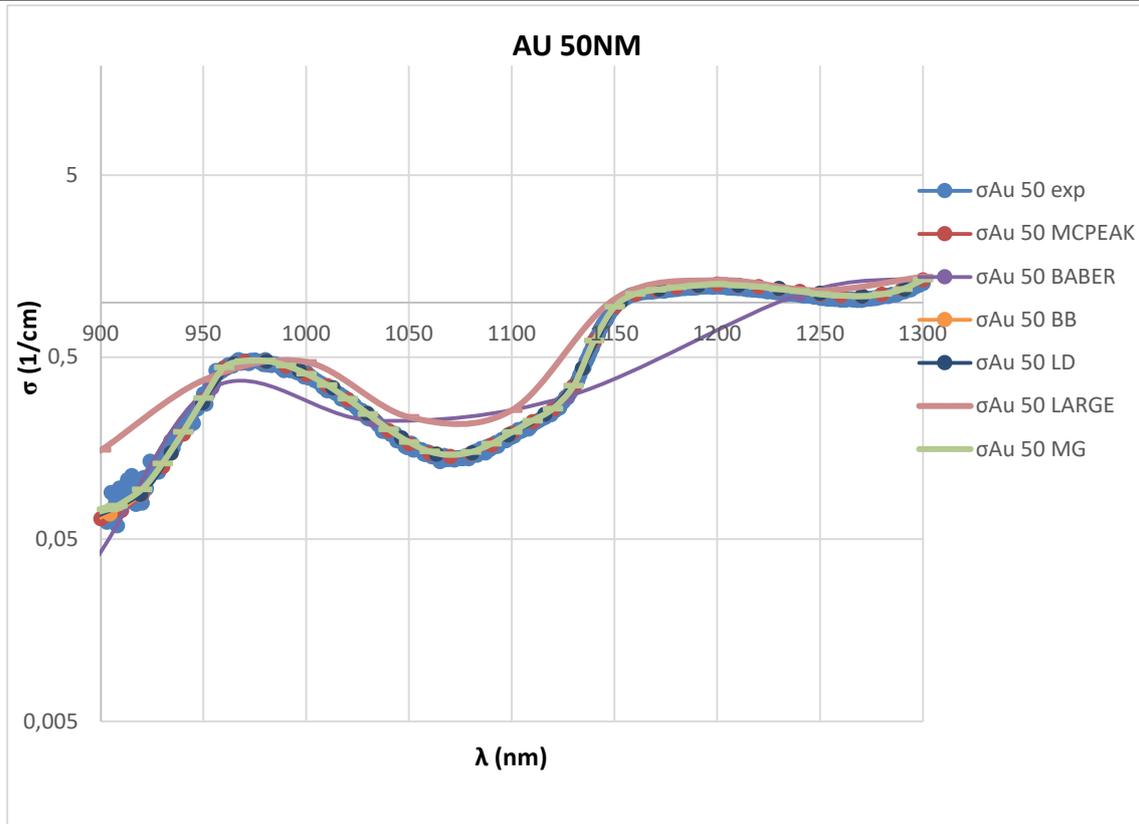


Figura 42. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 50nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

#### 6.2.4 Nanofluido de 60nm

De la aplicación de los cálculos descritos en el punto 5.2 se derivan los siguientes resultados.

En la figura 43, se representa la evolución del coeficiente de extinción (1/cm) del nanofluido formado por agua pura como fluido base y nanopartículas de oro de tamaño de tamaño 45.17nm (60nm dato del fabricante) en una concentración de 5.91 mg/L con la longitud de onda en el rango de 400nm a 1300nm. Se compara el coeficiente de extinción hallado experimentalmente con los que se derivan de modelos teóricos:

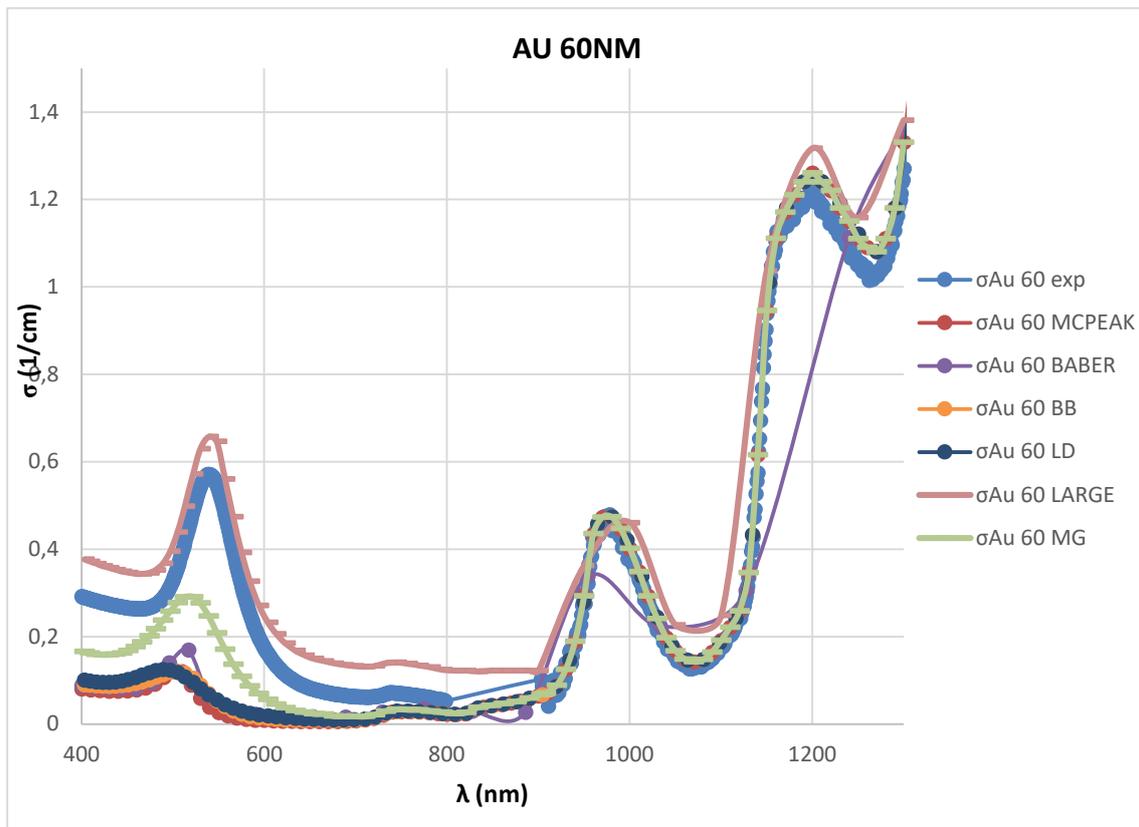


Figura 43. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 60nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm

Las figuras 44 y 45 son dos ampliaciones de la figura 43. En la figura 44 ampliamos la gráfica entre las longitudes de onda 400nm a 800nm y la figura 45 entre 900nm y 1300nm.

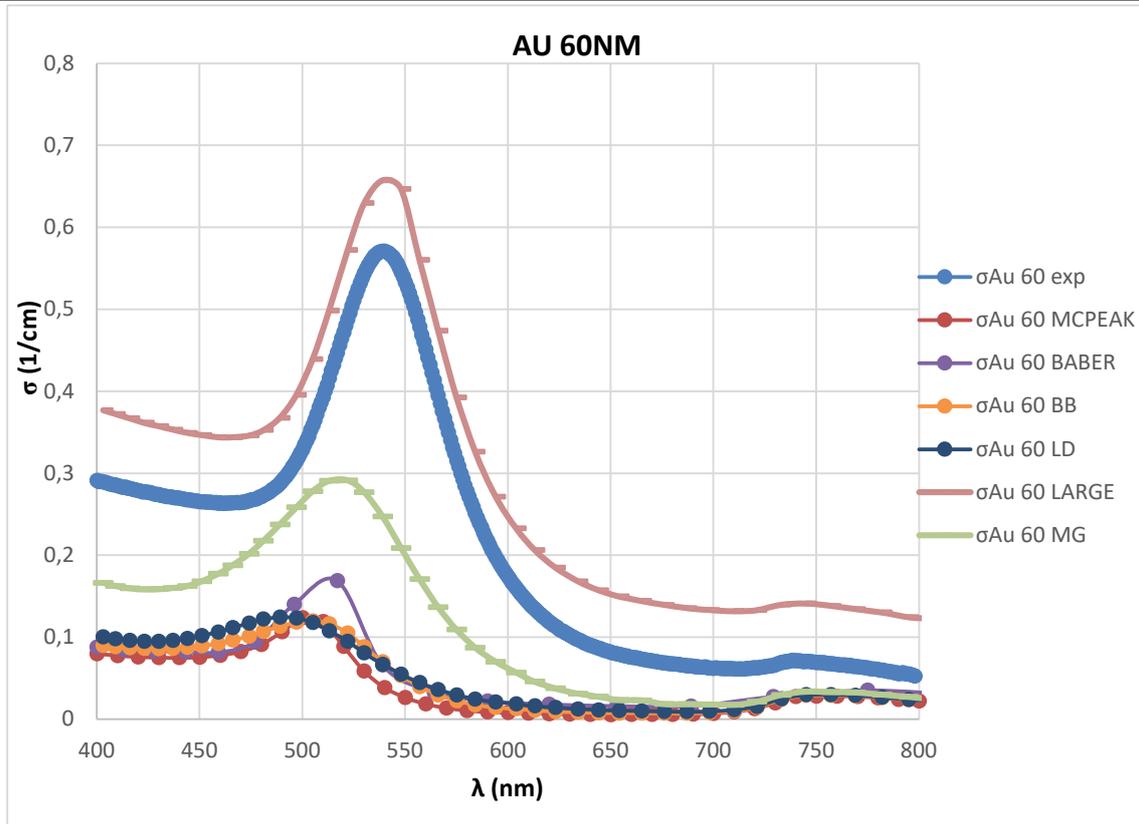


Figura 44. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 60nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm

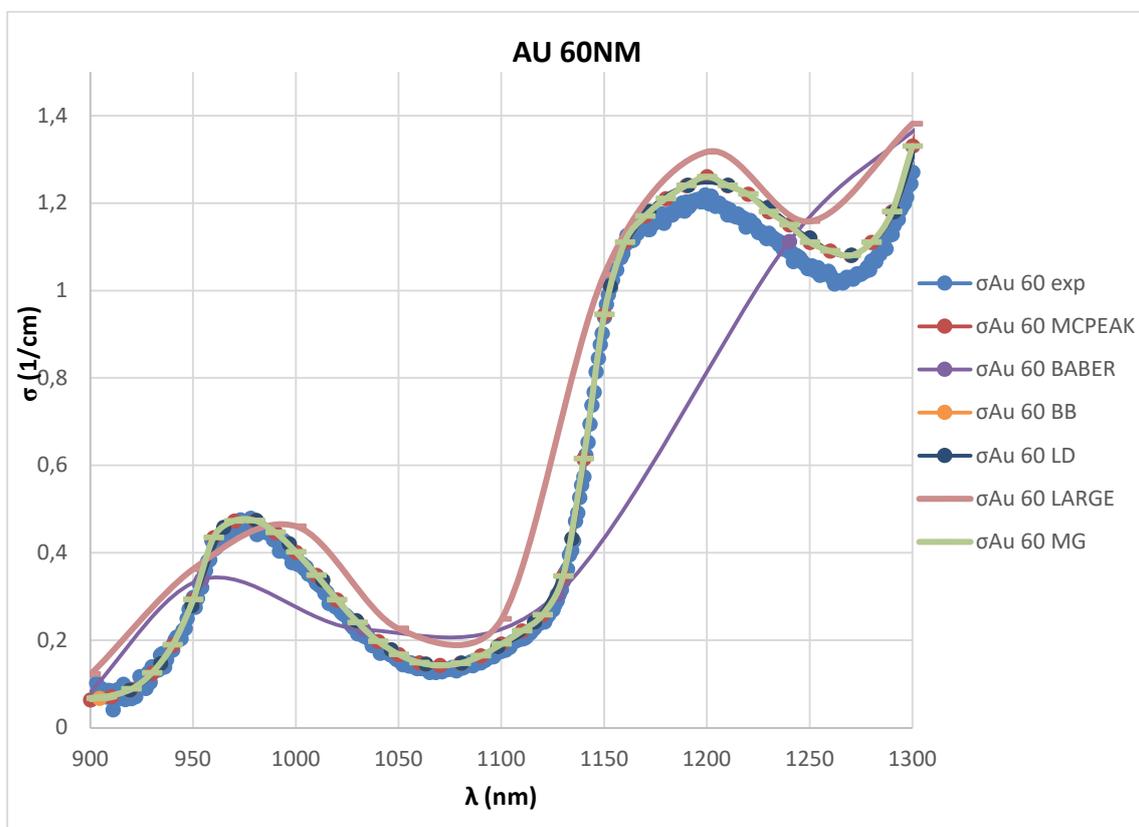


Figura 45. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 60nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm

Representamos los mismos resultados con el eje de coordenadas en escala logarítmica en las figuras 46, 47 y 48:

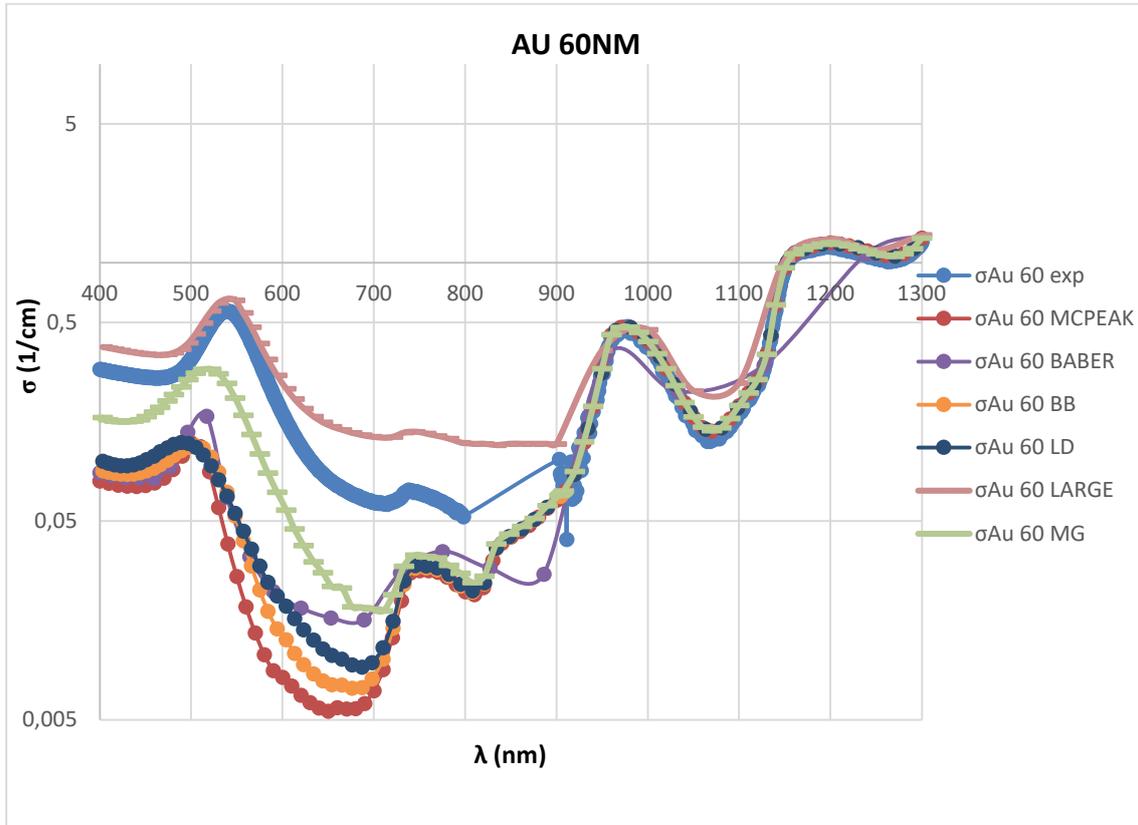


Figura 46. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 60nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

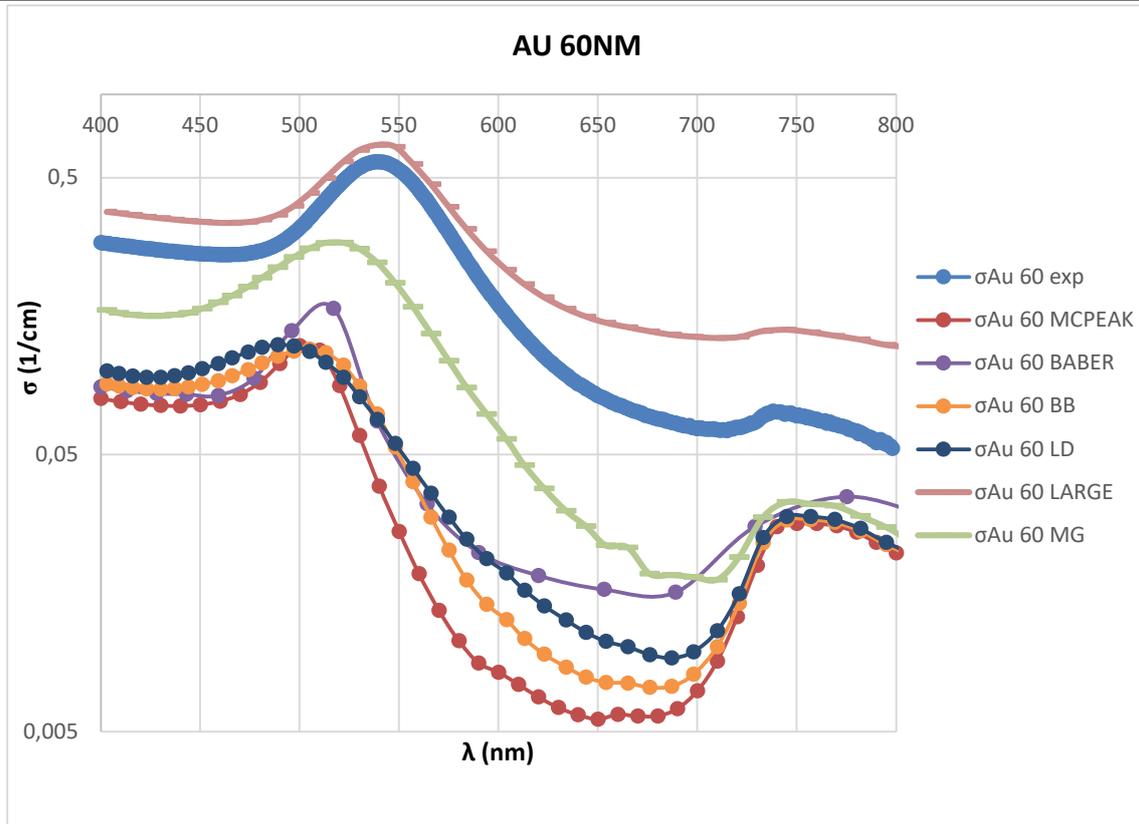


Figura 47. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 60nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica

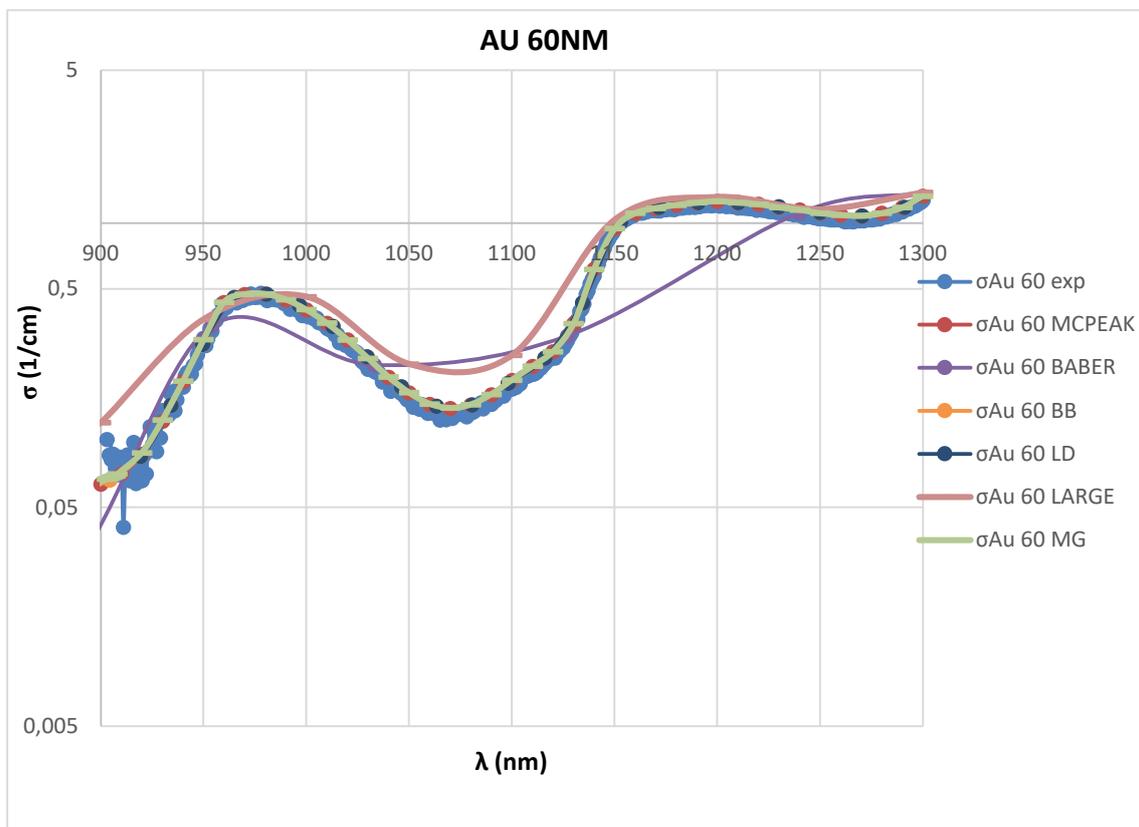


Figura 48. Representación del coeficiente de extinción H<sub>2</sub>O+Au 60nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica

### 6.3 Coeficiente de extinción de los nanofluidos según el modelo teórico

#### 6.3.1 Medidas experimentales

Mostramos, a continuación, en la figura 49 los resultados experimentales para las distintas muestras.

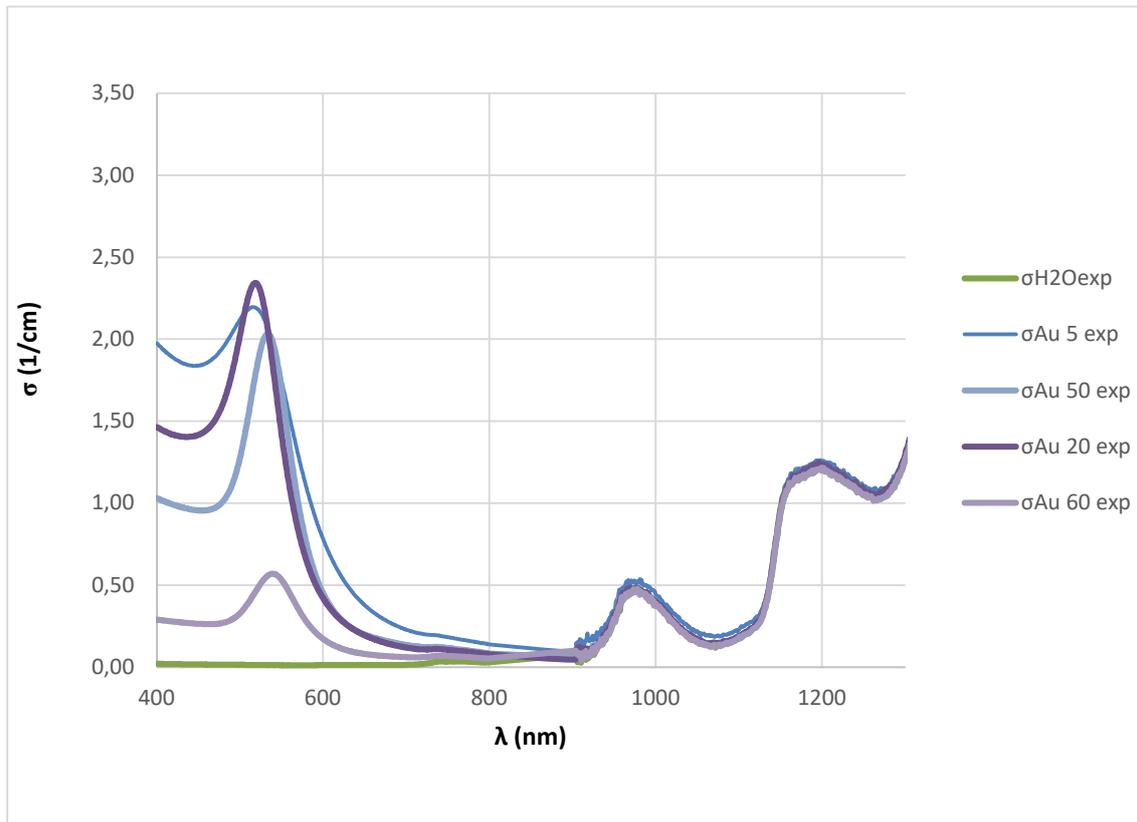


Figura 49. Coeficiente de extinción experimental entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm

#### 6.3.2 Aproximación de Large:

Mostramos, a continuación, la gráfica, figura 50, comparando los resultados para las distintas muestras con el modelo teórico realizado usando la aproximación de Large.

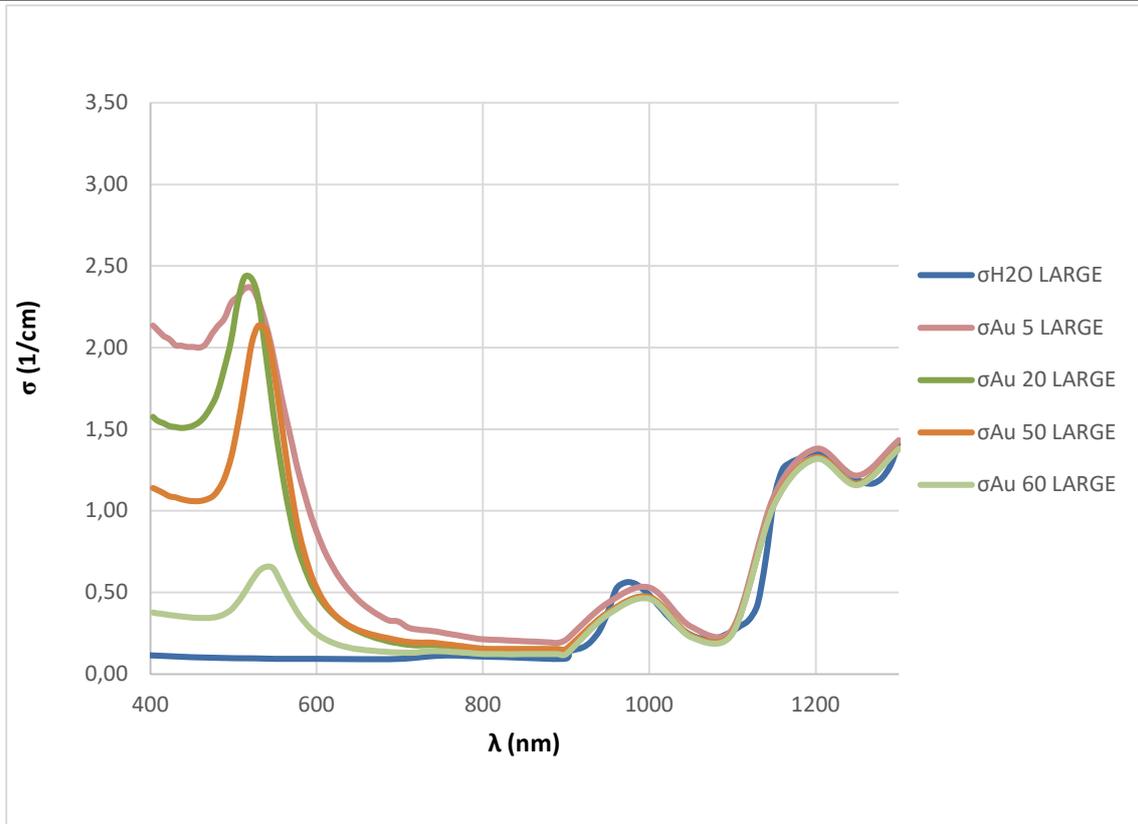


Figura 50. Coeficiente de extinción modelado mediante la aproximación de Large entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm

### 6.3.3 Teoría de Maxwell- Garnett

Mostramos, a continuación, la figura 51, comparando los resultados para las distintas muestras con el modelo teórico realizado usando la Teoría de Maxwell- Garnett.

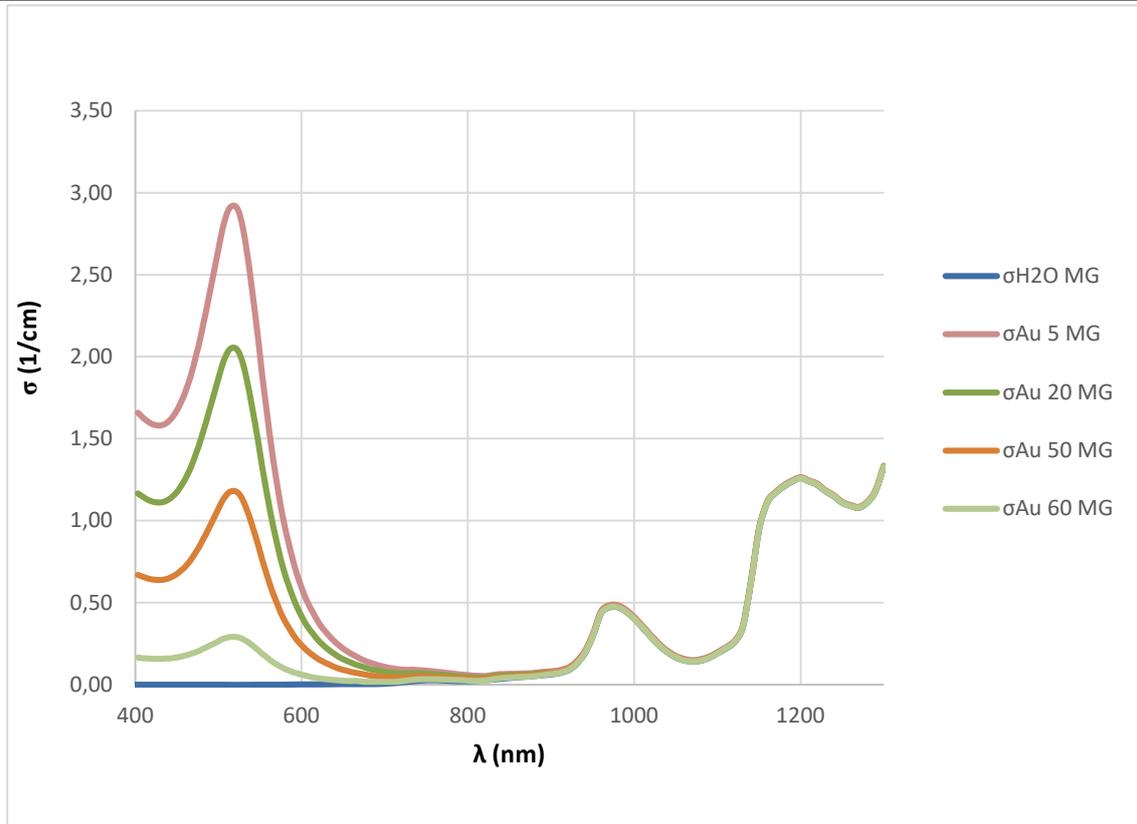


Figura 51. Coeficiente de extinción modelado mediante la Teoría de Maxwell- Garnett entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm

#### 6.3.4 Teoría de Scattering de Mie

Mostramos, a continuación, la figura 52, los resultados para las distintas muestras con el modelo teórico realizado usando la Teoría de Scattering de Mie. Se usa el modelado que usa la serie de datos de MCPEAK. Los resultados de este modelo no son buenos por lo que solo se graficará este modelo como representación de todos.

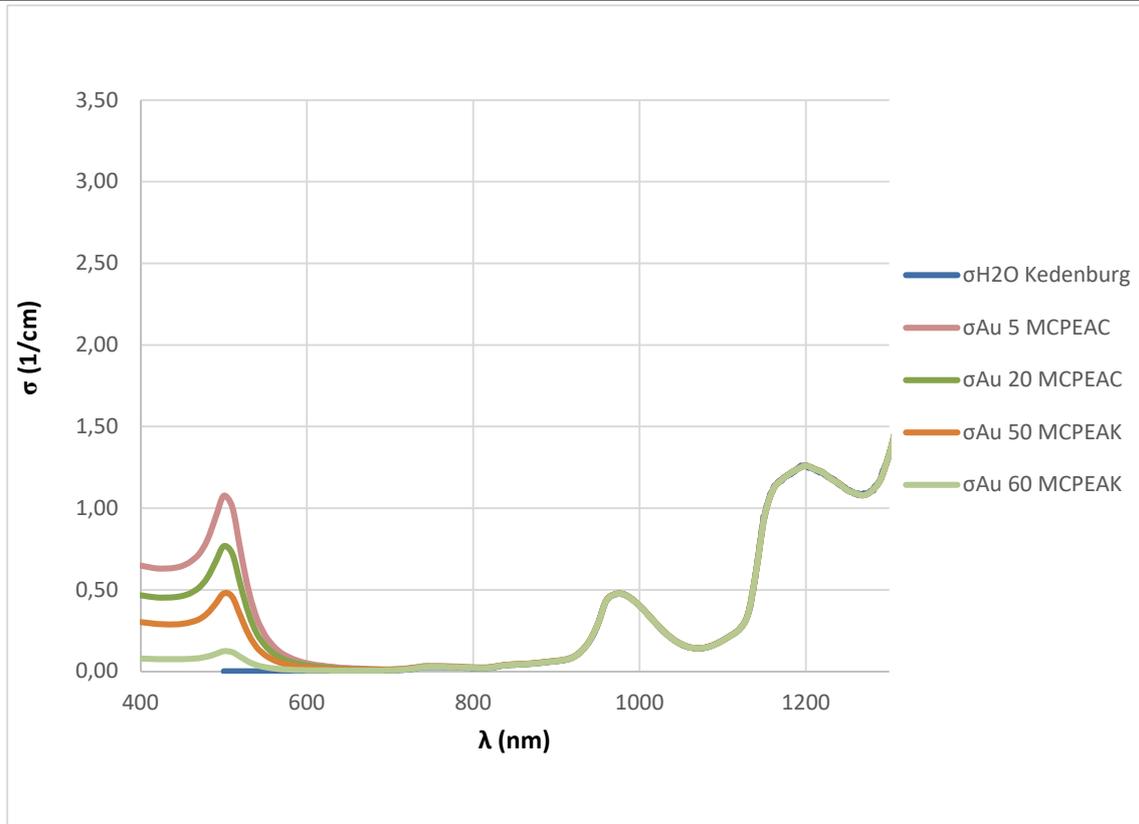


Figura 52. Coeficiente de extinción modelado mediante Teoría de Scattering de Mie entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm

## 7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS COEFICIENTES DE EXTINCIÓN

### 7.1 Coeficientes de extinción experimentales

Analizamos, a través de la figura 49, como evoluciona del coeficiente de extinción con la longitud de onda para las distintas muestras estudiadas en este TFM. La absorción del agua pura es despreciable desde las longitudes de onda comprendidas entre 400nm y 900nm. A partir de este momento empieza a crecer encontrándose un pico de 0.5 (1/cm) en longitudes de onda cercanas a los 975nm, a partir de ese momento se desarrolla una evolución con línea de tendencia ascendente a lo largo de la cual se van dando máximos y mínimos. En 1075nm el valor del coeficiente de extinción es de 0.15 (1/cm) en 1200 tiene un valor de 1.25 (1/cm).

Al añadir las nanopartículas al fluido base, el resultado no varía entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm. Sin embargo, el comportamiento cambia radicalmente, entre las longitudes de onda comprendidas entre 400nm y 700nm. El comportamiento general para todas las muestras es un incremento del coeficiente de extinción para 400nm que varía entre 0.25 y 2 (1/cm) dependiendo de la muestra. A medida que aumenta la longitud de onda disminuye ligeramente el coeficiente de extinción empezando a incrementarse de nuevo en 475nm hasta alcanzar un máximo a una longitud de onda comprendida entre 510 y 530nm. A medida que aumenta el tamaño de partícula el máximo se desplaza hacia mayores longitudes de onda.

Los valores de este máximo también varían con las distintas muestras. Este comportamiento unido a la concentración de nanopartículas en el fluido base y a su tamaño. En general, a medida que disminuye la concentración disminuye en valor del coeficiente de extinción del máximo excepto para la muestra de tamaño de nanopartícula 20nm, que siendo la concentración de la muestra ligeramente inferior a la muestra de nanopartículas de 5nm el máximo es ligeramente superior.

Aun así, viendo el área bajo la curva del coeficiente de extinción, ésta va disminuyendo con la concentración de nanopartículas en el fluido base.

A partir del máximo, el coeficiente de extinción disminuye rápidamente hasta valores cercanos a 0.5 (1/cm) a 600nm. A partir de ahí el coeficiente de extinción va disminuyendo suavemente.

### 7.2 Coeficiente de extinción según modelos

#### 7.2.1 Coeficiente de extinción modelado del agua pura

A través de las distintas figuras comprendidas entre la 19 y la 24 podemos ver como los modelos teóricos siguen la misma evolución del coeficiente de extinción entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm. El modelo que proviene de la aproximación de Large da unos resultados a lo largo de todo el espectro estudiado ligeramente superior a los experimentales. La discrepancia es en torno a 0.1 (1/cm).

El resto de modelos entre 400nm y 800nm discrepan en un valor cercano a 0.02 (1/cm), reduciéndose este valor a partir de 900nm. A partir de ese valor de longitud de onda y hasta 1300nm, los modelos, exceptuando el resultante de la aproximación de Large, reproducen fielmente los resultados experimentales.

### 7.2.2 *Coefficientes de extinción modelados según tamaño de nanopartícula*

A continuación, se analizan los resultados a través de las figuras de la 25 a la 52.

En general y para todos los modelos, se aprecia, como estaba previsto, que, en las longitudes de onda entre 400 y 700nm, el valor del coeficiente de extinción relevante es el aportado por las nanopartículas. El agua pura, en dicho rango de longitudes de onda tiene un valor del coeficiente de extinción cercano a 0.

A partir de 700nm es el coeficiente de extinción del agua pura el que comienza a llevar el peso del coeficiente de extinción total.

Nos centramos en primer lugar, en el análisis de los resultados de los distintos nanofluidos en el rango desde 400 a 700nm.

El modelo hallado mediante la aproximación de Large es el que más se aproxima a los datos experimentales. Para todos los nanofluidos estudiados el modelo sigue la misma evolución que los datos experimentales, obteniendo resultados ligeramente superiores a estos. En el rango de 400 a 500nm, para todos los nanofluidos, la discrepancia entre el resultado teórico y el experimental varía desde 0.18 a 0.09 (1/cm). En tanto por cien, la desviación según el tamaño de partícula es de: 8% para 5nm, 7.5% para 20nm, 10% para 50nm y 23% para 60nm. Esta discrepancia se va reduciendo a partir de 550nm a 0.03 (1/cm) hasta los 700nm.

El pico de absorción en el rango estudiado se desplaza hacia mayores longitudes de onda a medida que aumentamos el tamaño de partícula. El modelo representa de forma efectiva este desplazamiento.

El modelo hallado mediante la Teoría de Maxwell- Garnett también se aproxima a los datos experimentales en el rango de longitudes de onda entre 400 a 700nm para la muestra con tamaño de partícula 5nm. Para esta muestra, entre las longitudes de onda 400 a 475nm, los resultados teóricos son inferiores a los experimentales con una discrepancia de unos 0.3 (1/cm). A partir de la longitud de onda 475nm hasta la longitud de onda 575nm, los resultados modelados son superiores hasta alcanzar la máxima discrepancia en el pico de absorción, Esta discrepancia alcanza los 0.7 (1/cm). A partir de este momento el desvío se mantienen casi constante con un valor medio de 0.1 (1/cm) hasta los 700nm.

Para la muestra con tamaño de nanopartícula de 20nm, el modelo entre 400 y 450nm las discrepancias son similares a la anterior muestra, 0.3 (1/cm), pero a partir de esa longitud de onda el modelo se acerca a los resultados experimentales siguiendo una evolución muy similar. En el entorno del máximo del pico del coeficiente de dispersión, que se da alrededor de la longitud de onda 520nm, el resultado modelo se separa puntualmente del experimental. A partir de 540nm, el modelo describe perfectamente el comportamiento experimental.

Para las muestras de tamaños 50nm y 60nm, entre 400 y 475nm siguen una evolución parecida a las muestras anteriores. Sin embargo, a partir de 475nm los modelos se alejan de la curva experimental, con resultados inferiores a los experimentales de forma significativa.

En el modelo de Maxwell- Garnett, se observa la tendencia a distanciarse de los resultados experimentales a medida que se reducen las concentraciones de las nanopartículas en la muestra.

A su vez, este modelo, a medida que aumenta el tamaño de partícula (o disminuye la concentración), no sigue la evolución experimental del desplazamiento del pico de absorción a mayores longitudes de onda a medida que se aumenta el tamaño de partícula.

Los modelos desarrollados aplicando la Teoría de Scattering de Mie, cualquiera que sea la serie de datos usados, dan valores muy inferiores entre las longitudes de onda 400nm y 700nm.

Además, en estos modelos, el pico de máxima absorción no varía con el tamaño de partícula de la muestra, como si lo hacen los datos experimentales.

En la figura 54 se observa con mayor detalle que los modelos desarrollados aplicando la Teoría de Scattering de Mie dan valores muy inferiores entre las longitudes de onda 400nm y 700nm.

El resultado obtenido con los modelos hallados mediante la Teoría de Scattering de Mie que usan los valores tabulados del índice de refracción para el oro con la base de datos de BABER, se alejan de la curva experimental, no siendo representativos por la escasa densidad de datos.

Entre 700 y 800nm los valores del coeficiente de extinción son muy pequeños, la discrepancia entre modelos y los resultados experimentales, aunque pequeña, sigue la misma tendencia que en el rango de longitudes de onda entre 400 y 700nm.

Entre las longitudes de onda 800 y 900nm no existen resultados experimentales, y a partir de 900nm y hasta 1300nm todos los modelos son similares entre ellos y describen perfectamente la curva experimental para todas las muestras. El modelo que proviene de la aproximación de Large sigue con su tendencia de resultados ligeramente superiores a los experimentales en todo el rango y para todas las muestras.

## 8 CONCLUSIONES

Observando los resultados experimentales de las distintas muestras de nanofluidos estudiadas, la influencia de la presencia de nanopartículas en el agua pura es relevante en el tramo de longitudes de onda comprendido entre 400nm y 800nm. A partir de 900nm el aporte al coeficiente de extinción de las nanopartículas es despreciable.

Nos centramos en el rango comprendido entre 400nm y 800nm.

En este rango se pueden destacar los siguientes comportamientos del nanofluido:

- El valor del coeficiente de extinción crece en media a lo largo del espectro de longitudes de onda a medida que crece la concentración de nanopartículas en el fluido.
- El valor del máximo coeficiente de extinción del nanofluido tiene una fuerte dependencia con el tamaño de la partícula.
- Este valor máximo se produce para una longitud de onda comprendida entre 510nm y 530nm para todas las muestras, y se desplaza a la derecha (mayor longitud de onda) a medida que aumenta el tamaño de la nanopartícula.
- La amplitud alrededor del máximo es más amplio a medida que disminuye el tamaño de partícula.

En principio aquellos nanofluidos con mayores coeficientes de extinción medios, con máximos superiores y campanas anchas alrededor de esos máximos serán más eficientes, ya que, el área bajo la curva del coeficiente de extinción a lo largo del espectro será mayor.

El modelo basado en la aproximación de Large, es el modelo que más se aproxima a los resultados experimentales. Es un modelo que utiliza los datos experimentales de la transmitancia (T) y la reflectancia (R) para resolver sus ecuaciones. Modeliza perfectamente los cuatro comportamientos del nanofluido resaltados en la primera parte de este punto. Al utilizar T y R experimentales tiene en cuenta la influencia del tamaño de partícula y de la concentración.

El modelo basado en la Teoría de Maxwell Garnett es un modelo que solo depende de la concentración de las partículas y no de su tamaño. Para tamaños de partícula hasta 20nm describe bien el comportamiento del nanofluido. A medida que disminuye la concentración de nanopartículas, los valores que da son muy inferiores a los medidos. En este modelo se observa, también, que no reproduce la tendencia de desplazamiento a la derecha (a mayores longitudes de onda) del máximo en la curva del coeficiente de extinción, ni la variación de amplitud alrededor del máximo, manteniéndose prácticamente constante para todas las muestras.

Así pues, comparando este modelo que no depende del tamaño de la partícula, con los datos experimentales, se puede deducir que:

- Que la variación del valor del coeficiente de extinción medio crece con la concentración y con el tamaño de la partícula. Por eso a medida que aumenta el tamaño de partícula los valores de este modelo se alejan de los experimentales.
- Que el valor del máximo del coeficiente de extinción, aunque esté relacionado con la concentración está fuertemente afectado por el tamaño de la partícula, y crece mucho a medida que crece el tamaño de esta.
- Que la amplitud de la campana alrededor del máximo tiene una fuerte dependencia con el tamaño de la partícula y crece a medida que disminuye el tamaño de la partícula.

El modelo basado en la Teoría de Scattering de Mie da resultados muy inferiores a los reales, aunque mantiene la forma de la curva. Tampoco representa la variación de los máximos del coeficiente de extinción con el tamaño de la partícula ni la variación de la amplitud de la curva alrededor del máximo con el tamaño de la partícula.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gráfica evolución desarrollo energético mundial 1800-2019. <https://ourworldindata.org/energy>
- [2] Gráfica evolución desarrollo energético mundial 1970-2016. World\_energy\_consumption\_es
- [3] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics/es](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/es)
- [4] Estudio sobre el potencial de la energía solar térmica en Europa
- [5] P. Phelan, T. Otanicar, R. Taylor, H. Tyagi, Trends and opportunities in direct absorption solar thermal collectors, *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 5 (2) (May 2013), 021003.
- [6] <https://mercadoelectrico.wordpress.com/2012/05/11/tipos-de-colectores-solares/>
- [7] D. Cabaleiro, F. Agresti, S. Barison, S. Rossi, S. Bobbo, L. Fedele An overview of phase change material nano-emulsions in solar thermal applications: Design, characterization & Performance.. 3rd Training School, Nanouptake Cost Action
- [8] Hewakuruppu YL, Taylor RA, Tyagi H, Khullar V, Otanicar T, Coulombe S, et al. Limits of selectivity of direct volumetric solar absorption. *Sol Energy* 2015;114:206–16.
- [9] T.P. Otanicar, P.E. Phelan, R.S. Prasher, G. Rosengarten, R. a. Taylor, Nanofluidbased direct absorption solar collector, *J. Renew. Sustain. Energy* 2 (3) (2010), 033102.
- [10] T.B.Gorji, A.A.Ranjbar A review on optical properties and application of nanofluids in direct absorption solar collectors (DASCs) *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 72, May 2017, Pages 10-32
- [11]. E. Sani, N. Papi, L. Mercatelli, G. Zyla, Graphite/diamond ethylene glycol-nanofluids for solar energy applications, *Renewable Energy* 126 (2018) 692-698.
- [12]. A. Gimeno-Furio, L. Hernandez, N. Navarrete, R. Mondragon, Characterisation study of a thermal oil-based carbon black solar nanofluid, *Renewable energy* 140 (2019) 493-500.
- [13]. J.E. Minardi, H.N. Chuang, "Performance of a 'black' liquid flat-plate solar collector, *Sol. Energy* 17 (3) (Jul. 1975) 179-183.
- [14]. R. Bertocchi, J. Karni, A. Kribus, Experimental evaluation of a non-isothermal high temperature solar particle receiver, *Energy* 29 (5) (2004) 687-700.
- [15] Das SK, Choi SU, Patel HE. Heat transfer in nanofluids—a review. *Heat Transf Eng* 2006;27:3–19.
- [16] H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher, Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector, *J. Sol. Energy Eng.* 131 (4) (2009), 041004.
- [17]. S.H.A. Ahmad, R. Saidur, I.M. Mahbubul, F.A. Al-Sulaiman, Optical properties of various nanofluids used in solar collector: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73 (Jun. 2017) 1014-1030.
- [18] M.E. Zayed, J. Zhao, Y. Du, A.E. Kabeel, S.M. Shalaby, Factors affecting the thermal performance of the flat plate solar collector using nanofluids: a review, *Sol. Energy* 182 (Apr. 2019) 382-396.
- [19] K. Farhana, et al., "Improvement in the performance of solar collectors with nanofluids d a state-of-the-art review, *Nano Struct. Nano Obj.* 18 (Apr. 2019) 100276.

- [20] H. Olia, M. Torabi, M. Bahiraei, H.M. Ahmadi, M. Goodarzi, R.M. Safaei, Application of nanofluids in thermal performance enhancement of parabolic trough solar collector: state-of-the-art, *Appl. Sci.* 9 (3) (2019).
- [21] Proyecto\_NanoSteam
- [22] Aroa Galán García. TFM ESTUDIO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE NANOFUIDOS DE ORO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR.
- [23] González Manzanilla Fernando Osvaldo, [2] Romero y Vilorio Robero Javier, [3] Garcia Miranda Maribel, [4] Calzada Martinez Juan Carlos, [5] Arízaga Silva Juan Antonio. MEDICIÓN DE TEMPERATURA DE UNA ESTUFA SOLAR SK-14 PARA OPTIMIZAR SU EFICIENCIA.
- [24] M.-A. Al-Akhras *et al.*, «Artificial semi-rigid tissue sensitized with natural pigments: Effect of photon radiations», *J. Pharm. Bioallied Sci.*, vol. 3, n.º 2, p. 266, 2011.
- [25] Eugene Hecht Adelphi University. Tercera edición. Óptica
- [26] Robert A Taylor<sup>1\*</sup>, Patrick E Phelan<sup>1</sup>, Todd P Otanicar<sup>2</sup>, Ronald Adrian<sup>1</sup>, Ravi Prasher<sup>1</sup>, Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors
- [27] T. P. Otanicar, P. E. Phelan, y J. S. Golden, «Optical properties of liquids for direct absorption solar thermal energy systems», *Sol. Energy*, vol. 83, pp. 969-977, 2009.
- [28] <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=H2O&page>
- [29] Aroa Galán García. TFM ESTUDIO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE NANOFUIDOS DE ORO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA EN SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR Kubelka Munk\_coefs(5\_20\_50\_60nm\_agua)\_v\_zero.xls

## 10 ANEXOS

### 10.1 Anexo 1: Figuras

Figura 1. Desarrollo del consumo energético mundial desde 1800 hasta 2019 [1]	1
Figura 2. Desarrollo del consumo energético mundial desde 1970 hasta 2016 [2]	1
Figura 3. Demanda total de calefacción y refrigeración de los países UE-27 y contribución de la energía solar térmica por sector	3
Figura 4. Algunos tipos colectores solares térmicos [7]	5
Figura 5. (a) Esquema de los colectores solares térmicos de absorción directa de superficie (izquierda) y volumétricos (derecha) (b) comparación de sus pérdidas térmicas [10]	6
Figura 6. Cubeta de cuarzo (Hellma Analytics) [22]	9
Figura 7. Espectro de radiación solar [23]	10
Figura 8. Esquema simple de una cubeta sobre a que incide un haz luminoso con la radiación incidente y transmitida [22]	11
Figura 9. Esquema de la esfera integradora para medir la transmisión y la dispersión hacia delante [22]	11
Figura 10. Esquema de la esfera integradora para medir la reflexión y la dispersión hacia atrás. [22]	12
Figura 11. Esquema de la esfera integradora para medir la dispersión hacia atrás [22]	12
Figura 12. Transmitancia experimental en función de la longitud de onda para los nanofluidos estudiados	14
Figura 13. Reflectancia experimental en función de la longitud de onda para los nanofluidos estudiados	14
Figura 14. Coeficiente de extinción experimental en función de la longitud de onda para los nanofluidos estudiados	15
Figura 15. Esquema de propagación de la radiación electromagnética en un medio	16
Figura 16. Esquema de tipos de reflexión	16
Figura 17. Mapa del régimen de Scattering [26]	19
Figura 18. Diagrama de sistema de 3 capas para la espectrometría de un nanofluido en cubeta de cuarzo [27]	20
Figura 19. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm	28
Figura 20. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O entre las longitudes de onda 400nm y 800nm	29
Figura 21. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm	30
Figura 22. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	31
Figura 23. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica	31
Figura 24. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	32
Figura 25. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 5nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm	33
Figura 26. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 5nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm	34
Figura 27. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 5nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm	34
Figura 28. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 5nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	35
Figura 29. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 5nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica	36
Figura 30. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 5nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	36
Figura 31. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 20nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm	37

Figura 32. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 20nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm	38
Figura 33. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 20nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm	38
Figura 34. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 20nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	39
Figura 35. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 20nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica	40
Figura 36. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 20nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	40
Figura 37. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 50nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm	41
Figura 38. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 50nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm	42
Figura 39. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 50nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm	42
Figura 40. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 50nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	43
Figura 41. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 50nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica	44
Figura 42. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 50nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	45
Figura 43. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 60nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm	46
Figura 44. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 60nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm	47
Figura 45. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 60nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm	47
Figura 46. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 60nm entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	48
Figura 47. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 60nm entre las longitudes de onda 400nm y 800nm eje ordenadas en escala logarítmica	49
Figura 48. Representación del coeficiente de extinción H <sub>2</sub> O+Au 60nm entre las longitudes de onda 900nm y 1300nm eje ordenadas en escala logarítmica	49
Figura 49. Coeficiente de extinción experimental entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm	50
Figura 50. Coeficiente de extinción modelado mediante la aproximación de Large entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm	51
Figura 51. Coeficiente de extinción modelado mediante la Teoría de Maxwell- Garnett entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm	52
Figura 52. Coeficiente de extinción modelado mediante Teoría de Scattering de Mie entre las longitudes de onda 400nm y 1300nm	53

## 10.2 Anexo 2: Tablas

**Tabla 1. Percentiles promedios de los tamaños de las nanopartículas a temperatura ambiente [22] 9**