

## ANEXOS

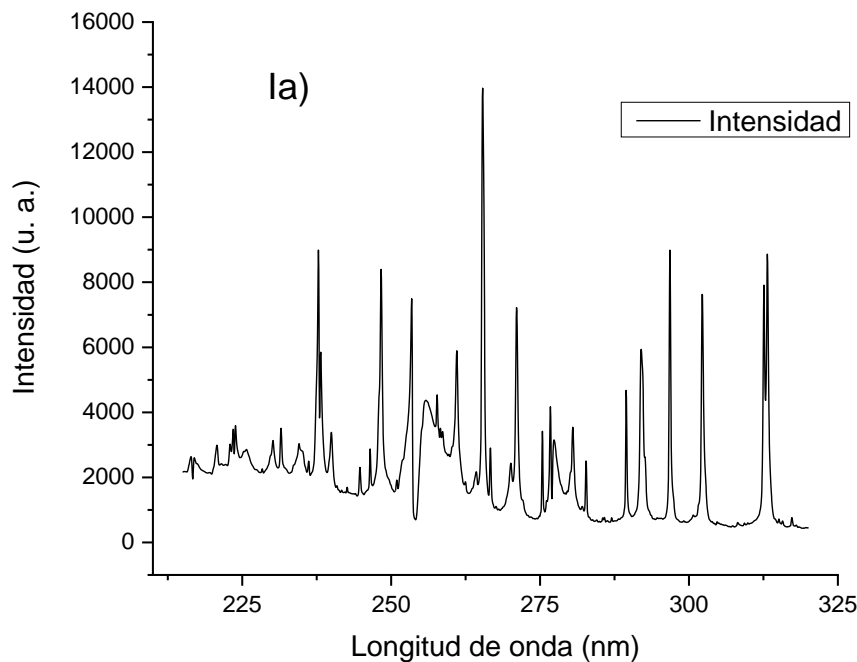
A1) Detalles de la fuente de emisión. Análisis del tipo de fuente a partir del espectro y comparativa con lámpara tradicional germicida.

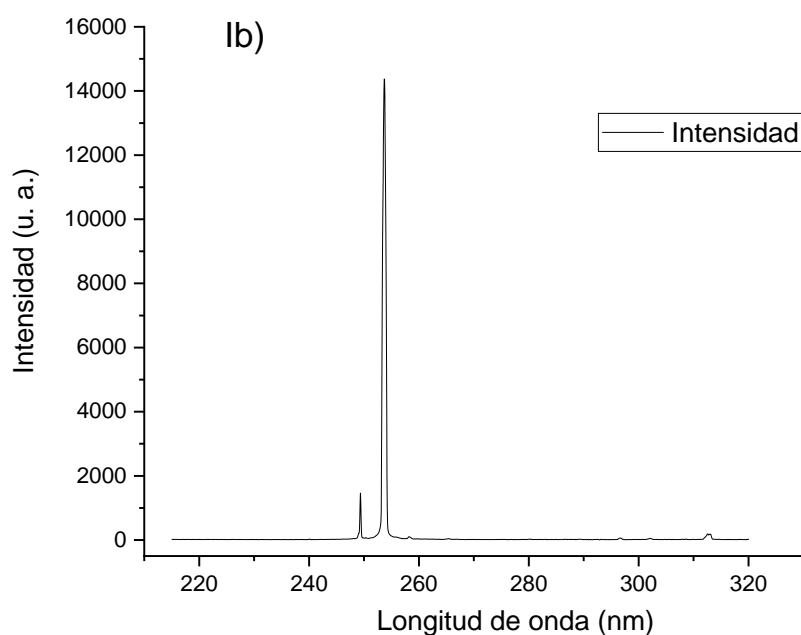
A2) Detalles de la calibración del sensor.

### Anexo A1

#### A1a) Detalles técnicos sobre el espectro de la fuente.

La fuente de emisión de UV estudiada consiste en una lámpara de descarga de gas de mercurio a baja presión. Debido a las temperaturas alcanzadas (entre 1000 K y 2000 K) y a las dimensiones de la celda de descarga (aproximadamente cilíndrica, con un diámetro de 15 mm y una longitud de 27mm), se la considera una fuente de gran espesor óptico (en espectroscopia se conoce como “fuente ópticamente gruesa”), por lo que se experimenta un fenómeno de autoabsorción muy marcado<sup>9,11</sup>. Esto significa que las líneas del espectro de emisión no responden a un modelo de plasma delgado, apareciendo más bajas y más anchas de lo esperado e incluso, con una pronunciada disminución en la zona central de cada perfil<sup>11</sup>. Esto último es totalmente visible en la línea de 254 nm [Figura A1-Ia)], donde la intensidad total de la línea resultante es incluso más baja que varias en la misma zona espectral. Para la comparativa, en la Figura A1-Ib) se muestra el espectro correspondiente al tubo comercial usado como referencia. También, sumados a la autoabsorción, en este tipo de fuentes se observan ensanchamientos de líneas muy marcados debidos a los efectos Doppler y Stark<sup>9-12</sup>.





Figuras A1 Ia y Ib. Se muestran los espectros UV en el rango de 215 nm a 320 nm. En Ia) se tiene la fuente en estudio, en donde se puede observar una diversidad de líneas de Hg I. También se tiene una marcada autoabsorción de la línea a 254 nm (depresión pronunciada), que es característica de un plasma ópticamente grueso. En Ib) se tiene el espectro de la lámpara comercial utilizada típicamente en esterilización. Se puede observar claramente la línea a 254 nm, característica de la emisión de Hg I correspondiente a condiciones de plasma delgado. En ambos casos, los límites espectrales se eligieron en función de la respuesta del sensor UV Advanced Photonix modelo SD008-2161-112 fotodiodo, con el cual se mide la irradiancia (curva de calibración).

A1b) Estudio de autoabsorción y evolución de la intensidad después del encendido.

Para demostrar el efecto de autoabsorción, se realizaron registros en situaciones con plasmas a diferentes temperaturas. Específicamente, se estudió el espectro de emisión en dos etapas de formación del plasma. En la primera etapa (plasma más frío), se tomaron registros a los 15 s desde el inicio de la descarga (tiempo postencendido de la lámpara), donde fue posible registrar un espectro de líneas ligeramente delgadas, lo que permite identificar los componentes del gas y obtener información sobre el espectro en régimen de trabajo (150 s después del inicio de la descarga).

El espectro de la fuente se estudia entre 225 nm y 278 nm, con un tiempo de adquisición de datos de entre 2 y 10 segundos según la intensidad de la señal a registrar. Estas velocidades de adquisición de datos permiten tomar un espectro al inicio de la descarga, reduciendo los efectos térmicos, y compararlo con el espectro obtenido en el mismo rango a temperatura de trabajo.

La Figura A1-II muestra el espectro emitido por la fuente y corresponde al estado transitorio, 15 s después del inicio de la excitación, donde es posible identificar que todas las líneas en el espectro corresponden principalmente a Hg I<sup>8</sup>. La Figura A1-III corresponde al régimen estacionario de trabajo (luego de los 150 s de encendido), donde es posible observar la absorción total de la línea de 254 nm [detalle de la Figura A1-Ia)]. Sin embargo, más allá de

la alta absorción de la línea de 254 nm, se observaron líneas muy intensas alrededor de 230 nm. También se verificó que hay un aumento en la intensidad integrada del espectro en función del tiempo hasta alcanzar un máximo en el régimen de funcionamiento (entre 180 y 200 s después del encendido). Esta evolución se puede apreciar en la Figura A1-IV.

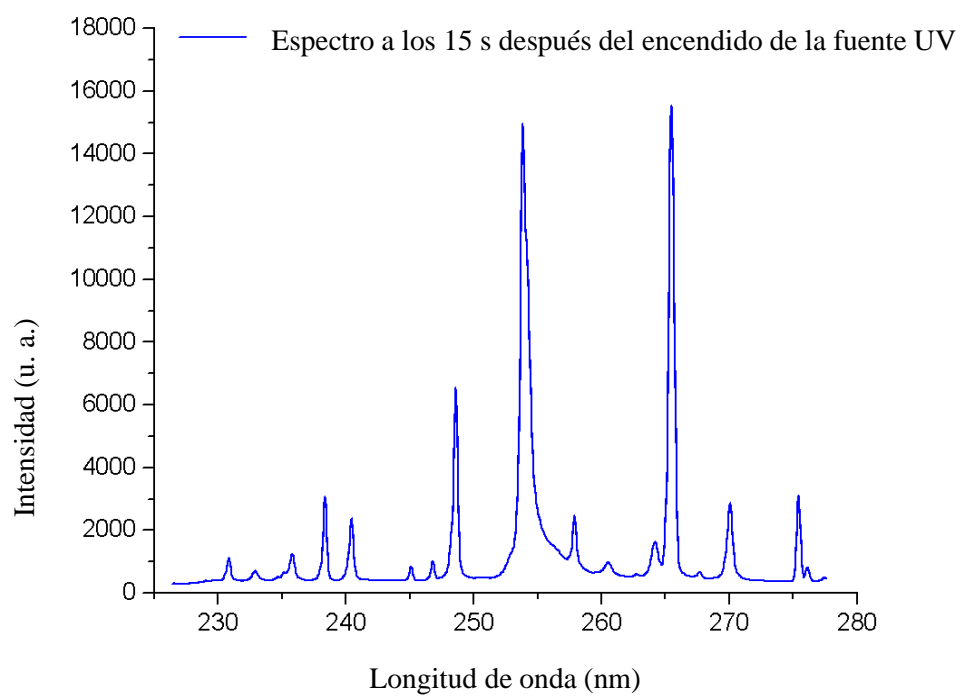


Figura A1 II. Los espectros de la fuente en estudio están entre 225 y 278 nm en un tiempo 15 s después del encendido. En este caso se pueden observar líneas delgadas correspondientes a Hg I.

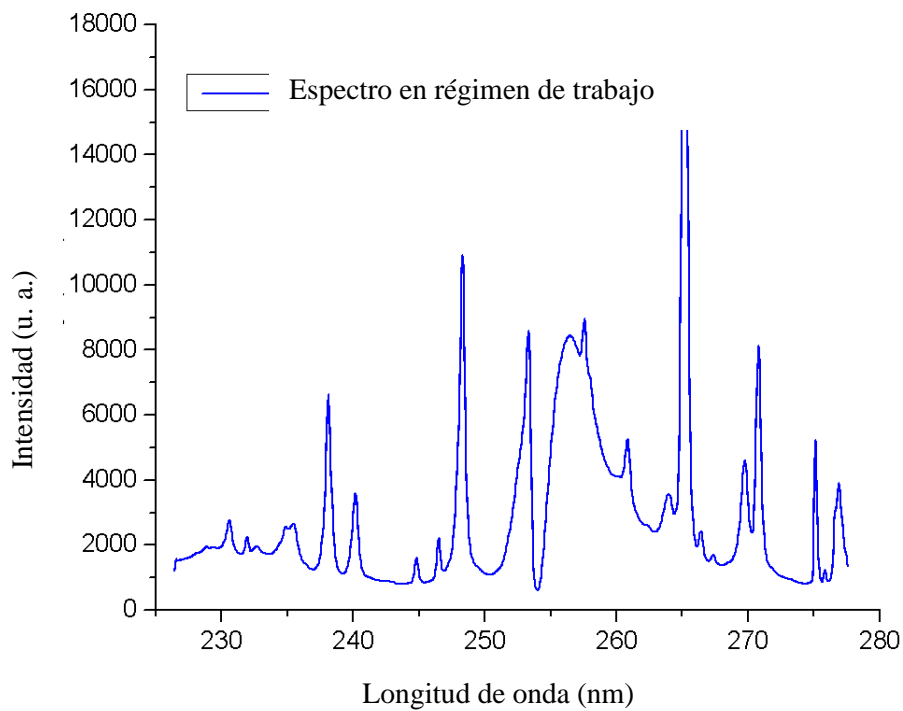


Figura A1 III. En este registro se observa el espectro obtenido en modo de funcionamiento, después de 150 s de encendido. En estas condiciones, la fuente alcanza la temperatura máxima de trabajo. Se observa el ensanchamiento de las líneas espectrales debido al efecto Doppler y la autoabsorción en la línea característica de 254 nm debido al espesor óptico. El espectro muestra una emisión cuasicontinua, con líneas distintivas de Hg I. Algunas líneas saturan el arreglo de fotodiodos utilizado como sensor en el espectrómetro, mostrando un recorte en el pico de emisión. Se puede apreciar la diferencia en la intensidad relativa al comparar ambas curvas.

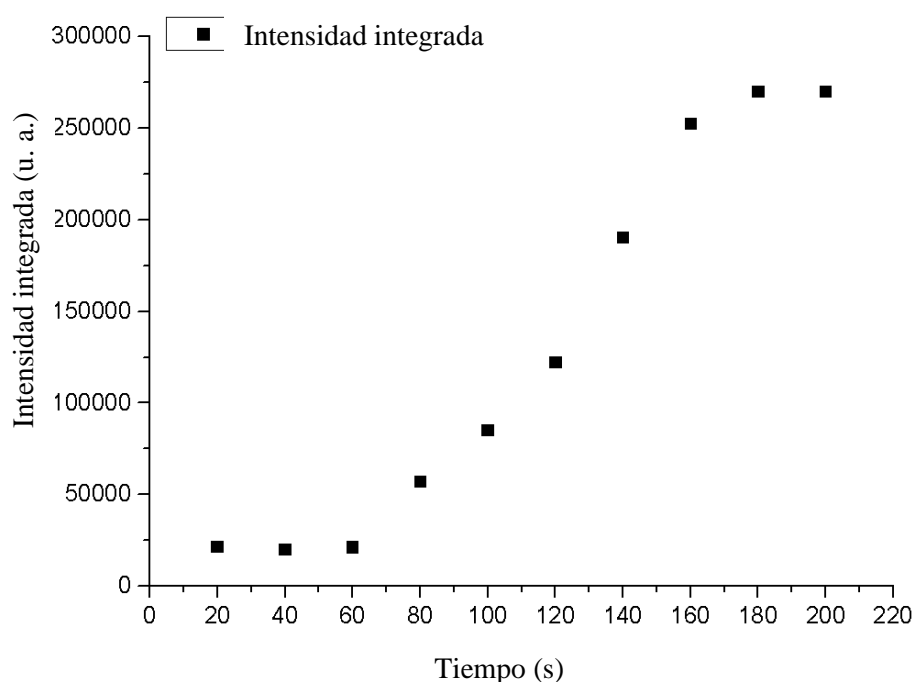


Figura A1 IV). Evolución del espectro integrado de la fuente en la región de 225-278 nm. La integral observada se consideró cada 20 segundos y muestra cómo la intensidad integrada total aumenta hasta alcanzar un valor máximo de entre 180 y 200 segundos.

#### A1c). Comparativa con fuente germicida comercial tradicional y estudio con reflector.

Con el fin de comparar, se realizaron mediciones de irradiancia en función de la distancia tanto para el tubo comercial tradicional de UV (utilizado en saneamiento) como para la fuente de UV estudiada en este trabajo, como se puede ver en la Figura A1 V. En el caso del tubo comercial de UV, los puntos de registro de distancia se ubicaron en una línea transversal y en el centro de su eje. Comparativamente, la irradiancia fue mayor para la fuente puntual que para el tubo comercial de UV a distancias cortas y similar a distancias largas. Con la fuente de UV-C en régimen, se midió la distribución espacial de la irradiancia en función de la distancia a la fuente. Por otro lado, se realizaron registros de irradiancia para determinar la influencia de la incorporación de un reflector a la lámpara en estudio, en donde es interesante destacar que la fuente sin el reflector se comportó como una fuente puntual. En la Figura A1 VI se comparan las irradiancias en un plano a una distancia de 30 cm para la fuente con y sin reflector. En este caso, la irradiancia sin el reflector disminuyó en un orden de magnitud en comparación con la fuente con reflector en el mismo plano de observación (ver Figura A1 VI). En este ejemplo, la irradiancia obtenida de la fuente con reflector fue de aproximadamente  $1100 \text{ W/m}^2$  (en promedio) en una superficie plana y circular de 20 cm de diámetro, mientras que, para la fuente sin revestimiento, la irradiancia fue de aproximadamente  $230 \text{ W/m}^2$  sobre una esfera de radio de 30 cm (aumentando su valor hacia la fuente).

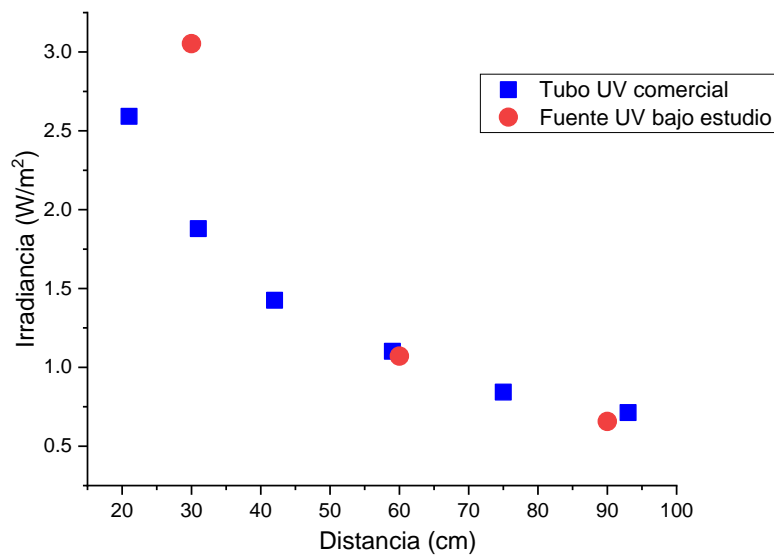


Figura A1 V. Valores de irradiancia en función de la distancia para un tubo comercial de UV tradicional (utilizado en saneamiento) y la fuente de UV estudiada. En el caso del tubo de UV, los puntos de registro de distancia se ubicaron en una línea transversal y en el centro de su eje. Comparativamente, la irradiancia fue mayor para la fuente puntual que para el tubo comercial de UV a distancias cortas y comparable a distancias largas.

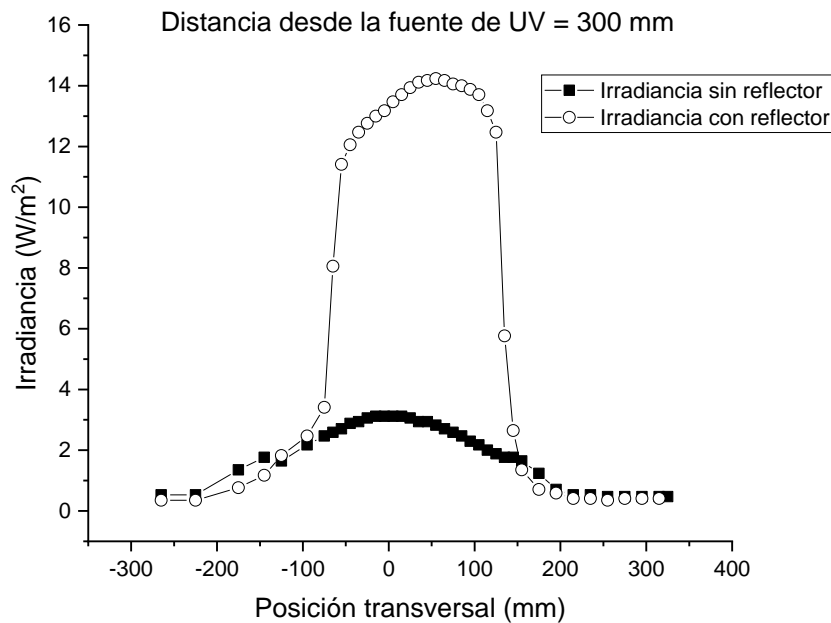


Figura A1 VI. Patrones de irradiancia a distancias transversales para configuraciones con y sin reflector en un plano ubicado a una distancia de 300 mm.

Por último, se realizaron registros de irradiancia a diferentes distancias de la fuente. La curva de irradiancia (Figura 5) se tomó a lo largo de una línea recta transversal a la fuente (un plano). El área iluminada tiene simetría rotacional. Como se muestra en la Figura A1 VII, hay una zona de iluminación con una ligera variación de irradiancia que abarca aproximadamente 300 mm de diámetro. La irradiancia registrada varió muy poco entre los 600 y 300 mm de distancia a la fuente y con una baja dispersión. También se observa una caída abrupta de la irradiancia para distancias mayores a 150 mm desde el centro de la zona iluminada, debido principalmente a la forma parabólica del espejo. A una distancia de 900 mm de la fuente, la irradiancia disminuye aproximadamente un 17 % en la zona central, mostrando una irradiancia no uniforme. Las asimetrías observadas en las curvas se deben a que la fuente no es puntual.

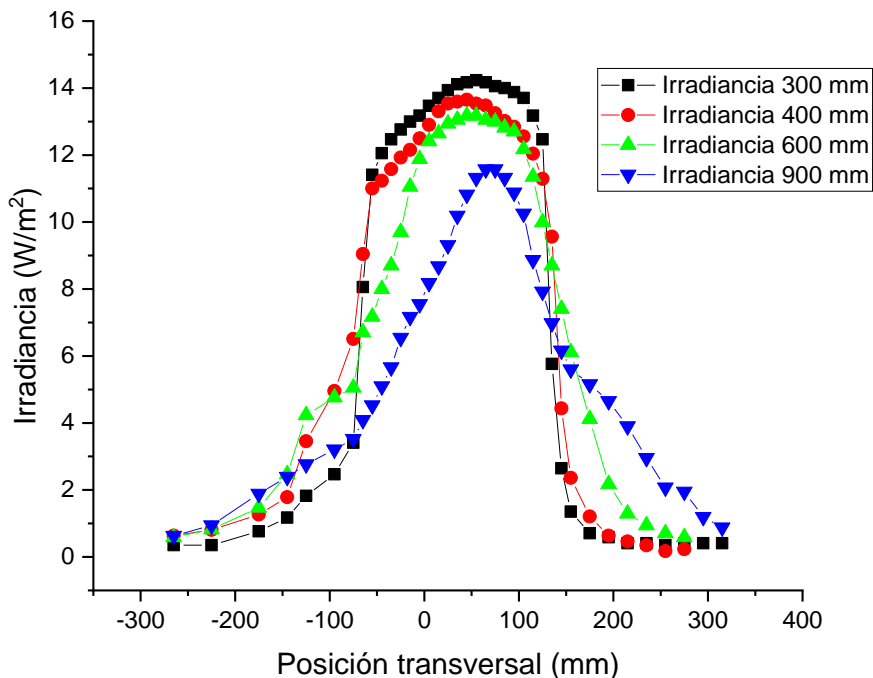


Figura A1 VII. Patrones de irradiancia de la fuente de UV con reflector (mediciones transversales) en función de las distancias.

Con esta configuración, es posible obtener una irradiancia promedio de UV-C de  $13,2 \text{ W/m}^2$  a una distancia de entre 300 mm y 500 mm de la fuente, iluminando un área (aproximadamente constante) de  $0,071 \text{ m}^2$  (zona plana mostrada en la Figura A1 VII).

## A2) Sobre el sensor de medición de irradiancia.

A2 a) Descripción del sensor y su calibración.

Para la medición de la irradiancia, se diseñó un sensor de UV-C cuyo componente principal es un fotodiodo tipo Schottky, fabricado por Advanced Photonix, modelo SD008-2161-112. El sensor se calibra utilizando la intensidad de corriente medida por unidad de potencia como una función de longitud de onda (la función de respuesta) proporcionada por el fabricante<sup>7</sup>. Con un amplificador acoplado a la salida del circuito del fotodiodo, es posible obtener la corriente generada en el fotodetector, que se estima indirectamente registrando una diferencia de potencial.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la distribución espectral de la fuente se encuentra dentro de los parámetros de detección del fotosensor. Para ello, se utilizó el registro espectral ya detallado anteriormente [Figura A1-1a)]. Para la estimación final de todos los registros expresados en unidades de irradiancia, se debe considerar la contribución de cada línea que aporta una cierta potencia  $P_i$  a la potencia total  $P_T$  en la región espectral observada. Una vez obtenido el espectro de emisión, se realizó una calibración de la fuente y un estudio de la distribución espectral de la irradiancia.

A2 b) Efectividad del sensor de UV. Extrapolación con otras regiones de UV.

El sensor registra en un rango limitado de entre 215 y 320 nm y considerando que las líneas de emisión son de Hg I, utilizando datos de la respectiva referencia NIST para Hg I<sup>8</sup>, se puede extrapolar una irradiancia total del espectro UV (entre 100 y 400 nm) emitido por la fuente. Se muestra un ejemplo en la Tabla 1. El espectro indicado como Región 1 se obtiene únicamente en un alto vacío. Específicamente, alrededor del 98% de la emisión de UV para Hg I se encuentra en la Región 2, donde el sensor está activo.

**TABLA 1.** Relaciones calculadas de irradiancia UV fuera de la región del sensor (regiones 1 y 3) para el espectro de líneas de emisión de Hg I y un plasma ópticamente delgado.

	Rango espectral (nm)	Suma de las intensidades relativas (u. a.) NIST	Proporción de la irradiancia registrada
Región 1	100-215	5600	0,00595
<b>Región 2 (sensor)</b>	<b>215-320</b>	<b>920 950</b>	<b>0,97791</b>
Región 3	320-400	15 200	0,01614