



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS**



TESIS:

**Diseño, construcción y caracterización de soportes ópticos
transparentes a la luz para irradiación con fuente externa en
esfera de integración**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN FÍSICA

PRESENTA:

Aldonza Montserrat Flores Martínez

ASESORES DE TESIS

Dr. Eugenio Torres García

Dra. Liliana Aranda Lara

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, ABRIL DE 2022.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como propósito diseñar y construir dos soportes que pudieran sostener distintos tipos de muestras dentro de una esfera de integración, de tal forma que usarlos no afecte de manera estadísticamente significativa los resultados de las mediciones que se tomen dentro de la esfera de integración.

El diseño consistió en un soporte que tuviera una plataforma para colocar una cubierta de cuarzo y otro que pudiera sostener un portaobjetos como en un microscopio. Se seleccionó el aluminio como material para construir los soportes. Para recubrir los soportes, se hizo una cubierta de sulfato de bario con alcohol polivinílico como aglutinante.

Para determinar la influencia de los soportes en el desempeño de la esfera de integración se utilizaron 7 láseres de longitud de onda diferente (405 nm, 450 nm, 532 nm, 635 nm, 780 nm, 850 nm, 980 nm). Estos láseres se hicieron incidir dentro de la esfera usando el soporte con plataforma en el puerto de entrada de la esfera y colocando un espectrofotómetro en el puerto de salida. Para cada longitud de onda, la medición se repitió 12 veces durante 200 ms (tiempo de integración). Este mismo procedimiento se repitió usando el soporte sin plataforma. De esta forma, se obtuvieron dos espectros para cada longitud de onda: uno con el soporte con plataforma dentro de la esfera de integración y el otro sin el soporte con plataforma.

Se utilizó la prueba t para muestras independientes para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en las medias de las dos condiciones de este estudio (con plataforma y sin plataforma). Se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, suponiendo varianzas desiguales en una distribución de dos colas.

Los resultados mostraron que para ninguna longitud de onda existió diferencia estadísticamente significativa entre las dos condiciones de este estudio (con soporte y sin soporte dentro de la esfera de integración). Sin embargo, la absorción de fotones aumenta considerablemente si la luz incidente es de longitud larga, en este caso, con los láseres de 780 nm, 850 nm y 980 nm, independientemente del uso de los soportes.

ABSTRACT

The purpose of this work was to design and build two supports that could hold different types of samples inside an integrating sphere, in such a way that using them would not affect in a statistically significant way the results of the measurements taken inside the integrating sphere.

The design consisted of a holder that had a platform to place a quartz cover and another one that could hold a slide as in a microscope. Aluminum was selected as the material to construct the holders. To coat the supports, a barium sulfate coating was made with polyvinyl alcohol as a binder.

To determine the influence of the supports on the performance of the integrating sphere, 7 lasers of different wavelength (405 nm, 450 nm, 532 nm, 635 nm, 780 nm, 850 nm, 980 nm) were used. These lasers were incident inside the sphere by using the holder with platform at the entrance port of the sphere and placing a spectrophotometer at the exit port. For each wavelength, the measurement was repeated 12 times for 200 ms (integration time). This same procedure was repeated using the stand without a platform. In this way, two spectra were obtained for each wavelength: one with the platform holder inside the integration sphere and the other without the platform holder.

The t-test for independent samples was used to determine if there were statistically significant differences in the means of the two conditions of this study (with platform and without platform). A significance level of $\alpha = 0.05$ was considered, assuming unequal variances in a two-tailed distribution.

The results showed that for no wavelength was there any statistically significant difference between the two conditions in this study (with and without support within the sphere of integration). However, the photon absorption increases significantly if the incident light is of long wavelength, in this case, with the 780 nm, 850 nm and 980 nm lasers, regardless of the use of the supports.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Esfera de integración.....	3
1.1.1. Naturaleza de la luz.....	4
1.1.2. Absorción.....	7
1.1.3. Transmisión.....	8
1.1.4. Dispersión.....	8
1.1.5. Atenuación.....	9
1.1.6. Reflexión.....	10
1.1.7. Reflectividad y reflectancia.....	12
1.1.8. Flujo radiante y radiancia.....	12
1.1.9. Cubierta reflectante.....	15
1.1.10. Propiedades del aluminio.....	18
1.2. Aplicaciones de la esfera de integración.....	19
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
3. HIPÓTESIS (innovación tecnológica).....	21
4. OBJETIVOS.....	22
4.1. Objetivo general.....	22
4.2. Objetivos específicos.....	22
5. METODOLOGÍA.....	23
5.1. Materiales.....	23
5.2. PROCEDIMIENTO.....	23
5.2.1. Diseño de los soportes.....	23
5.2.2. Construcción de los soportes.....	26
5.2.3. Cubierta reflectante.....	26
5.2.4. Caracterización óptica de los soportes.....	27
5.2.5. Determinación de la absorción de fotones por los soportes.....	29
5.3. Análisis de datos.....	29
6. RESULTADOS.....	31

6.1. Espectros obtenidos.....	31
6.2. Área bajo la curva de los espectros obtenidos	37
6.3. Prueba t.....	38
6.3.1. 405 nm	38
6.3.2. 450 nm	39
6.3.3. 532 nm	40
6.3.4. 635 nm	41
6.3.5. 780 nm	41
6.3.6. 850 nm	42
6.3.7. 980 nm	43
7. DISCUSIÓN.....	45
8. CONCLUSIONES.....	49
9. REFERENCIAS	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una esfera de integración básica.....	3
Figura 2. Esquema de un arreglo óptico hecho con dos esferas de integración de distintos tamaños.....	4
Figura 3. Espectro electromagnético.....	5
Figura 4. Representación unidimensional de dos ondas electromagnéticas de distinta longitud de onda y de distinta frecuencia.	6
Figura 5. Atenuación de un haz de fotones.	10
Figura 6. (a) Reflexión especular. (b) Reflexión difusa.	11
Figura 7. Radiancia.....	13
Figura 8. La radiancia dentro de una esfera de integración.....	14
Figura 9. Diseño original del soporte con portaobjetos.....	24
Figura 10. Diseño original del soporte con plataforma.....	24
Figura 11. Diagrama digital del diseño del soporte con portaobjetos.....	25
Figura 12. Diagrama digital del diseño del soporte con plataforma.	25
Figura 13. Diseño experimental.	28

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comparación de los espectros de 405 nm con y sin plataforma.	31
Gráfica 2. Comparación de los espectros de 450 nm con y sin plataforma.	32
Gráfica 3. Comparación de los espectros de 532 nm con y sin plataforma.	33
Gráfica 4. Comparación de los espectros de 635 nm con y sin plataforma.	34
Gráfica 5. Comparación de los espectros de 780 nm con y sin plataforma.	35
Gráfica 6. Comparación de los espectros de 850 nm con y sin plataforma.	36
Gráfica 7. Comparación de los espectros de 980 nm con y sin plataforma.	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Reflectividad de aluminio puro sin recubrimiento.	18
Tabla 2. Materiales utilizados para el diseño y construcción de los soportes.....	23
Tabla 3. Longitudes de onda de los láseres usados para caracterizar ópticamente a los soportes dentro de la esfera.	27
Tabla 4. Áreas obtenidas para cada longitud de onda con y sin plataforma.	38
Tabla 5. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 405nm.	39
Tabla 6. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 450 nm.	40
Tabla 7. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 532 nm.	40
Tabla 8. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 635 nm.	41
Tabla 9. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 780 nm.	42
Tabla 10. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 850 nm.	43
Tabla 11. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 980 nm.	44

INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de complementos que ayuden a que los trabajos experimentales sean más sencillos y eficientes es parte importante del desarrollo de una investigación científica. Estos deben cumplir requerimientos muy específicos para que, al ser utilizados, los resultados de la investigación no se vean alterados. Muchas veces estos complementos son muy costosos o incluso no se ajustan a las necesidades del trabajo que se está llevando a cabo, por lo que los investigadores se dan a la tarea de construirlos por sí mismos.

En el presente trabajo se pretende diseñar, construir y caracterizar ópticamente dos soportes cuya función es sostener distintos tipos de muestra en el interior de una esfera de integración, el cual es un dispositivo cuya principal característica es que la capa que recubre su interior está hecha de un material que refleja de forma difusa más del 80% de la luz incidente. Lo más importante al construir los soportes son los materiales, los cuales deben presentar propiedades ópticas muy similares a las propiedades de la cubierta interior de la esfera de integración. Al conseguir estas características, se pretende que las mediciones que se hagan al utilizar alguno de los soportes no se vean afectadas.

Este trabajo está dividido en nueve capítulos. El capítulo 1 corresponde al marco teórico, en el cual se desarrollan los principales conceptos que se necesitan para comprender los fenómenos que ocurren dentro de una esfera de integración. A continuación, en el capítulo 2, se planea el problema por el cual se ha llevado a cabo este trabajo. En el capítulo 3 el lector puede encontrar la hipótesis de este estudio, mientras que en el capítulo 4, se encuentran los objetivos planteados. El capítulo 5 corresponde a la metodología, donde se describe el procedimiento que se utilizó para diseñar y construir los soportes y posteriormente caracterizarlos mediante el uso de láseres de diferentes longitudes de onda. En el capítulo 6 se habla de los resultados que se obtuvieron en este estudio y el manejo estadístico que se realizó con la prueba t en las dos condiciones del estudio: mediciones dentro

de la esfera de integración con el soporte y sin el soporte. En el capítulo 7 se puede encontrar la discusión de los resultados, donde se habla de las observaciones que se pueden hacer respecto al uso de los soportes dentro de la esfera de integración, haciendo referencia a los autores del marco teórico y a los fenómenos físicos que se observan dentro de la esfera. Finalmente, en el capítulo 8 se habla brevemente de las conclusiones a las que se llegó en este trabajo, entre las cuales cabe destacar que las propiedades ópticas de los soportes construidos en nuestro laboratorio son muy similares a las propiedades de la cubierta interior de la esfera que es fabricada por una empresa especializada en la producción de dispositivos ópticos. El uso de los soportes diseñados, construidos y caracterizados en este estudio no afecta significativamente las mediciones en el interior de la esfera de integración.

1. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan los principios básicos necesarios para comprender el funcionamiento de una esfera de integración y los fenómenos que ocurren en su interior. También se describen los componentes que conforman una esfera de integración y algunos experimentos que se realizan con este dispositivo.

1.1. Esfera de integración

Una esfera de integración (también llamada esfera integradora) es un dispositivo óptico que consiste en un cascarón esférico hueco, cuyo interior está recubierto por una capa de un material que refleja la luz de forma difusa (Rivero, 2010). La esfera a su vez consta de dos puertos, uno para la entrada del haz luminoso y otro, llamado puerto de salida, para colocar el detector que toma las mediciones para el experimento. Estas características pueden variar dependiendo del propósito para el que se use la esfera. Además, en el interior de la esfera se coloca una placa llamada *baffle* cuyo propósito es bloquear la incidencia directa de luz entre el puerto de entrada y el de salida. El *baffle* está cubierto por el mismo material que el interior de la esfera (Figura 1).

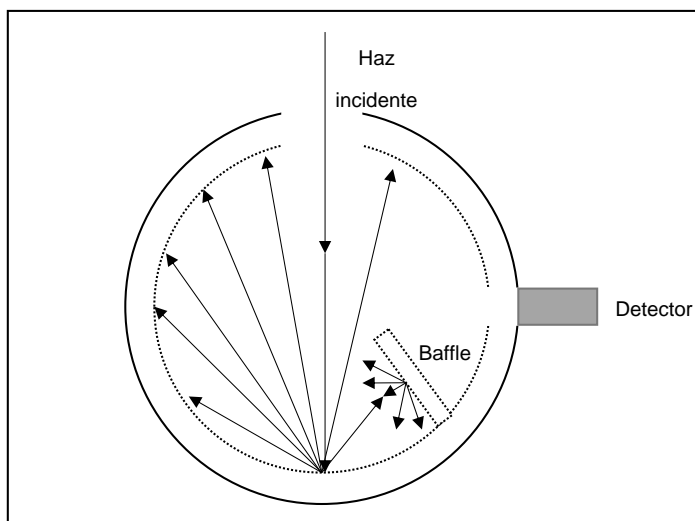


Figura 1. Esquema de una esfera de integración básica.

Hay esferas de integración que pueden tener más de un puerto de entrada (Taylor, 2013), haciendo posible que múltiples fuentes de luz incidan dentro de la esfera o incluso que se hagan arreglos con más esferas de integración conectadas entre sí, como se muestra en la Figura 2.

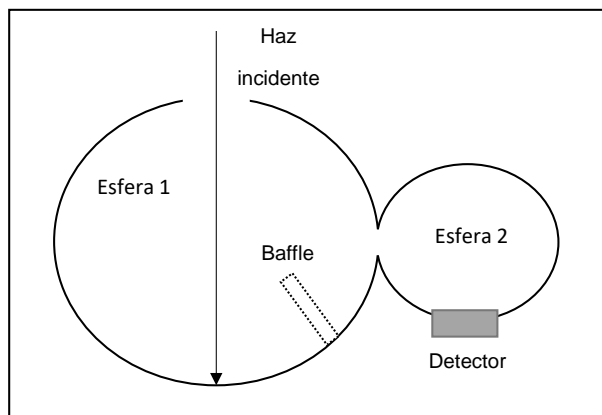


Figura 2. Esquema de un arreglo óptico hecho con dos esferas de integración de distintos tamaños.

1.1.1. Naturaleza de la luz

Para entender los fenómenos físicos que se llevan a cabo dentro de la esfera de integración es necesario conocer algunas propiedades de la luz.

La luz es radiación electromagnética, es decir, es energía proveniente de una fuente que se propaga en el vacío en línea recta a una velocidad constante c de $2.99 \times 10^8 m/s$ (la cual es una constante universal) (Gruyitch, 2015); y que tiene asociado un campo eléctrico y un campo magnético (Centers for Disease Control and Prevention, 2015). Cabe señalar que la velocidad de la luz cambia con relación al medio por el que se propaga (aire, agua, materiales, etc.), debido a las distintas interacciones con la estructura del medio en cuestión.

La radiación electromagnética está formada por partículas discretas sin masa ni carga llamadas *fotones*. El fotón tiene como propiedad que se comporta como una onda, o se comporta como una partícula dependiendo del fenómeno que produzca. A esto se le conoce como “dualidad onda-partícula”.

Existe una amplia gama de radiación electromagnética en la naturaleza. Al rango de longitudes de onda de radiación electromagnética se le conoce como espectro electromagnético. La Figura 3 muestra un esquema del espectro electromagnético, donde la radiación con mayor longitud de onda se encuentra a la izquierda del espectro, mientras que la radiación con menor longitud de onda se encuentra a la derecha.

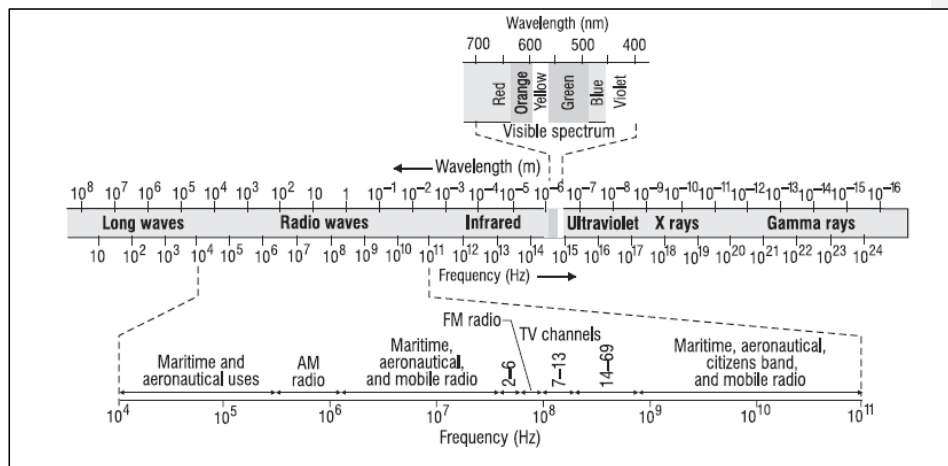


Figura 3. Espectro electromagnético. Tomado de Gruyitch, 2015.

El término “luz visible” se refiere a aquella región del espectro electromagnético que puede ser percibido por el ojo humano, el cual abarca longitudes de onda de 380 a 780 nm (INAOE, n.d.).

La frecuencia de la onda electromagnética determina la longitud de onda de la luz, lo cual diferencia a la luz visible de otras formas de radiación electromagnética como los rayos X, la radiación infrarroja o la radiación ultravioleta. Entre más alta es la

frecuencia más corta es la longitud de onda y cuanto más baja es la frecuencia más larga es la longitud de onda (véase Figura 4).

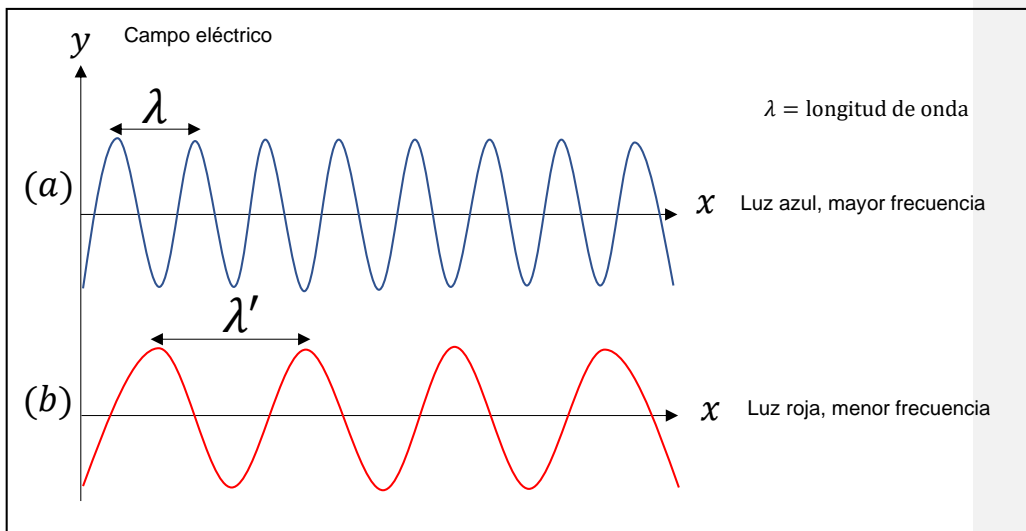


Figura 4. Representación unidimensional de dos ondas electromagnéticas de distinta longitud de onda y de distinta frecuencia.

La relación entre la frecuencia y la longitud de onda está dada mediante la expresión:

$$c = \lambda \nu \quad (1)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío, λ es la longitud de la onda (en unidades de nanómetros) y ν la frecuencia de la onda.

Estas características corresponden a la naturaleza ondulatoria de la luz; sin embargo, hay que recordar que la luz también se comporta como una partícula.

Por ejemplo, la intensidad de la luz depende del número de fotones que la conforman. Entre más fotones hay en un haz luminoso, este será más intenso (Hamamatsu Photonics, n.d.).

Por otra parte, cuando un fotón atraviesa un medio cualquiera, el número de fotones se reduce, causando con ello que el haz de luz pierda energía (Consejo de Seguridad Nuclear, 2009).

De este modo, al entrar en contacto con algún medio, la luz se puede comportar de distintas formas: puede ser absorbida, transmitida, reflejada o dispersada. Es importante describir estos fenómenos debido a que son los que se observan dentro de una esfera de integración al momento de realizar las mediciones con algún tipo de muestra en su interior.

1.1.2. Absorción

Cuando un fotón interactúa con un átomo y éste transfiere por completo su energía a los átomos del medio en donde incide, quiere decir que se produjo un fenómeno de absorción (Consejo de Seguridad Nuclear, 2009).

Según Somera (2013), en un medio no dispersor y homogéneo de cierto espesor x , la relación entre la intensidad inicial I_0 de un haz luminoso que incide en ese medio y la intensidad resultante I luego de atravesarlo está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{dI}{I} = -\mu_a dx \quad (2)$$

Al integrar se obtiene la Ley de Beer-Lambert:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_a x} \quad (3)$$

donde μ_a es el coeficiente de absorción, que es la probabilidad de que un fotón sea absorbido por unidad de longitud que recorre (Jim, 2020).

El coeficiente de absorción depende de la longitud de onda de la luz incidente, esto causa que algunos tipos de luz sean absorbidos en un medio, mientras que otros tipos de luz no serán absorbidos por el material (Almog et al., n.d.) .

1.1.3. Transmisión

Como menciona Somera (2013), la probabilidad de que los fotones de un haz luminoso atraviesen el medio sin interactuar está dada por la transmitancia. Esta cantidad depende del índice de refracción del medio.

Se dice que un material sobre el que incide luz es *transparente*, si la luz incidente no es absorbida al propagarse dentro del material y esta atraviesa el medio sin interactuar con él.

1.1.4. Dispersión

Cuando un fotón incidente es absorbido por una partícula del medio, lo reemite con su misma energía, pero con una dirección distinta a la trayectoria inicial, se dice que no existió un intercambio de energía y, por lo tanto, que el fotón fue dispersado elásticamente. Esto resulta en que, al moverse la luz por un algún medio, su velocidad v sea menor a la velocidad de la luz en el vacío c . La relación entre estas velocidades es lo que se conoce como índice de refracción n

$$n = \frac{c}{v} \quad (4)$$

Esta es una propiedad única de cada medio (Hecht, 2012).

Si las dimensiones del medio en el que se dispersa la luz (dispersor) son mucho mayores que la longitud de onda de la radiación incidente entonces ocurre un proceso de dispersión elástica que se modela por medio de la teoría de Rayleigh; mientras que la teoría de Mie explica la dispersión elástica originada por un dispersor de cualquier tamaño.

Para la dispersión también existe una relación de carácter exponencial que representa la relación entre la intensidad inicial del haz I_0 y la intensidad de luz resultante I que incide en un medio homogéneo de espesor x , pero ahora el medio es puramente dispersor, por lo tanto:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_s x} \quad (5)$$

donde μ_s es el coeficiente de dispersión, la cual es la probabilidad de que un fotón sea dispersado en un medio por unidad de longitud recorrida.

1.1.5. Atenuación

La atenuación es la pérdida de la intensidad del flujo luminoso cuando este atraviesa un medio. A la probabilidad de que un fotón interactúe (por absorción o dispersión) por unidad de camino recorrido se le llama coeficiente de atenuación —en algunos textos, se denomina coeficiente de extinción (Deng, n.d.).

Si un haz luminoso pasa a través de un medio de espesor x y se consideran los efectos totales de absorción y dispersión, podemos relacionar la intensidad inicial I_0 con la intensidad resultante I de la siguiente manera:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_t x} \quad (6)$$

$\mu_t x$ es la probabilidad de interacción del fotón (por absorción o dispersión) en un medio por distancia, donde μ_t es el coeficiente de atenuación total que se define como:

$$\mu_t = \mu_a + \mu_s \quad (7)$$

donde μ_a representa el coeficiente de absorción y μ_s el coeficiente de dispersión. La disminución del flujo luminoso se traduce en la pérdida del número de fotones.

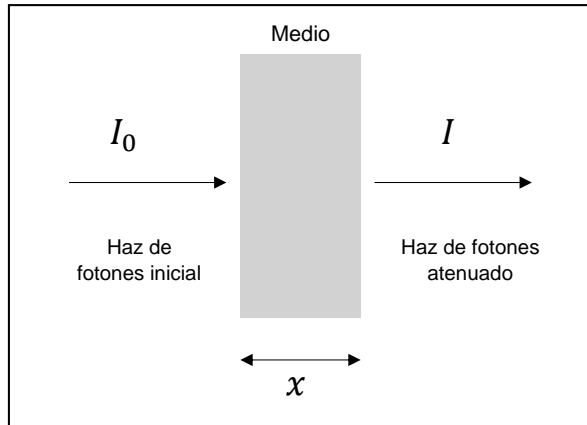


Figura 5. Atenuación de un haz de fotones.

Como indica la ecuación (6) y se muestra en la Figura 5, esta pérdida en el número de fotones se debe principalmente al espesor del medio. La atenuación aumenta entre más espeso el medio; por lo tanto, distintos materiales, como por ejemplo, el tejido adiposo o la sangre, tienen diferentes coeficientes de atenuación (Aranda, 2013).

1.1.6. Reflexión

La reflexión es un proceso físico en el que la luz incide sobre un medio y al menos una parte es devuelta por el medio sin que la longitud de onda del haz luminoso se vea afectada.

Cuando la luz atraviesa un medio homogéneo, se propaga rectilíneamente; esto quiere decir que cuando un haz de luz incide en cierto ángulo con una superficie lisa, el haz será reflejado con el mismo ángulo respecto a la superficie de incidencia. Esto es conocido como *reflexión especular*. La Figura 6(a) muestra cómo un haz luminoso incide sobre una superficie lisa con un ángulo θ para después ser reflejado

por la misma superficie con el mismo ángulo θ' . Este tipo de reflexión es la que se da por ejemplo sobre un espejo (Fernández, 2008).

Por otro lado, si la superficie reflectora no es lisa y presenta varias irregularidades, entonces la luz se reflejará en varias direcciones, independientemente del ángulo de incidencia. Esto es llamado *difusión de la luz*, el cual se define "...como el cambio en la distribución espacial de un haz luminoso cuando es desviado en distintas direcciones por una superficie o medio..." (Domínguez Miranda, 2012, p.16). La Figura 6(b) ilustra cómo un haz luminoso incide sobre una superficie rugosa y después es reflejado de manera difusa por la superficie.

Cuando un medio produce difusión al incidir un haz de luz sobre él, se dice que es una superficie difusora. Este es el caso de la superficie interior de las esferas integradoras.

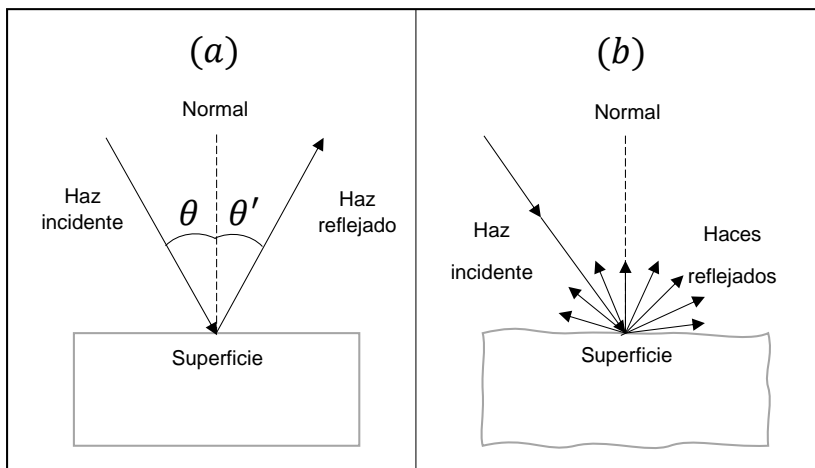


Figura 6. (a) Reflexión especular. (b) Reflexión difusa.

1.1.7. Reflectividad y reflectancia

La reflectividad es una propiedad óptica de los materiales, la cual describe cuánta luz es reflejada por el material en relación con la cantidad de la luz que incide en el material (New Technologies Research Centre, n.d.).

Por otro lado, la reflectancia se puede describir como la intensidad de un haz de luz reflejado respecto a su intensidad antes de la reflexión.

Según Domínguez Miranda (2012), la reflectancia es la magnitud básica que caracteriza la reflexión y se define como:

$$\rho(\lambda) = \frac{P_{\lambda,r}}{P_{\lambda,i}} \quad (8)$$

donde $\rho(\lambda)$ denota la reflectancia, $P_{\lambda,r}$ es la cantidad de flujo radiante reflejado por el medio y $P_{\lambda,i}$ es la cantidad de flujo radiante incidente.

1.1.8. Flujo radiante y radiancia

Al utilizar una esfera de integración en cualquier experimento, es importante entender que su principal función es integrar espacialmente el flujo radiante incidente en el interior de la misma (Taylor, 2013).

El flujo radiante se define como la energía radiante (la energía de alguna radiación electromagnética) que se emite, transmite, refleja o absorbe durante algún intervalo de tiempo por un objeto.

La luz incidente en una superficie difusa crea una fuente de luz virtual. Este proceso es definido de mejor forma por la *radiancia*, la cual es la densidad de flujo radiante emitida por unidad de ángulo sólido (LABSPHERE, 2008).

La radiancia de una superficie difusa está dada como:

$$L = \frac{\Phi_i \rho}{\pi A} \quad (9)$$

donde L es la radiancia, Φ_i es el flujo radiante, ρ es la reflectancia, A es el área iluminada y π el ángulo sólido total proyectado por la superficie (véase Figura 7).

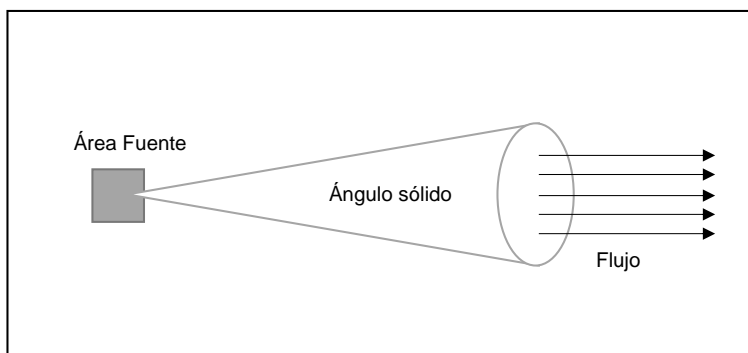


Figura 7. Radiancia.

Para una esfera de integración, la ecuación (9) debe considerar múltiples superficies de reflexión, además de las pérdidas de flujo radiante originadas por las puertas de entrada y salida de la esfera, por lo que la radiancia para una esfera de integración estará dada como:

$$L_s = \frac{\Phi_i}{\pi A_s} * \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (10)$$

La ecuación (10) representa el flujo radiante total que incide en la superficie de una esfera de integración, en esta ecuación se incluye el término f , llamado *port fraction* que está definido como la fracción de flujo radiante recibido por la superficie de la esfera que no se refleja debido a los puertos de entrada y salida. Esta cantidad está dada como:

$$f = \frac{(A_i + A_e)}{A_s} \quad (11)$$

donde A_i es el puerto de entrada (*input port*), A_e es el puerto de salida (*exit port*) y A_s es la superficie total de la esfera (*sphere area*), como se ilustra en la Figura 8.

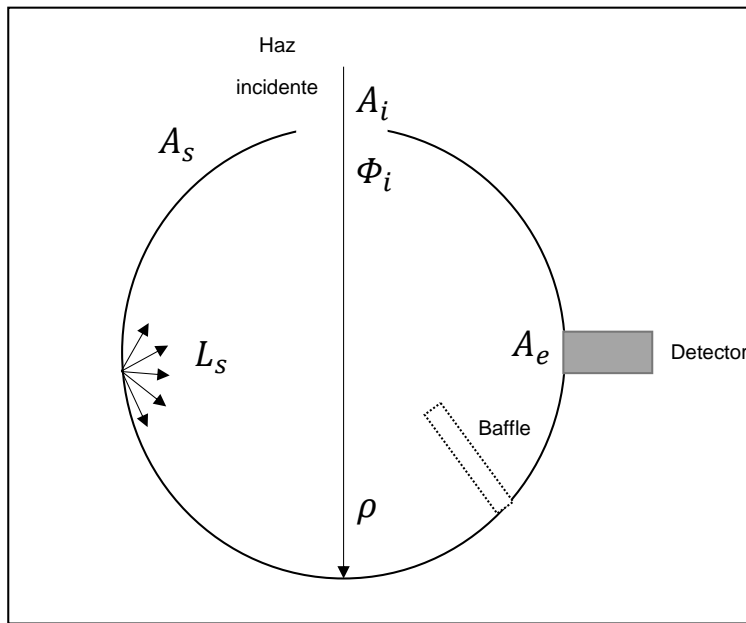


Figura 8. La radiancia dentro de una esfera de integración.

La ecuación (10) se usa para calcular la radiancia dentro de una esfera de integración dado el diámetro de la esfera, la reflectancia y el *port fraction*.

El segundo término de la ecuación (10) puede ser llamado el *multiplicador de la esfera M*:

$$M = \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (12)$$

El multiplicador de la esfera se define como el aumento de la radiancia debido a múltiples reflexiones de la luz incidente (LABSPHERE, 2008).

Es importante notar que la radiancia decrece conforme el diámetro de la esfera se incrementa, por lo que a partir de la ecuación (10) se puede demostrar que una esfera pequeña tiene mejor radiancia que una que tiene un diámetro mayor (Pike Technology, 2013); esto se observa en la siguiente relación.

$$L_s \sim \frac{M}{D^2} \quad (13)$$

El diámetro de la esfera, así como el número y el tamaño de los puertos de entrada y salida, son los factores por considerar, además de la reflectancia de la cubierta interior, si se desea tener una esfera de integración que presente una alta reflectividad. Por ejemplo, una esfera con un diámetro grande y un *port fraction* pequeño, puede tener una radiancia aceptable, mientras que una cubierta altamente reflectante puede compensar las deficiencias en el diseño geométrico de la esfera.

1.1.9. Cubierta reflectante

Como ya se mencionó anteriormente, una de las principales características para el funcionamiento óptimo de una esfera de integración es que la cubierta interior presente una alta reflectividad, por lo que la elección del material con el que se haga la cubierta puede hacer una gran diferencia en la radiancia producida dentro de la esfera.

En esta sección se hace mención del estudio de cubiertas reflectantes hechas con diferentes sustancias y compuesto a lo largo de la historia, con el fin de justificar la elección de los materiales para los soportes que se diseñaron y construyeron para este proyecto.

El estudio de cubiertas reflectantes se remonta a principios del siglo XX. Autores como Ostwald (1933) estudiaron distintas sustancias, especialmente aquellas

hechos con sulfato de bario, un polvo blanco con consistencia de talco que se mezclaba con agua y que al secarse daba como resultado una capa mate y rugosa que fácilmente se desprendía de la superficie donde se aplicaba.

Las cubiertas de óxido de magnesio fueron ampliamente investigadas por distintos autores. Las cubiertas hechas con este compuesto presentan una reflectividad estable, lo cual quiere decir que su reflectividad no cambia al ser expuesta a luz de distintas longitudes de onda. No obstante, se demostró que los cristales de óxido de magnesio contenidos en la cubierta adquieren color al ser expuestos a oxígeno y a vapores de metales alcalinotérreos a temperaturas mayores de 1000 °C. También se demostró que coloraciones similares se producen en las cubiertas de óxido de magnesio por radiación ultravioleta altamente energética y por radiación de partículas (Grum 1968).

La necesidad de hacer una cubierta reflectante llevó a Grum (*op. cit.*) a realizar un estudio en el que preparó una cubierta con polvo de sulfato de bario mezclado con alcohol polivinílico, un polímero que según Bilhim (2011) mejora su durabilidad. En dicho estudio se menciona que la mejor superficie para aplicar la cubierta de sulfato de bario fue una hoja de aluminio pulida para mejorar la adhesión. Los resultados experimentales mostraron que la reflectividad de la cubierta era muy estable al ser expuesta a luz UV y a condiciones ambientales adversas, siendo la cubierta de sulfato de bario una mejor opción que la producida con óxido de magnesio.

Shai (1971) formuló un procedimiento en el que utilizó una mezcla de sulfato de bario, alcohol polivinílico, agua y alcohol etílico, haciendo énfasis en que la superficie en la que se aplicó la cubierta debe ser de un material metálico.

Schutt (1974) estudió las propiedades de las cubiertas óxido de magnesio y de las cubiertas de sulfato de bario con distintos aglutinantes. Menciona que las cubiertas de sulfato de bario con alcohol polivinílico tienen mejores propiedades mecánicas que las cubiertas hechas con óxido de magnesio, haciéndolas más resistentes a condiciones atmosféricas normales. Sin embargo, las cubiertas de óxido de magnesio presentan una reflectividad más estable en el espectro del UV, al igual que las cubiertas de sulfato de bario usando como aglutinante sulfato de potasio,

siendo esta la opción con mejor potencial para detectar radiación Cerenkov, dado que el rango de longitudes de onda del proceso de Cerenkov va desde los 200 nm a los 800 nm, aproximadamente. El sulfato de potasio es un compuesto inorgánico que fue seleccionado a causa de que los aglutinantes orgánicos (como el alcohol polivinílico) alteran la reflectancia de la luz en el espectro del ultravioleta lejano a partir de 200 nm, aproximadamente.

Minematu (1983), señala que la reflectividad de la cubierta se puede ver afectada por el aglutinante que se use. En el caso de las cubiertas de sulfato de bario con alcohol polivinílico (PVA), es posible que el grado de polimerización (peso molecular) del PVA afecte la estabilidad de la cubierta. Generalmente, entre más grande sea el peso molecular del polímero, más estable será la cubierta de sulfato de bario. Además, entre menos solubilidad en agua tenga el PVA, mayor será su estabilidad óptica. El PVA también tiene la propiedad de que entre menor sea el grado de polimerización, presenta mayor absorción en el espectro del ultravioleta.

Otro problema de las cubiertas hechas con polvo de sulfato de bario, independientemente del aglutinante, es que no son eficientes al reflejar luz en el espectro del infrarrojo cercano (NIR), debido a que su superficie es polar y fácilmente absorbe el vapor de agua de la atmosfera, ocasionando que la reflectividad en el NIR disminuya. Todo esto indica que la utilización de cubiertas de sulfato de bario debe restringirse al espectro del visible y hasta el ultravioleta cercano (NUV) si el aglutinante es orgánico; en caso de que el aglutinante sea inorgánico, la reflectividad de la cubierta se mantendrá estable hasta el ultravioleta medio (MUV) (Schutt et al., 1974).

Knighton (1981) menciona que las cubiertas de sulfato de bario son una opción más económica en comparación de cubiertas hechas con politetrafluoroetileno, el cual es un material altamente reflectante e hidrofóbico que comúnmente se conoce como teflón (Schutt, Holben y Shai, 1981).

Los estudios presentados por distintos autores señalan a las cubiertas de sulfato de bario con alcohol polivinílico como aglutinante como una de las mejores opciones en cuanto a reflectividad y facilidad para su preparación y aplicación.

1.1.10. Propiedades del aluminio

Además de la cubierta reflectante, el material sobre el que se aplique debe ser seleccionado minuciosamente para que la eficiencia de la esfera de integración no se vea afectada.

El aluminio es un material que tiene varios usos en el campo de la óptica. Generalmente se utiliza como material para fabricar espejos con alta reflectividad para los telescopios o como material para fabricar películas delgadas.

Es raro que el aluminio se utilice como superficie reflectante sin algún tipo de recubrimiento o de tratamiento, ya que este material se oxida rápidamente en condiciones ambientales normales. Sin embargo, suele tener un porcentaje de reflectividad de más del 80% dependiendo de la longitud de onda de la luz incidente; incluso llega a tener un 99% de reflectividad cuando se hace incidir sobre él un haz luminoso de más de 900 nm (LBP Optics, 2014), como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En general, el aluminio presenta buena reflexión en el espectro visible e infrarrojo (Wake, 1993).

Tabla 1. Reflectividad de aluminio puro sin recubrimiento. Tomado de LBP Optics, 2014.

<i>Longitud de onda</i>	<i>% Reflectividad</i>
248 nm	92.6
400 nm	92.0
532 nm	91.6
633 nm	90.7
800 nm	86.8
900 nm	89.0
1 μm	94.0
3 μm	98.0
10.6 μm	98.7
20 μm	99.0
100 μm	99.4

Estas características hacen al aluminio un material ideal para hacer piezas como las que se construyeron en este proyecto.

1.2. Aplicaciones de la esfera de integración

Por su versatilidad, las esferas de integración son utilizadas para una extensa variedad de mediciones ópticas, fotométricas o radiométricas. Al poder acoplar a la esfera distintos tipos de sensores o accesorios como una fibra óptica, lentes e incluso otras esferas de integración, amplían las posibilidades de uso que se pueden dar a este dispositivo.

Uno de los principales propósitos para el que se usa una esfera de integración es caracterizar la luz que se absorbe o se transmite por algún material. Estas propiedades ópticas pueden decir mucho de la composición química y de la estructura del material.

Por ejemplo, en el área biomédica, varios tipos de terapia como la terapia fotodinámica (TFD) o la terapia térmica intersticial con láser (LITT), se benefician de conocer las propiedades ópticas de los tejidos biológicos con los que estas técnicas interactúan. Conocer los índices de absorción, dispersión y en consecuencia de atenuación de una muestra biológica haciendo uso de la esfera de integración, ayuda a entender cómo se comporta la luz en el tejido biológico y así poder mejorar las técnicas de fototerapia y fotodiagnóstico que se utilizan hoy en día y desarrollar muchas más en el futuro (Rehman et al., 2020).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La característica principal de una esfera de integración es que la capa que recubre su interior absorbe luz en muy poca medida debido a que el material con el que está hecha refleja de forma difusa más del 80% de la luz que incide. Se debe procurar que la capa sea uniforme y que dentro de lo posible no contenga impurezas en su superficie, por lo que es importante que cualquier objeto que se coloque dentro no toque la superficie de la esfera.

Debido a que el interior de la esfera está completamente cubierto de una capa de sulfato de bario, no cuenta con soportes para colocar muestras, lo que representa un gran problema ya que algunos propósitos para los que se utiliza una esfera de integración son: irradiar muestras tanto sólidas como líquidas con fuentes internas y/o externas, analizar las emisiones Cerenkov de fuentes radiactivas, activar fluoróforos, cuantificar de forma integral el número de emisiones, etc.

Cabe destacar que lo fundamental en estos soportes son los materiales de los cuales están contruidos. Estos materiales deben tener propiedades ópticas muy similares a las del interior de la esfera de integración, de tal manera que no afecten significativamente las mediciones que se hagan al utilizarlos para irradiar distintos tipos de muestras.

Por lo anterior, en este trabajo se pretende diseñar, construir y caracterizar ópticamente soportes cuyas características de reflectividad óptica sean muy parecidas a las características que ofrece la superficie de la esfera de integración (marca StellarNet, 6"), de tal manera que utilizar los soportes para irradiar muestras o cuantificar emisiones de luz no afecte la confiabilidad de los resultados que se obtengan en muestras tanto sólidas como líquidas.

3. HIPÓTESIS (innovación tecnológica)

Los soportes diseñados y contruidos para sostener muestras líquidas o portaobjetos dentro de una esfera de integración cuyo recubrimiento presente absorción y dispersión de fotones no afectan significativamente las mediciones hechas dentro de la esfera comparadas con las mediciones hechas sin dichos soportes.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Diseñar, construir y caracterizar ópticamente dos soportes con propiedades de reflectividad de luz que no afecten ópticamente las mediciones que se hagan dentro de la esfera de integración. Uno de los soportes debe ser capaz de sostener una cubeta de cuarzo para muestras líquidas y el otro debe sostener un portaobjetos para muestras sólidas.

4.2. Objetivos específicos

- 1) Seleccionar los materiales con propiedades ópticas que permitan una alta reflexión de la luz para construir los soportes.
- 2) Diseñar y construir los soportes, y recubrirlos con una capa de material altamente reflejante.
- 3) Mostrar que la presencia de los soportes no afecta significativamente las mediciones que se realizan dentro de una esfera de integración.

5. METODOLOGÍA

5.1. Materiales

En la Tabla 2, se enumeran los materiales utilizados para la realización de este proyecto.

Tabla 2. Materiales utilizados para el diseño y construcción de los soportes.

Materiales		
Lija de agua y para metal	Alcohol polivinílico	Pincel
Vaso de precipitado	Sulfato de Bario	Láseres ThorLabs de 405, 450, 532, 635, 780, 850 y 980 nm.
Micropipeta	Agua destilada	Computadora
Dos parrillas de calentamiento	Alcohol etílico	Software SpectraWiz
Termómetro	Compresor de aire	Software OriginLab
Agitador de vidrio	Pistola de aire	Software Micorsoft Excel
Agitador magnético	Esfera de integración	Espectrofotómetro

5.2. Procedimiento

5.2.1. Diseño de los soportes

Para diseñar las piezas se tomaron medidas del diámetro de la puerta de entrada de la esfera ya que ambos soportes deben servir como una “tapa”. La esfera de integración que se tiene en el laboratorio de Simulación Monte Carlo y Dosimetría (LSMD) en la facultad de medicina de la UAEMéx es una esfera IS6 de la marca StellarNet Inc. de 6 pulgadas de diámetro, con un puerto de entrada de 2 pulgadas de diámetro y un puerto de salida de $\frac{1}{4}$ de pulgada (StellarNet Inc, n.d.).

Posteriormente se realizaron dos diseños de los soportes, uno que pudiera sostener un portaobjetos como en un microscopio y otro con una plataforma para colocar una cubeta de cuarzo. Esto se ilustra en los diagramas de la Figura 9 , Figura 10, Figura 11 y Figura 12. |

Comentado [ETG1]: Esto que Monse?

Comentado [MF2R1]: Es que aquí me dijo que pusiera unos esquemas, pero no los he hecho, entonces no quito la nota para que no se me olvide ponerlos

Comentado [ETG3R1]: ok

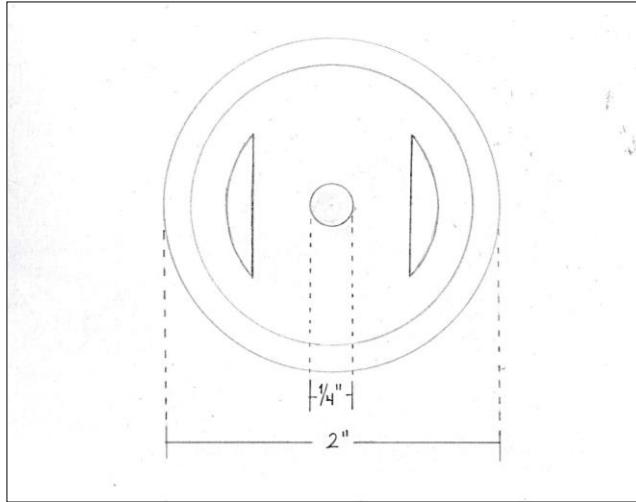


Figura 9. Diseño original del soporte con portaobjetos.

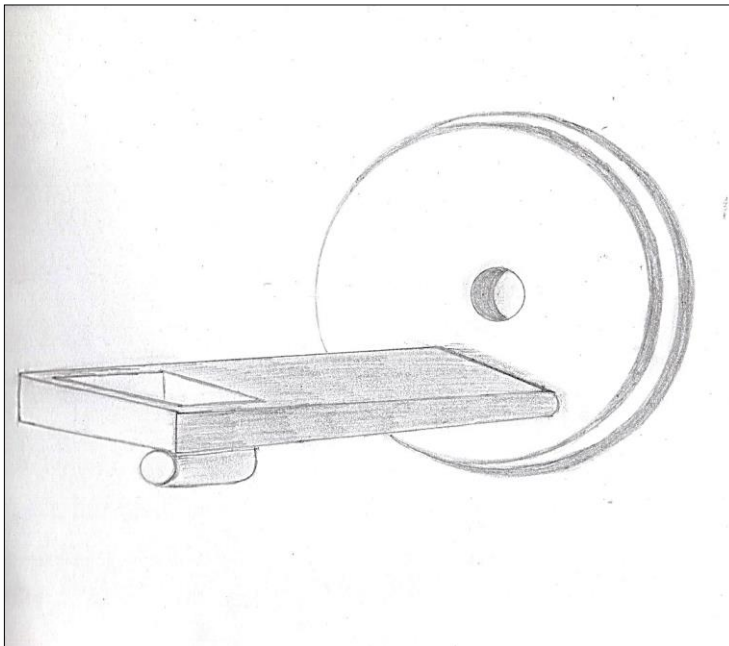


Figura 10. Diseño original del soporte con plataforma.

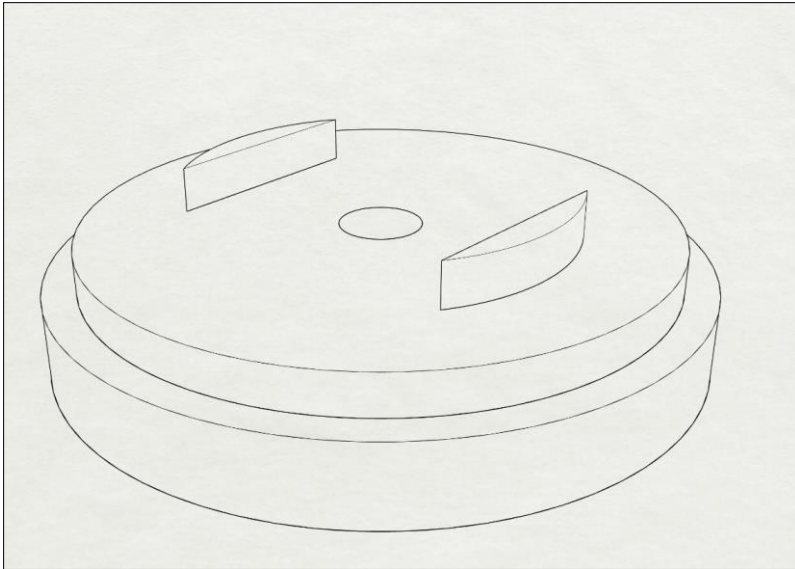


Figura 11. Diagrama digital del diseño del soporte con portaobjetos.

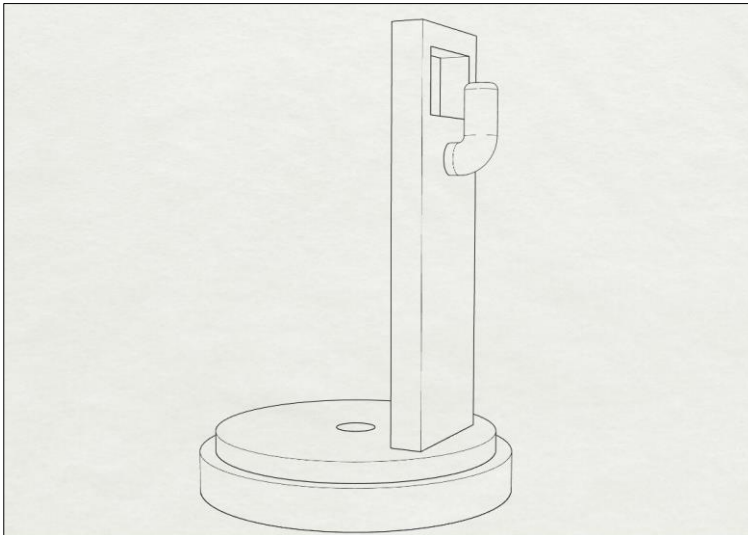


Figura 12. Diagrama digital del diseño del soporte con plataforma.

5.2.2 Construcción de los soportes

Los diseños se llevaron a un taller de torno para su construcción. Se indicó que los soportes debían ser hechos en aluminio. Además, se construyó una rosca para fijar los soportes, ya que estos no deben rotar para no derramar las muestras que pueden llegar a sostener.

Cuando los soportes estuvieron listos, se verificó que las piezas de aluminio se ajustaran correctamente a la puerta de entrada de la esfera y que además cumplieran su función. Por último, se pulieron con lija de agua para que la superficie fuera completamente uniforme y libre de trozos sobrantes de metal.

5.2.3 Cubierta reflectante

La preparación y aplicación de la cubierta reflectante se llevó a cabo en el laboratorio de Simulación Monte Carlo y Dosimetría (LSMD) de la Facultad de Medicina de la UAEMéx.

Para la preparación de la cubierta reflejante se calentó agua destilada en un vaso de precipitado. Cuando el agua estuvo a 80°C se mezcló con alcohol polivinílico en granos con un agitador magnético. Durante este periodo, se agregó más agua destilada para evitar que la mezcla se endureciera. Cuando el alcohol polivinílico estuvo mezclado perfectamente con el agua, se obtuvo una mezcla transparente de consistencia pegajosa. Después se agregó alcohol etílico de 96 grados y se continuó agitando hasta que el alcohol etílico se incorporó totalmente a la mezcla. Por último, se agregó el polvo de sulfato de bario y se mezcló hasta obtener una mezcla poco viscosa de color blanco mate. Se dejó reposar la mezcla hasta que se enfrió completamente (por cuestiones de buscar la patente de dicho recubrimiento no se mencionan detalles ni cantidades en su preparación).

Para la aplicación de la mezcla, la pieza de aluminio debió ser posteriormente limpiada con alcohol etílico o acetona pura, de tal manera que no contuviera impurezas en la superficie de aplicación.

La mezcla se aplicó con una pistola de aire marca Truper sobre una superficie nivelada para evitar escurrimientos de la mezcla. Se aplicaron varias capas cubriendo por completo la parte del soporte que da al interior de la esfera, dejando secar cada capa totalmente entre aplicación y aplicación; esto se repitió hasta conseguir una cubierta mate completamente uniforme sobre la superficie a cubrir en ambos soportes.

Por último, con un pincel fino se cubrieron las imperfecciones que no se pudieron cubrir en su totalidad con la pistola de aire.

5.2.4 Caracterización óptica de los soportes

Para determinar la influencia de los soportes en el desempeño de la esfera de integración se utilizaron 7 láseres de longitud de onda distinta (véase Tabla 3).

Tabla 3. Longitudes de onda de los láseres usados para caracterizar ópticamente a los soportes dentro de la esfera.

<i>Longitud de onda (λ)</i>
405 nm
450 nm
532 nm
635 nm
780 nm
850 nm
980 nm

Antes de iniciar con las mediciones de la posible absorción de fotones por parte de los soportes desarrollados, se tomaron medidas del espectro con el soporte sin plataforma, para determinar el espectro de absorción de la propia esfera de integración. Esta medida se consideró como la medida de control.

Se colocó el soporte con plataforma y se hizo incidir la luz de uno de los láseres dentro de la esfera, mientras que por el puerto de salida se colocó el espectrofotómetro Bluewave marca StellarNet, con un rango de detección de 195 a 1050 nm.

El espectro correspondiente a cada longitud de onda se realizó en 12 ocasiones. Para obtener los espectros, se cuantificó durante 200 ms (tiempo de integración) los fotones que llegaron al espectrofotómetro. Finalmente se obtuvo un espectro promedio de las 12 mediciones tomadas previamente para cada longitud de onda. Los espectros se adquirieron con el software Spectrawiz.

El esquema del diseño experimental para la caracterización óptica de los soportes se puede observar en la Figura 13.

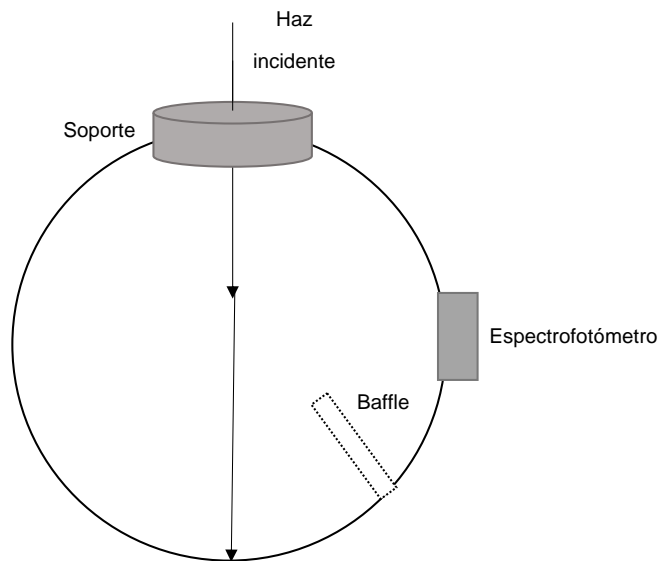


Figura 13. Diseño experimental.

5.2.5 Determinación de la absorción de fotones por los soportes

Dado que el área bajo la curva del espectro representa o es proporcional al número de fotones detectados, se obtuvo la absorción de fotones de los soportes desarrollados en este trabajo mediante la diferencia entre el área bajo la curva del espectro control promedio menos el área del espectro promedio con el soporte dentro de la esfera, determinando así el porcentaje de la absorción del soporte, lo cual se realizó con el software OriginLab.

Así, para cada medida del área bajo la curva de una longitud de onda con plataforma, le corresponde una medida del área bajo la curva de esa misma longitud de onda sin plataforma. Estas medidas fueron ordenadas en una tabla, se calculó la diferencia entre los pares de datos y el resultado fue expresado en porcentaje.

Finalmente, para determinar si existía o no una diferencia estadística significativa entre ambas mediciones, se usó la prueba t con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

5.3 Análisis de datos

Debido a que los datos obtenidos responden a una distribución normal, para el proceso de análisis e interpretación de los resultados obtenidos se utilizó la prueba estadística llamada prueba t con un nivel de significancia de 0.05 (5%). Esta prueba se usa para evaluar si dos grupos difieren de manera significativa entre sí respecto a sus medias en una variable (Hernández, 2014).

Las condiciones o grupos experimentales establecidas en este estudio para realizar la prueba t para cada longitud de onda fueron:

- a) Con plataforma.
- b) Sin plataforma.

Además, se establecieron las siguientes hipótesis estadísticas:

H_0 = Hay diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos ($\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$).

H_1 = No Hay diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos ($\bar{x}_1 = \bar{x}_2$).

Posteriormente, se obtuvieron los estadísticos descriptivos básicos: media y desviación estándar de cada grupo para cada longitud de onda.

Con el fin de contrastar la hipótesis de igualdad de medias entre dos muestras relacionadas se aplicó la prueba t . El valor estadístico que se obtiene al comparar dos variables relacionadas es el valor t , el cual se compara con el valor crítico de rechazo que se obtiene a partir del nivel de significancia que se considera para la prueba y de los grados de libertad que proporciona el número de observaciones realizadas para cada grupo. Esto se realiza buscando el valor crítico de rechazo en la tabla de valores para la distribución t . Si el valor t es menor que el valor crítico, quiere decir que no hay diferencia estadísticamente significativa entre ambas variables y que, por lo tanto, se rechaza H_0 (De La Cruz-Oré, 2013).

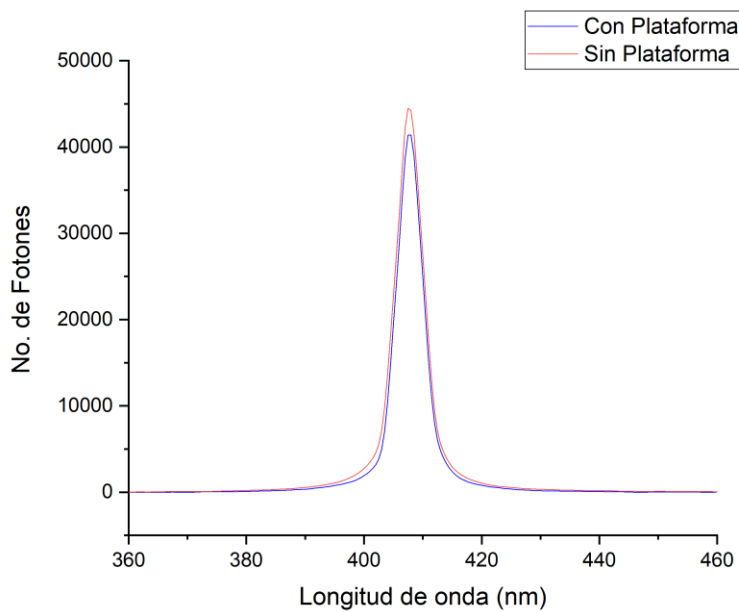
6. RESULTADOS

En este apartado se tiene como propósito desarrollar los resultados obtenidos para demostrar la influencia de los soportes en el desempeño de la esfera de integración. Se pretende que utilizar los soportes no represente una diferencia estadísticamente significativa que el no utilizarlos.

6.1. Espectros obtenidos

Se obtuvo un espectro para cada longitud de onda de cada láser disponible, con y sin soporte con plataforma durante 200 ms, en total fueron 14 espectros.

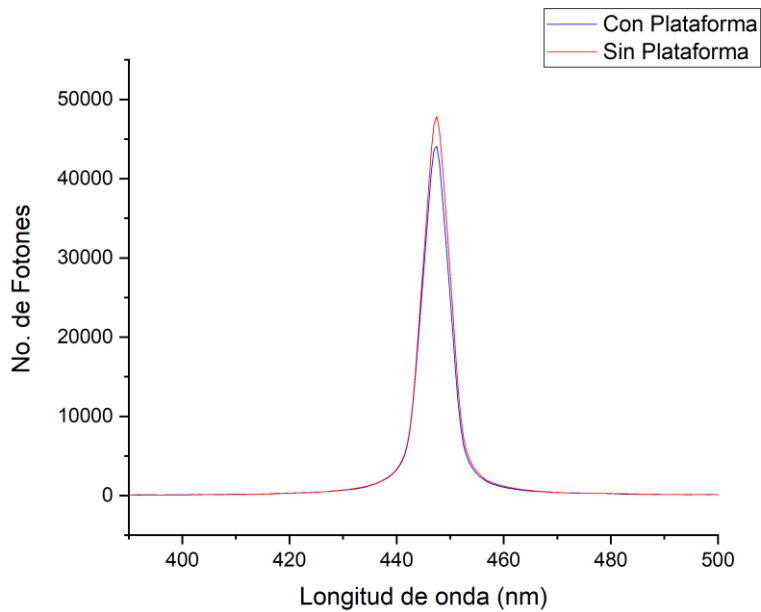
La Gráfica 1 corresponde a los espectros del láser de 405 nm, con plataforma (curva azul) y sin plataforma (curva roja), se puede observar que la cantidad de fotones que alcanza la curva roja es mayor a la cantidad de fotones de la curva azul, aunque ambas curvas superan los 40,000 fotones.



Gráfica 1. Comparación de los espectros de 405 nm con y sin plataforma.

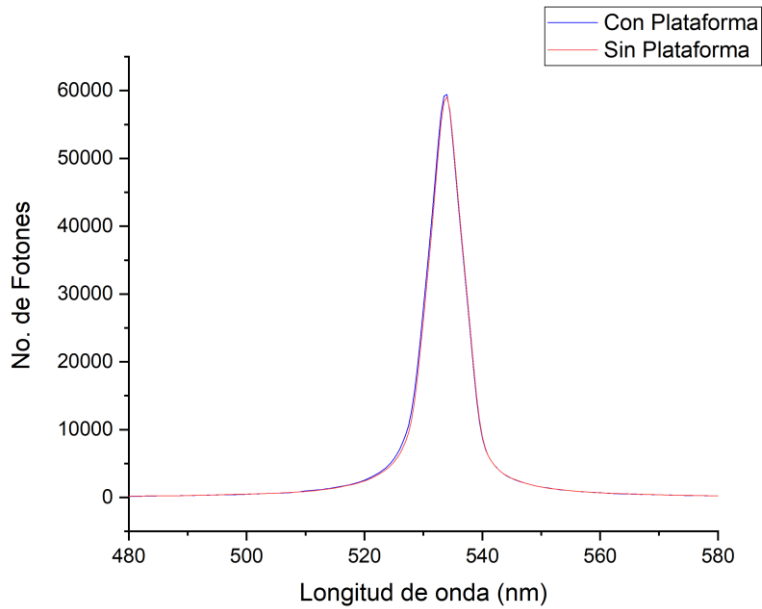
La

muestra los espectros obtenidos con el láser de 450 nm. En ambas curvas se puede observar que el conteo de fotones es mayor a 40,000, además, se puede apreciar que la curva correspondiente al espectro sin plataforma registró un mayor conteo de fotones que el espectro con plataforma.



Gráfica 2. Comparación de los espectros de 450 nm con y sin plataforma.

En la Gráfica 3 se observan los espectros con y sin plataforma del láser de 532 nm. El conteo de fotones en esta longitud de onda es mayor a 50,000. Al comparar ambos espectros, se puede notar que la cantidad de fotones del espectro que se

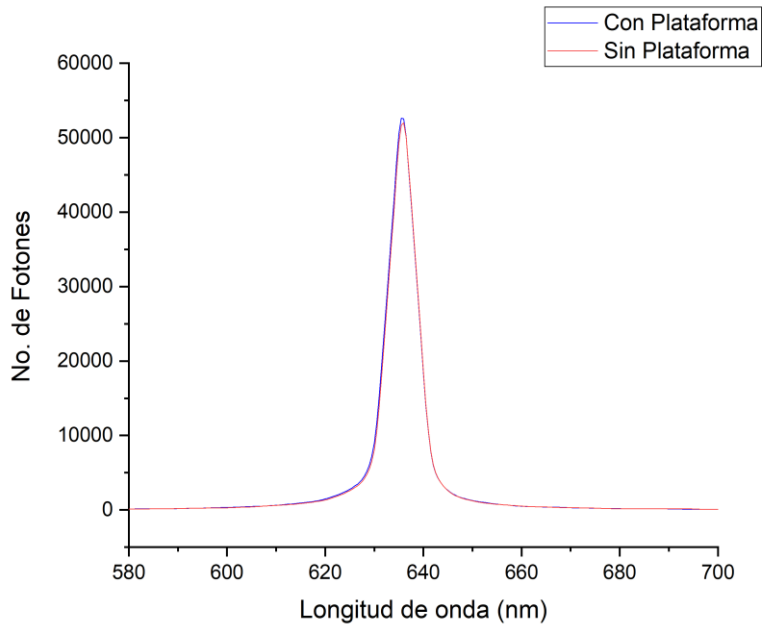


obtuvo con plataforma es ligeramente mayor al del espectro sin plataforma, caso contrario a como ocurrió con los espectros anteriores de 405 nm y 450 nm.

Gráfica 3. Comparación de los espectros de 532 nm con y sin plataforma.

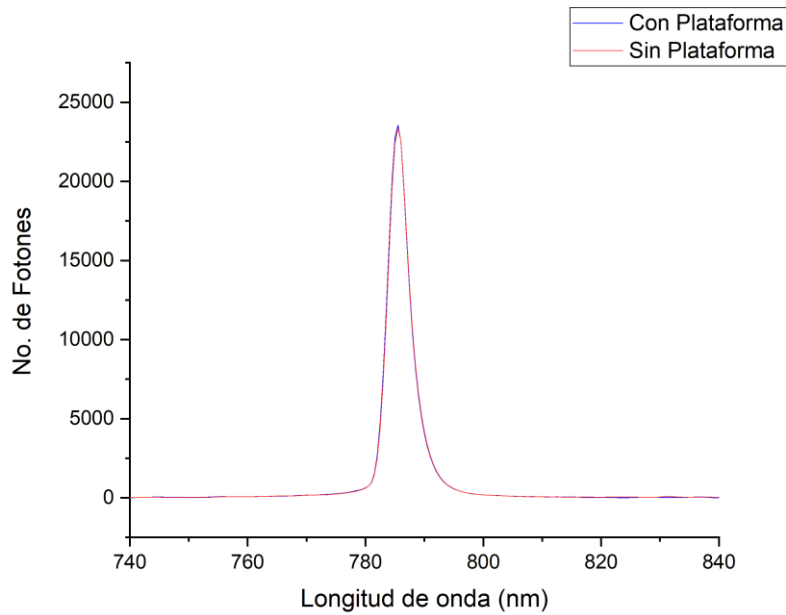
La

Gráfica 4 muestra el espectro con y sin plataforma del láser de 635 nm. En esta longitud de onda el conteo de fotones permanece mayor a 50,000. Se puede notar que el espectro con plataforma presenta una cantidad mayor de fotones que el espectro sin plataforma para esta longitud de onda al igual que ocurrió en el caso del láser de 532 nm.



Gráfica 4. Comparación de los espectros de 635 nm con y sin plataforma.

En la Gráfica 5 se puede observar el espectro del láser de 780 nm con plataforma y sin la plataforma. En esta longitud de onda se puede ver una disminución importante del número de fotones en comparación con los demás espectros, en los que el conteo de fotones oscilaba entre los 40,000 y los 60,000, mientras que, en esta longitud de onda, el conteo de fotones apenas supera los 20,000. Al comparar ambos espectros a simple vista no se puede distinguir la diferencia entre los conteos

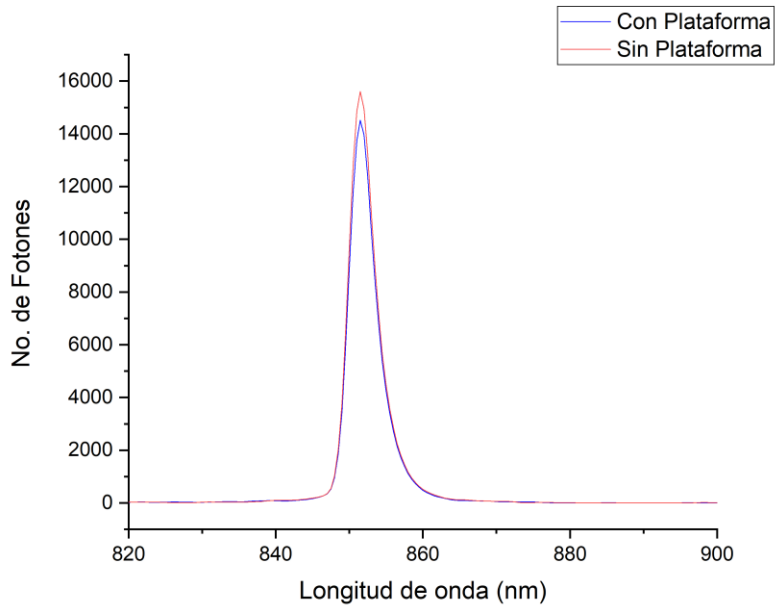


de fotones del espectro con plataforma y el espectro sin plataforma para el láser de 780 nm.

Gráfica 5. Comparación de los espectros de 780 nm con y sin plataforma.

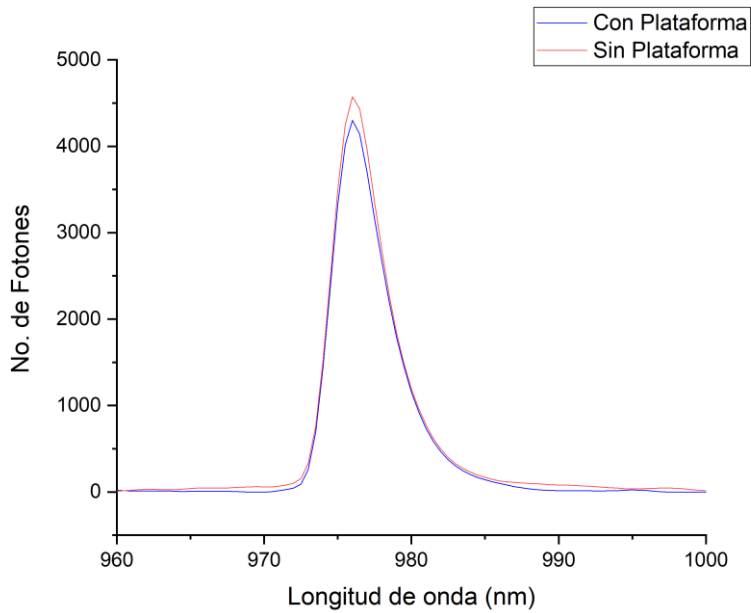
La

Gráfica 6 muestra el espectro del láser de 850 nm con plataforma y sin plataforma. El conteo de fotones para ambos espectros en esta longitud de onda es de menos de 16,000. Se logra apreciar la diferencia entre el conteo de fotones entre ambos espectros: el espectro que corresponde al láser incidiendo dentro de la esfera con el soporte sin plataforma presenta un mayor conteo de fotones que el espectro que resultó de utilizar el soporte con plataforma.



Gráfica 6. Comparación de los espectros de 850 nm con y sin plataforma.

El láser con mayor longitud de onda es el láser de 980 nm. En la Gráfica 7 se observa el espectro con plataforma y el espectro para esta longitud de onda sin plataforma. También se observa una disminución considerable del conteo de fotones, menor a 5,000. Al comparar ambas curvas, se puede ver que los espectros difieren notablemente, el espectro sin plataforma (rojo) parece presentar un mayor número de fotones que el espectro con plataforma (azul).



Gráfica 7. Comparación de los espectros de 980 nm con y sin plataforma.

6.2. Área bajo la curva de los espectros obtenidos

Después de obtener los espectros de todos los láseres con y sin plataforma, se pudo calcular el área bajo la curva de cada espectro con ayuda del software OriginLab. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Áreas obtenidas para cada longitud de onda con y sin plataforma.

Longitud de onda	Área sin plataforma	Área con plataforma	Diferencia entre áreas	Diferencia en porcentaje (%)
405nm	313252.454	266330.788	46921.6667	14.9788664
450nm	364425.542	340688.881	23736.6604	6.51344588
532nm	560684.36	562761.868	-2077.50777	-0.37053071
635nm	460262.985	467490.377	-7227.39125	-1.57027427
780nm	130967.521	128657.531	2309.99	1.76378845
850nm	78715.6458	75854.8458	2860.8	3.63434736
980nm	29400.3088	21352.7958	8047.51292	27.3722055

6.3. Prueba t

Se utilizó la prueba t para muestras independientes para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en las medias de los dos grupos (con plataforma y sin plataforma) que se consideraron para este estudio.

Los estadísticos descriptivos para la prueba t de cada longitud de onda con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, suponiendo varianzas desiguales en una distribución de dos colas, se presentan a continuación.

6.3.1. 405 nm

Para la longitud de onda de 405 nm se obtuvieron los estadísticos descriptivos que se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 405nm.

	Con plataforma	Sin Plataforma
Media	366.377139	311.497997
Varianza	9473091.91	7836040.34
Observaciones	1710	1710
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3388	
Estadístico t	0.54546605	
P(T<=t) una cola	0.29273447	
Valor crítico de t (una cola)	1.64530351	
P(T<=t) dos colas	0.58546893	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96066443	

En la Tabla 5 podemos observar que el estadístico t es el valor $t = 0.54546605$. Este valor se debe comparar con el valor crítico de t para una distribución de dos colas para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Si t es menor al valor crítico de rechazo que se muestra en la última fila de la Tabla 5, se rechaza la H_0 . Para 3388 grados de libertad, el valor crítico de rechazo es $p = 1.96066443$. Entonces, para esta longitud de onda $t < p$; por lo tanto, se rechaza H_0 , lo que quiere decir que no hay diferencia estadísticamente significativa entre ambas variables para esta longitud de onda.

6.3.2. 450 nm

Para el láser de 450 nm de longitud de onda, se va a realizar el mismo procedimiento que para el láser de 405 nm de longitud de onda: se debe obtener el estadístico t y compararlo con el valor crítico de rechazo p para un $\alpha = 0.05$. Los estadísticos descriptivos para 450 nm se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Prueba *t* para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 450 nm.

	Con plataforma	Sin plataforma
Media	426.228704	398.464649
Varianza	11573641.3	9796881.88
Observaciones	1710	1710
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3395	
Estadístico <i>t</i>	0.24835526	
P(T<=t) una cola	0.40193728	
Valor crítico de <i>t</i> (una cola)	1.64530258	
P(T<=t) dos colas	0.80387457	
Valor crítico de <i>t</i> (dos colas)	1.96066298	

En este caso $t = 0.24835526$, mientras que $p = 1.96066298$; entonces $t < p$, por lo tanto, se rechaza H_0 , lo que significa que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ambas variables para esta longitud de onda.

6.3.3. 532 nm

En el caso del láser de 532 nm se obtuvieron los estadísticos descriptivos que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Prueba *t* para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 532 nm.

	Con plataforma	Sin plataforma
Media	655.76383	642.212449
Varianza	20624373.4	20556908.1
Observaciones	1710	1710
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3418	
Estadístico <i>t</i>	0.08732361	
P(T<=t) una cola	0.4652097	
Valor crítico de <i>t</i> (una cola)	1.64529956	
P(T<=t) dos colas	0.9304194	
Valor crítico de <i>t</i> (dos colas)	1.96065828	

Para esta longitud de onda $t = 0.08732361$ y $p = 1.96065828$. Comparando ambos valores $t < p$, por lo que H_0 se rechaza, es decir, no hay diferencias estadísticamente significativas entre ambas variables para 532 nm.

6.3.4. 635 nm

La Tabla 8 contiene los estadísticos descriptivos obtenidos al realizar la prueba t para dos variables para la longitud de onda de 635 nm.

Tabla 8. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 635 nm.

	Con plataforma	Sin plataforma
Media	538.314449	546.775296
Varianza	15437851.3	15957264.4
Observaciones	1710	1710
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3417	
Estadístico t	-	
	0.06244258	
P(T<=t) una cola	0.47510702	
Valor crítico de t (una cola)	1.64529969	
P(T<=t) dos colas	0.95021404	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96065848	

Para este caso, el valor $t = -0.06244258$, mientras que el valor crítico de rechazo $p = 1.96065848$, podemos observar que $t < p$, entonces la hipótesis nula H_0 es rechazada, lo que quiere decir que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos para 635 nm.

6.3.5. 780 nm

Para la longitud de onda de 780 nm, se siguió el mismo procedimiento que en los casos anteriores, obteniendo los estadísticos descriptivos de la Tabla 9.

Tabla 9. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 780 nm.

	Con plataforma	Sin plataforma
Media	153.178387	150.474361
Varianza	2058140.08	2085998.5
Observaciones	1710	1710
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3418	
Estadístico t	0.05492775	
P(T<=t) una cola	0.47809962	
Valor crítico de t (una cola)	1.64529956	
P(T<=t) dos colas	0.95619923	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96065828	

Se puede observar que $t = 0.05492775$ y que $p = 1.96065828$, por lo que $t < p$, dejando en claro que H_0 se rechaza, lo que indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre el grupo con plataforma y el grupo sin plataforma para el láser de 780 nm.

6.3.6. 850 nm

Para el láser de 850 nm, la Tabla 10 contiene los estadísticos descriptivos obtenidos después de realizar la prueba t con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y con 3400 grados de libertad.

Tabla 10. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 850 nm.

	Con plataforma	Sin plataforma
Media	92.0650828	88.719118
Varianza	880174.593	762311.58
Observaciones	1710	1710
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3400	
Estadístico t	0.10796142	
P(T<=t) una cola	0.45701633	
Valor crítico de t (una cola)	1.64530192	
P(T<=t) dos colas	0.91403267	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96066196	

Estos resultados indican que en este caso $t = 0.10796142$ y que $p = 1.96066196$, que como en los casos anteriores, $t < p$ y que, por lo tanto, también en esta longitud de onda no hay diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos, lo que quiere decir que no se acepta la hipótesis nula H_0 .

6.3.7. 980 nm

Para el último caso, que es con 980 nm, los estadísticos descriptivos se encuentran en la Tabla 11

Tabla 11. Prueba t para dos grupos suponiendo varianzas desiguales para 980 nm.

	Con plataforma	Sin plataforma
Media	34.3834708	24.9740302
Varianza	74762.507	67011.1308
Observaciones	1710	1710
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3408	
Estadístico t	1.03338967	
P(T<t) una cola	0.15074745	
Valor crítico de t (una cola)	1.64530086	
P(T<t) dos colas	0.3014949	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96066032	

Siguiendo el mismo procedimiento para esta longitud de onda, al realizar la prueba t se obtuvo que $t = 1.03338967$, mientras que $p = 0.3014949$. Al comparar estos valores, se puede ver que $t < p$ y que entonces, la H_0 se rechaza, lo que significa que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos para esta longitud de onda.

7. DISCUSIÓN

El propósito de este trabajo fue demostrar que los soportes diseñados y construidos para sostener muestras dentro de la esfera e integración no afectan el rendimiento de la esfera, es decir, que no exista una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos con plataforma y sin plataforma.

Al hacer incidir los láseres disponibles y obtener los espectros con y sin plataforma, se obtuvo como resultado que para los láseres de 405 nm y de 450 nm, los cuales están dentro del rango del ultravioleta cercano (Skin Cancer Foundation, 2012) el conteo de fotones es de entre de 40,000 a 50,000 fotones. En este rango de longitud de onda se aprecia una diferencia entre las áreas debajo de la curva de las gráficas con y sin plataforma. En el caso del láser de 405 nm, el porcentaje de diferencia entre las áreas bajo la curva es de 14.97%, mientras que para el láser de 450 nm la diferencia es de casi la mitad (6.51%). Esto señala que conforme aumenta la longitud de onda, la diferencia entre las áreas disminuye.

Para el caso de los láseres de 532 nm y de 635 nm, prácticamente no existe diferencia alguna. En estas longitudes de onda podría decirse que utilizar o no los soportes no hace ninguna diferencia en el desempeño de la esfera. Además, hubo un incremento a más de 50,000 en el conteo de fotones, lo que descarta la idea de que entre más energética sea la longitud de onda, se pueden captar más fotones por el espectrofotómetro. La discusión física de este y el párrafo anterior se muestra más abajo.

Al observar lo que ocurrió con láser de 780 nm, el cual es un láser que ya no ve el ojo humano, debido a que su longitud de onda está dentro del infrarrojo cercano, se observa una disminución abrupta en el conteo de fotones a menos de 25,000. No obstante, los espectros con y sin plataforma para esta longitud de onda siguen siendo muy similares, con una diferencia entre las áreas bajo la curva de 1.76%.

En el caso del láser de 850 nm, el conteo de fotones también disminuyó, a menos de 16,000, y se observa que la diferencia entre el espectro con plataforma y el

espectro si plataforma se hace notoria, con un porcentaje de diferencia entre las áreas bajo la curva de 3.63%.

Por último, el láser de 980 nm presentó un conteo de fotones es muy bajo, de menos de 5,000. Asimismo, si se observa detenidamente la Gráfica 7, se puede notar que el espectro con plataforma no es tan parecido al espectro sin plataforma como era en los casos anteriores donde el láser utilizado era de una longitud de onda menor. La diferencia porcentual entre las áreas bajo la curva para esta longitud de onda es de 27.37%, claramente mucho mayor que en los casos anteriores.

Las razones por las que, en las longitudes de onda de 780 nm, 850 nm y 980 nm, el conteo de fotones es mucho menor que en el caso de los láseres de 405 nm, 450 nm, 532 nm y 635 nm, pueden ser independientes de la cubierta interior de la esfera. La absorción de energía por moléculas de gases en el ambiente podría ser un buen candidato para explicar el bajo conteo de fotones en las longitudes de onda del infrarrojo cercano. Cuando la radiación electromagnética tiene una frecuencia similar a la frecuencia vibracional molecular de un gas, se produce la absorción de energía, transformándola en movimiento molecular interno, el cual se manifiesta en un aumento de la temperatura de la molécula (IDEAM, n.d.).

La atmósfera es transparente en la parte visible del espectro, pero algunas moléculas que la conforman tienen un poder de absorción significativo en el espectro del ultravioleta, principalmente el ozono. En el caso del infrarrojo, el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, son los principales responsables de la absorción de radiación de onda larga (Collins et al., 2006). A consecuencia de esto, el conteo de fotones dentro de la esfera de integración se puede ver mermado en el espectro del infrarrojo.

Este bajo conteo de fotones en el espectro del infrarrojo confirma lo expuesto por Schutt (1974), que señala que las cubiertas de sulfato de bario, independientemente del aglutinante, no son eficientes en esta longitud del espectro. Al mismo tiempo, se recomendó que el uso de las cubiertas de sulfato de bario se restringiera al espectro visible y el ultravioleta cercano, esto se vio claramente comprobado, ya que, los láseres de 532 nm y 635 nm, cuya longitud de onda está dentro del espectro visible,

fueron los que presentaron un mayor conteo de fotones, lo cual se traduce en una baja absorción de la cubierta interna de la esfera de integración y de los soportes. De igual manera, para los láseres de 405 nm y de 450 nm, los cuales están dentro del rango del ultravioleta cercano, el conteo de fotones indica una baja absorción de luz por parte de los soportes y del interior de la esfera de integración.

Se debe tener cuidado al hacer incidir luz de menor longitud de onda dentro de la esfera, ya que Minematu (1983), indica que los componentes de la cubierta de sulfato de bario con alcohol polivinílico pueden presentar una fuerte absorción de luz UV, lo cual alteraría las medidas tomadas por el espectrofotómetro.

Para demostrar que utilizar los soportes diseñados y construidos en este trabajo no representa una diferencia estadísticamente significativa que el no utilizarlos, se aplicó la prueba t con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ a cada longitud de onda para dos grupos, con plataforma y sin plataforma.

Los resultados han señalado que, para el caso del láser de 405 nm, no hay diferencia estadísticamente significativa entre los grupos con plataforma y sin plataforma. Esto se repite para los casos del láser de 450 nm, 532 nm, 635 nm y de 780 nm, que es lo que se esperaba desde que se calculó la diferencia entre las áreas bajo la curva de cada longitud de onda.

Aunque se esperaba que la prueba t señalara que hay diferencia estadísticamente significativa entre los grupos con plataforma y sin plataforma para las longitudes de onda más largas, en el caso del láser de 850 nm la prueba t indicó que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los grupos y esto también ocurrió para el láser de 980 nm. Sin embargo, en esta última longitud de onda, el estadístico t estuvo muy cerca de ser igual al valor crítico p, esto se puede observar en la Tabla 11.

Respecto a la hipótesis planteada para este estudio (es factible sostener muestras líquidas o portaobjetos dentro de una esfera de integración con un soporte cuyo recubrimiento presente absorción y dispersión de fotones que no afecten significativamente las mediciones hechas dentro de la esfera comparadas con las

mediciones hechas sin el soporte) se puede decir que los resultados obtenidos indican que se ha cumplido.

Un acierto muy importante en el diseño de las piezas fue la reducción considerable del port fraction. Mientras que, el puerto de entrada original de la esfera es de 2 pulgadas de diámetro (5.08 cm) y el puerto de salida de 0.25 pulgadas (0.635 cm), generando un port fraction de $f = 0.177259$, al utilizar cualquiera de los dos soportes construidos en este estudio, cuyo puerto de entrada es de 0.25 pulgadas (0.635 cm), se obtiene un port fraction de $f = 0.00545415$, mucho menor al port fraction que se genera con el puerto de entrada original. Como señaló Pike Technology (2013) y LABSPHERE (2008), factores como el diámetro de la esfera y el port fraction, son fundamentales cuando se habla de la radiancia de la esfera, no solamente la composición de la cubierta reflectante. Al tener un port fraction pequeño, producto de utilizar los soportes, la radiancia se ve incrementada y esta puede ser una de las razones por las que los soportes no influyen en el desempeño de la esfera de integración. No obstante, este estudio no tiene como propósito dar explicación a las causas por las que el desempeño de la esfera se puede ver afectado.

Por último, se debe mencionar que los soportes han cumplido con su propósito principal, que es poder sostener distintos tipos de muestras dentro de la esfera de integración. Actualmente ya hay trabajos que se están desarrollando dentro del laboratorio de Simulación Monte Carlo y Dosimetría (LSMD) de la Facultad de Medicina de la UAEMéx con ayuda de la esfera de integración, haciendo uso de los soportes diseñados y construidos en este trabajo.

8. CONCLUSIONES

Se concluye que la reflectividad de la cubierta interior de la esfera se ve muy reducida al hacer incidir luz de onda larga, independientemente del uso de los soportes. Fue claro que la cubierta de sulfato de bario no es la ideal para realizar estudios que involucren radiaciones de baja frecuencia a partir de 780 a 980 nm y alta frecuencia debajo de 450 nm. En consecuencia, esto revela que utilizar los soportes con luz de este rango de longitud de onda, definitivamente puede llegar a tener efectos no deseados en el desempeño de la esfera de integración.

En general se concluye que las propiedades ópticas de los soportes son muy similares a las propiedades de la cubierta interior de la esfera que es fabricada por una empresa especializada en la producción de dispositivos ópticos, mientras que la cubierta de los soportes se desarrolló y fabricó en un laboratorio que no se dedica a este tipo de proyectos, lo cual representa todo un éxito debido a los resultados obtenidos.

9. REFERENCIAS

- Almog, I. F., Bradley, M. S., & Bulovi, V. (n.d.). Lorentz model. *MIT OpenCourseWare*, 1–34.
- Aranda, L. (2013). *Modelado de tejido biológico con maniquí de gel de agar para dosimetría del 99m Tc*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Bilhim, T., Pisco, J. M., Duarte, M., & Oliveira, A. G. (2011). Polyvinyl alcohol (PVA). Chemical and Technical Assesment (CTA). *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 22(1), 21–27. En <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2010.09.018>
- Centers for Disease Control and Prevention. (2015). *What is Radiation?* Radiation and Your Health. En https://www.cdc.gov/nceh/radiation/what_is.html
- Collins, W. D., Lee-Taylor, J. M., Edwards, D. P., & Francis, G. L. (2006). Effects of increased near-infrared absorption by water vapor on the climate system. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(18), 1–13. En <https://doi.org/10.1029/2005JD006796>
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2009). Tema 2: interacción de de la radiación con la materia ©. *Curso de Supervisores de Instalaciones Radiactivas (IR) Modulo Basico*. En https://l.facebook.com/l.php?u=http%3A%2F%2Fcsn.ciemat.es%2FMDCSN%2Frecursos%2Fficheros_md%2F133100241_2411200913036.pdf&h=ATODqfPumN7vhdQxZt31_NUy8rcNtAUx0ydFVnPeLOKPT1w5j5cQ39wE_Cmcb91xx5TIsSFQ0AKuRHWdW5StTpYFYjp2JeZzluk7bK7u7y-jBZ5mmDQ
- De La Cruz-Oré, J. L. (2013). ¿Qué significan los grados de libertad? *Revista Peruana de Epidemiología*, 17(1), 1–6. En <https://doi.org/1609-7211>
- Deng, F. (n.d.). *Attenuation Coefficient*. Radiopaedia. En <https://radiopaedia.org/articles/attenuation-coefficient>
- Domínguez Miranda, M. A. (2012). *Diseño de un espectrofotómetro de dos mediciones simultáneas para recubrimientos inhomogéneos*. Universidad

Nacional Autónoma de México.

Fernández, P. (2008). Propiedades ópticas de materiales utilizados en procesos térmicos de energía solar. *Procesos Termosolares En Baja, Media y Alta Temperatura*, 43, 37–58.

Grum, F., & Luckey, G. W. (1968). Optical Sphere Paint and a Working Standard of Reflectance. *Applied Optics*, 7(11), 2289–2294. En <https://doi.org/10.1364/ao.7.002289>

Gruyitch, L. (2015). Nature and Properties of Time. *Time and Consistent Relativity*, 61–144. En <https://doi.org/10.1201/b18462-6>

Hamamatsu Photonics. (n.d.). *The basic nature of light*. Photon Terrace. En <https://photonterrace.net/en/photon/behavior/>

Hecht, E. (2012). *Optics* (P. Education (ed.); 4th editio). Addison Wesley.

Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación* (McGRAW-HILL (ed.); 6th editio, Vol. 148).

IDEAM. (n.d.). *LA RADIACIÓN SOLAR Y SU PASO POR LA ATMÓSFERA*. Tiempo y Clima. Retrieved October 11, 2021, from En <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera>

INAOE. (n.d.). *Chapter 1: ¿Qué es la luz?*

Jim, C. (2020). *The Beer-Lambert Law*. Chemistry Libretexts. En [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy_Basics/The_Beer-Lambert_Law](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy_Basics/The_Beer-Lambert_Law)

Knighton, N., & Bugbee, B. (n.d.). *A Mixture of Barium Sulfate and White Paint is a Low-Cost Substitute Reflectance Standard for Spectralon® Paint* (Issue Figure 1).

- LABSPHERE. (2008). *Technical Guide: Integrating Sphere Theory and Applications*.
- LBP Optics. (2014). *Reflectivity of Aluminium – UV, Visible and Infrared*. En <https://laserbeamproducts.wordpress.com/2014/06/19/reflectivity-of-aluminium-uv-visible-and-infrared/>
- Minematu, Y., & Hosoda, M. (1983). Barium sulfate high reflectance materials used for polymer weatherability studies. *Journal of Light and Visual Environment*, 7(2), 14–17.
- New Technologies Research Centre. (n.d.). *Reflectivity*. University of West Bohemia. En <https://ttp.zcu.cz/en/laboratories/optical-properties/optical-properties/reflectivity>
- Ostwald Wilhelm. (1933). *Color science* (Winsor and Newton (ed.)). London.
- Pike Technology. (2013). Integrating Spheres - Introduction and Theory. In *Application Note*. En <https://www.piketech.com/files/pdfs/IntSpheresAN1313.pdf>
- Rehman, A. ul, Ahmad, I., & Qureshi, S. A. (2020). Biomedical Applications of Integrating Sphere: A Review. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 31(March). En <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.101712>
- Rivero, Nicolás; Cardozo, Andrés; Pérez, Guzmán; Sellanes, M. (2010). *Medida de Flujo Luminoso en Esfera de Ulbricht. Estudio de Incertidumbres. Intercomparación con Cálculo por Integración*.
- Schutt J., Holben B., Shai Ch., H. J. (1981). Reflectivity of TFE—a washable surface— compared with that of BaSO₄. *Applied Optics*, 20(12), 3. En <https://doi.org/10.1097/00126334-200103010-00014>
- Schutt, J. B., Arens, J. F., Shai, C. M., & Stromberg, E. (1974). Highly Reflecting Stable White Paint for the Detection of Ultraviolet and Visible Radiations. *Applied Optics*, 13(10), 2218–2221. En <https://doi.org/10.1364/ao.13.002218>
- Shai, M. Charles; Schutt, B. J. (1971). Formulation procedure and spectral data for

a highly reflecting coating from 200 nm to 2300 nm. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Skin Cancer Foundation. (2012). *Understanding UVA and UVB*. Prevention. En <https://web.archive.org/web/20120501231522/http://www.skincancer.org/prevention/uva-and-uvb/understanding-uva-and-uvb>

Somera, L. (2013). *Cálculo por Monte Carlo de la reflectancia y la transmitancia de luz laser en un medio semi-infinito*. Universidad Autónoma del Estado de México.

StellarNet Inc. (n.d.). *StellarNet Integrating Spheres*. Retrieved June 24, 2021, from En <https://www.stellarnet.us/spectrometers/integrating-spheres-and-tubes/>

Taylor, J. L. (2013). *Integrating Sphere Functionality: The Scatter Transmission Measurement*.

Wake, L. V, & Brady, R. F. (1993). Formulating Infrared Coatings for Defence Applications. In *Materials Research Laboratory*.