

Universidad de la República Facultad de Ingeniería



# UVCam : Sistema para detección y cuantificación de emisiones industriales de $SO_2$

Memoria de proyecto presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República por

## César Gastón BELSTERLI BRUN Matías OSORIO MIRAMBELL

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA.

#### TUTORES

Dra. Erna Frins..... Instituto de Física Ing. Miguel Barreto..... Instituto de Ingeniería Eléctrica

#### TRIBUNAL

Ing. Alicia Fernández	Instituto de Ingeniería Eléctrica
Dr. Ing. Gregory Randall	Instituto de Ingeniería Eléctrica
Dra. Erna Frins	Instituto de Física
Ing. Miguel Barreto	Instituto de Ingeniería Eléctrica

Montevideo martes 26 agosto, 2014

UVCam : Sistema para detección y cuantificación de emisiones industriales de SO<sub>2</sub>, César Gastón BELSTERLI BRUN Matías OSORIO MIRAMBELL.

Esta tesis fue preparada en IAT<sub>E</sub>X usando la clase iietesis (v1.1). Contiene un total de 128 páginas. Compilada el martes 26 agosto, 2014. http://iie.fing.edu.uy/

# Agradecimientos

En primer lugar quisiéramos agradecer a nuestras familias, novias y amigos que a lo largo de todo este camino, nos han apoyado, brindando siempre esa compañía fundamental en las malas y las sonrisas en las buenas.

También agradecer a la profesora Erna Frins y el profesor José Ferrari por el constante apoyo e intercambio de ideas, dado que sin ello este proyecto no hubiera podido ser realidad, además de otorgarnos todo el equipo disponible en el Laboratorio de Óptica Aplicada para realizar todas nuestras pruebas.

Una pieza fundamental de este proyecto fue la gran compañía de nuestros compañeros Nicolás Casaballe, Javier Ramos y Paula Gervasini que día a día nos vieron pelear con todas las dificultades y siempre estuvieron ahí para darnos un consejo, sugerencias o simplemente brindarnos un chiste para despejarnos.

Fue fundamental el aporte de los integrantes del Taller de Mecánica Fina del Instituto de Física, Antonio Saez y Joaquín Fernández, que constantemente nos ayudaron en el proceso de creación de distintos tipos de piezas para el armado final y de tan excelente precision y calidad que sin ellos, el proyecto no se podría haber completado a tiempo.

También queremos agradecer a Matías Di Martino y Joselo Nunes por su ayuda a la hora de consultarles sobre procesamiento de imágenes.

Es muy probable que estas líneas olviden a mucha gente que durante este año y cuatro meses nos ayudó de una manera u otra, por lo que a todos les decimos

#### **iiiMUCHAS GRACIAS!!!**

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

A NUESTROS ABUELOS

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Resumen

En la presente memoria de proyecto se presenta el desarrollo UVCam que permite la cuantificación remota de emisiones atmosféricas industriales de  $SO_2$ . Para implementarlo se utilizaron dos cámaras CCD con una amplia respuesta espectral abarcando desde los 300 nm hasta los 1000 nm y con control interno de temperatura, dos filtros ópticos pasabanda centrados en 310 nm y 330 nm, celdas de calibración de dióxido de azufre y el software integrador desarrollado para el correcto funcionamiento. Dicho software consistió en la creación del programa de adquisición de imágenes y control de las cámaras UVCam desarrollado en C++y el programa de evaluación y procesamiento de imágenes con el mismo nombre desarrollado en MatLab. Además se caracterizaron elementos como consumo y efecto de corriente de oscuridad en las cámaras CCD, parámetros característicos de los filtros, desempeño de los distintos algoritmos propuestos para el procesamiento y evaluaciones de imágenes y se estableció un procedimiento de calibración. El procesamiento de imágenes consistió en obtener la superposición de dos imágenes tomadas con dos cámaras, desde puntos casi idénticos. El procesamiento finaliza realizando los algoritmos para que las imágenes puedan ser evaluadas mediante la técnica DOAS a través del software desarrollado. Dicho software tiene la capacidad de realizar las correcciones debidas al efecto de corriente de oscuridad, realizar la calibración del sistema a través de las celdas y obtener la concentración de la emisión en absorbancia aparente o ppm.m.

El sistema completo se testeó a través de medidas de campo los días 15 y 16 de abril de 2014. Se midieron las emisiones de la refinería de combustible ubicada en el barrio de "La Teja", localizada en la ciudad de Montevideo, Uruguay. Se tomaron imágenes de las emisiones, se las procesó y evaluó mediante dos métodos basados en DOAS, obteniendo valores de aproximadamente 800 ppm.m para el día 15, y 900 ppm.m para el día 16. Además se pudo comprobar que ambos métodos de evaluación presentados funcionaron correctamente de acuerdo a lo esperado.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Tabla de contenidos

Agrad	lecimientos	I
Resur	nen	$\mathbf{v}$
1. Int	roducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Descripción del proyecto	2
1.3	Antecedentes	2
1.4	Objetivos del Proyecto	3
	1.4.1. Objetivos Específicos	3
1.5	Alcance	4
1.6	Criterios de éxito	4
1.7	Actores	5
1.8	Restricciones	5
1.9	Descripción del documento	6
2. Fu	ndamento teórico	7
2.1	Contaminación atmosférica	7
	2.1.1. Métodos de medición de contaminantes atmosféricos	8
	2.1.2. Imagenología espectral	12
2.2	Filtros Ópticos	14
	2.2.1. Construcción de filtros ópticos	14
2.3	Cámaras CCD	17
	2.3.1. CCD	17
	2.3.2. Corriente de oscuridad	17
	2.3.3. Eficiencia cuántica	19
3. Fil	tros ópticos	<b>21</b>
3.1	Caracterización	21
	3.1.1. Definiciones $\ldots$	21
	3.1.2. Setup Experimental	23
	3.1.3. Software de procesamiento de parámetros	25
	3.1.4. Resultados $\ldots$	26
3.2	Desplazamiento en longitud de onda	32
	3.2.1. Resultados	33

Tabla de contenidos

4.	Cár	naras CCD	<b>37</b>				
	4.1.	Introducción	37				
	4.2.	Caracterización	38				
		4.2.1. Consumo	38				
		4.2.2. Corriente de oscuridad	39				
	4.3.	Montaje	43				
	4.4.	Software de control y adquisición: UVCam v1.0	45				
5.	Pro	cesamiento de imágenes espectroscópicas	49				
	5.1.	Preparación de las imágenes adquiridas	51				
	5.2.	Tratamiento de imágenes	56				
	5.3.	Banco de imágenes espectroscópicas	60				
6.	Cel	das de calibración de $SO_2$	63				
	6.1.	Características y calibración	63				
	6.2.	Setup experimental	64				
	6.3.	Resultados	65				
		$6.3.1. 15 \text{ de Abril de 2014} \dots \dots$	65				
		$6.3.2.  16 \text{ de Abril de 2014}  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	73				
	6.4.	Conclusiones	79				
7.	Me	didas y análisis de datos	81				
	7.1.	Procedimientos y rutinas de medidas	81				
	7.2.	Medidas de campo	82				
		7.2.1. Emisiones	84				
		7.2.2. Calibración de $SO_2$	90				
	7.3.	Programa de evaluación UVCam	93				
	7.4.	Evaluaciones	95				
		7.4.1. Método A	95				
		7.4.2. Método B	97				
	7.5.	Resultados	99				
		7.5.1. Comparación de métodos	99				
8.	Cor	nclusiones	103				
	8.1.	Conclusiones del trabajo	103				
	8.2.	Dificultades y aprendizajes	104				
	8.3.	Perspectivas y Trabajo a Futuro	105				
Referencias 107							
Ín	dice	de tablas	110				
Ín	dice	de figuras	113				

# Capítulo 1

# Introducción

## 1.1. Motivación

El desarrollo de la actividad humana a través del tiempo ha traído muchas mejoras en la calidad de vida. Hoy en día esto se puede observar en la tecnología que se utiliza día a día, las costumbres, etc.

Sin embargo este desarrollo ha acarreado problemas a gran escala como la contaminación, tanto a nivel de aire, tierra o agua. Desde la Revolución Industrial del siglo 18, los niveles de emisiones antropogénicas de gases como dióxido de carbono  $(CO_2)$  han ido aumentando a una tasa elevada. Además, se observa que también las emisiones de combustibles fósiles han aumentado considerablemente dando como resultado emisiones de dióxido de azufre  $(SO_2)$ , óxidos de nitrógeno y otros gases que contaminan y pueden llegar hasta ser nocivos tanto para la salud humana como vegetal.

La consecuencia visible y más conocida, es el aumento del tamaño del agujero de la capa de ozono (reducción en la concentración de ozono estratosférico) situado sobre el polo sur, debido principalmente a gases llamados *CFC* (clorofluorocarbono) que reaccionan con las moléculas de ozono haciendo que las mismas se destruyan. Esto tiene como consecuencia que una mayor cantidad de radiación ultravioleta penetre a la superficie terrestre generando problemas como el cáncer de piel en los humanos. Por lo tanto, es de interés encontrar nuevas formas de mediciones de gases contaminantes presentes en distintas capas de la atmósfera para así poder crear políticas que regulen las emisiones y aminorar los posibles daños.

El grupo de Óptica Aplicada del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería (GOA-IFFI en adelante), desde hace varios años se encuentra investigando distintas técnicas de monitoreo atmosférico remoto de dichos gases. Dichas técnicas tienen la ventaja de que al ser efectuadas de forma remota, permiten observar fuentes sin encontrarse el investigador físicamente presente en el terreno de la fuente y a su vez con una alta selectividad en gases, obteniendo (para este caso en particular) solo la información del gas objetivo sin interferencia de otros presentes.

Por lo tanto, utilizando estas técnicas y evaluando sus resultados se pueden obtener mediciones en tiempo real de la contaminación en un área, teniendo la

#### Capítulo 1. Introducción

posibilidad de calcular otras variables como flujos de gases.

En el presente proyecto se presentará el software realizado para la adquisición de imágenes y posterior procesamiento de las mismas, la caracterización de los elementos del sistema y también se analizarán algunas imágenes de prueba que se adquirieron en el transcurso del proyecto a través de distintas medidas de campo.

## 1.2. Descripción del proyecto

De acuerdo a lo mencionado en 1.1 lo que se pretende en el proyecto es investigar el desarrollo de un sistema que pueda ser capaz de cuantificar emisiones industriales de dióxido de azufre  $(SO_2)$  de manera remota por medio de cámaras con sensibilidad en el ultravioleta y filtros ópticos pertenecientes al Grupo de Óptica Aplicada. Desarrollar este tipo de sistemas es de suma importancia, dado que puede ser utilizado para visualizar y potencialmente cuantificar las emisiones en tiempo real, y así poder trazar políticas ambientales concretas a bajo costo económico para una entidad reguladora.

El presente proyecto consistió en el desarrollo de un sistema de cuantificación de emisiones de  $SO_2$ , realizando todo el software necesario para la comunicación con todos los elementos que lo integran y el diseño del sistema óptico para que todo funcione correctamente. También se caracterizaron los elementos ópticos a utilizar y se diseñaron protocolos a seguir para lograr medidas y posteriores evaluaciones de las mismas. Para testear el sistema completo, se procedió a tomar imágenes de las emisiones de la planta de refinería de combustible ubicada en el barrio "La Teja", en la ciudad de Montevideo, Uruguay.

Para lograr el objetivo, en primer lugar se procedió a la caracterización de los filtros ópticos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, creando el setup experimental y el software necesario para ello. Luego se realizó el software necesario para la comunicación, control y toma de imágenes con las cámaras espectroscópicas, teniendo en cuenta las necesidades presentadas por el Grupo de Óptica Aplicada. Se continuó el trabajo realizando las primeras mediciones en campo para así tener la realimentación necesaria del desempeño del sistema y poder corregir errores. Se procedió a realizar todo el software necesario para la evaluación mediante el método DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) de las imágenes adquiridas y para finalizar la creación de un banco de imágenes espectroscópicas para guardar las mismas.

## 1.3. Antecedentes

El desarrollo de este tipo de sistemas comenzó a raíz de la necesidad de comprender los procesos de erupciones volcánicas y encontrar alertas tempranas para este tipo de fenómenos naturales. También se buscaba entender la relación entre los gases y la cantidad que se emite en un volcán, en especial el  $SO_2$ , que puede llevar a una relación para encontrar dichas alertas. Se propuso el sistema por primera vez para utilizarlo en medidas volcánicas [22] obteniendo resultados como los que se muestran en la figura 1.1, mostrando imágenes de emisiones con una gran resolución temporal y espacial. Luego, la idea ha sido profundizada incluyendo mejoras como se puede ver en [1], [12], [13] entre otros.



Figura 1.1: Resultados obtenidos en volcanes [22].

Sin embargo, no existen investigaciones exhaustivas que documenten la aplicación de este tipo de sistemas a emisiones industriales. Recientemente algunas mediciones se han realizado en plantas de energía eléctrica [23] y emisiones de barcos [26], pero han sido preliminares. También cabe aclarar que a nivel regional no existen realizadas mediciones de este tipo.

## 1.4. Objetivos del Proyecto

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el objetivo general del proyecto consistió en el desarrollo de un sistema de medición remota de emisiones atmosféricas de dióxido de azufre mediante cámaras con alta sensibilidad en la región ultravioleta y filtros ópticos pasabanda.

#### 1.4.1. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del proyecto fueron los siguientes:

#### Capítulo 1. Introducción

- 1. Estudio de protocolos de comunicación entre dispositivos de adquisición de imágenes y PC. Estudiar las diferentes formas de comunicación entre las cámaras y el PC.
- 2. Caracterización de filtros ópticos.
- 3. Montaje físico y alineación del sistema óptico.
- 4. Caracterización de las cámaras.
- 5. Establecimiento de la rutina de medida.
- 6. Creación de software para manejo de cámaras.
- 7. Adquisición de imágenes espectroscópicas en laboratorio y campo.
- 8. Análisis de viabilidad de implementación de software personalizado para aplicación.
- 9. Creación de algoritmos de procesamiento de imágenes.
- 10. Creación de algoritmo de evaluación de imágenes adquiridas.
- 11. Generación de un banco de imágenes.

## 1.5. Alcance

Como se mencionó anteriormente el alcance del proyecto es el desarrollo del software necesario para el correcto funcionamiento del sistema. Las cámaras ultravioleta y la óptica necesaria para el proyecto fueron suministrados por el GOA-IFFI.

## 1.6. Criterios de éxito

Los criterios de éxito del proyecto se resumen a continuación:

- Lograr la comunicación correcta entre el PC y la cámara para así poder obtener las imágenes con el software a desarrollar. Lograr dicha comunicación es vital en el proceso, siendo necesario que esta sea rápida y cumpla ciertos requerimientos en tiempo, como por ejemplo, que el tiempo transcurrido para la descarga de cada imagen luego de cada toma sea corto (1 s o 2 s).
- Obtener una buena caracterización de los filtros a utilizar. Esto se logra a
  partir de las medidas de transmitancia de dichos filtros. Esto también es
  una parte importante del proceso, porque son el instrumento que permite la
  selectividad entre gases y así poder detectar el dióxido de azufre. Observar
  donde se centran y tener la correcta banda pasante es necesario para poder
  explicar los resultados.

- Lograr que el sistema permita detectar contaminantes presentes en las emisiones a estudiar. Para poder validar la detección se utilizará como comparación las medidas realizadas con el método DOAS, realizadas mediante espectrómetros y utilizando métodos validados en publicaciones científicas.
- Lograr un primer acercamiento a la cuantificación de emisiones mediante imágenes. Esto debe permitir reconocer si las celdas de calibración que se utilizarán para calibrar las cámaras están en el rango correcto de concentración.
- Creación del banco de imágenes espectroscópicas evaluadas y no evaluadas, para que estas últimas puedan ser procesadas en otro ámbito. Dicho banco permitirá organizar todas las tomas realizadas y así poder tener un catálogo de todas las imágenes con su fecha de toma, filtros utilizados, lugar, observaciones, entre otros campos.

## 1.7. Actores

Los actores del proyecto fueron cinco: dos estudiantes y dos tutores a cargo (uno por el GOA-IFFI y otro por el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, IIE) y como cliente el GOA-IFFI. Los mismos se encuentran resumidos en la tabla 1.1.

Nombre	Rol
Matías Osorio Mirambell	Estudiante
César Gastón Beslterli Brum	Estudiante
Dra. Erna Frins	Tutor (Grupo de Óptica Aplicada - IFFI)
Ing. Miguel Barreto	Co-Tutor (IIE)
Grupo de Óptica Aplicada - IFFI	Cliente

Tabla 1.1: Actores del proyecto UVCam.

## 1.8. Restricciones

Antes de comenzar el proyecto se tenía noción de que existían restricciones tanto desde el punto de vista de recursos humanos, como de logística.

Desde el punto de vista de recursos humanos, los estudiantes del proyecto podían juntarse un total de cuatro horas por día de trabajo. Sin embargo a medida que pasó el tiempo, la dedicación aumentó, llegando a ser de seis horas de trabajo por día.

Desde el punto de vista de la logística se encontró con dos restricciones. La primera fue que no se posee información exacta acerca de las emisiones generadas por las instalaciones a investigar. Esto hace que se necesite contrastar la medida realizada por algún otro método, siendo este método presentado en el capítulo 2.

#### Capítulo 1. Introducción

En segundo lugar, como se tiene acceso restringido a las fuentes, las mediciones se realizan a una distancia considerable de las mismas. Además en esta etapa se aspira a tener imágenes desde una posición óptima (aproximadamente en una dirección de observación perpendicular a la dirección de la pluma) de modo de reducir hipótesis al mínimo durante el análisis.

## 1.9. Descripción del documento

La presente memoria del proyecto se encuentra dividida en ocho capítulos. En el capítulo 2 se encuentran los fundamentos teóricos necesarios para entender las actividades y experimentos desarrollados en el proyecto.

En el capítulo 3 se encuentran desarrollados los experimentos y programas realizados para la correcta caracterización de los filtros ópticos pasabanda utilizados en el proyecto, así como sus resultados y consideraciones.

En el capítulo 4 se explican los experimentos llevados a cabo para caracterizar los parámetros de interés para las mediciones de las cámaras CCD utilizadas en el proyecto. Se muestra además el programa desarrollado para la toma de imágenes y control de las cámaras.

En el capítulo 5 se presentan los métodos de procesamiento de imágenes aplicados a las obtenidas mediante las cámaras para obtener el resultado deseado. Además se presentan los distintos métodos de evaluación propuestos para obtener la concentración de las emisiones.

En el capítulo 6 se muestran los métodos de calibración del sistema a partir de las celdas de calibración de  $SO_2$  y las distintas opciones posibles, evaluando cual es la mejor opción o la más conveniente a utilizar en el proyecto.

En el capítulo 7 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de campo realizadas los días 15 y 16 de abril de 2014 en la refinería de combustible.

En el capítulo 8 se muestran las principales conclusiones obtenidas en el proyecto, además de las dificultades y aprendizajes obtenidos a lo largo de la tarea y el trabajo a futuro.

# Capítulo 2

# Fundamento teórico

## 2.1. Contaminación atmosférica

La calidad del aire, la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la tierra, el cambio climático a nivel global y otro conjunto de cuestiones están estrechamente relacionadas con la composición de la atmósfera. Una de las principales razones que ha motivado a estudiar la química de la atmósfera y su composición a distintos niveles, es la influencia de las actividades del hombre en ella, principalmente desde hace aproximadamente dos siglos, debido a grandes cambios en la historia, como por ejemplo la Revolución Industrial. Estas actividades han alterado el balance natural de la atmósfera debido a la influencia de gases traza antropogénicos y aerosoles, tanto a nivel local como global. En [25] se pueden observar algunos problemas ambientales, como por ejemplo:

- Smog de Londres. Este tipo de problema ambiental fue uno de los primeros en ser reconocidos. Fue causado por la emisión, debido a procesos de combustión, de partículas de hollín (partículas de carbono producto de combustiones incompletas de hidrocarburos) y la formación de particulas de aerosoles compuestas por ácido sulfúrico proveniente de la oxidación del dióxido de azufre. Todo esto tuvo un alto impacto nocivo en la salud humana. Aproximadamente 4000 muertes se produjeron en cuatro días debido a la presencia de este smog.
- Aumento del agujero de la capa de ozono. El ozono  $(O_3)$  es un gas presente de forma natural en la atmósfera. Se encuentra presente en la estratósfera (ozono estratosférico) es fundamental para la presencia de la vida humana y vegetal en la tierra dado que es el encargado de filtrar la radiación ultravioleta con longitud de onda menor a 300 nm y que puede llegar a producir efectos cancerígenos en la salud humana. En los últimos años la actividad humana ha modificado el balance natural de ozono estatosférico, produciendo una disminución debido a la emisión de componentes con clorofluorocarbono (denominados comúnmente CFC). Las moléculas de CFC tienen una larga vida media en la atmósfera por lo que se hace dificultosa su remoción. Además

#### Capítulo 2. Fundamento teórico

su presencia en la misma representa un problema ya que reaccionan con las moléculas de ozono, destruyendo estas últimas, y generando problemas como el llamado "agujero de la capa de ozono" que se refiere a una región donde la concentración de ozono es considerablemente menor que la de equilibrio natural, permitiendo así que llegue mayor cantidad de radiación ultravioleta a la tierra.

Por otra parte, el ozono presente en la tropósfera (ozono troposférico, formado por la interacción de la radiación solar ultravioleta con moléculas de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno emitidas por fuentes antropogénicas como refinerías, combustión de automóviles, entre otras) es altamente dañino para la salud humana, dado que el gas es tóxico. Además de ser nocivo para la salud humana, afecta también la salud de los vegetales, produciendo desde manchas blancas o negras en las hojas hasta la muerte de las mismas debido al proceso de fototoxicidad (dependiendo de la planta).

Por lo tanto, para tratar o encontrar políticas ambientales que intenten reducir el daño debido a emisiones causadas por el hombre es necesario contar con técnicas que permitan detectar su presencia, cuantificarlas y estudiar su dinámica.

#### 2.1.1. Métodos de medición de contaminantes atmosféricos

Para monitorear la atmósfera es necesario tener en cuenta y satisfacer dos requerimientos principales. En primer lugar, el método a implementar debe ser suficientemente sensible para detectar las especies bajo estudio en concentraciones naturales. Por lo tanto, dependiendo de la aplicación, son requeridos límites de detección para distintas sustancias desde 0,1 ppt<sup>1</sup> hasta los ppb<sup>2</sup> En segundo lugar es necesario que el método sea específico o selectivo. Esto quiere decir que el resultado de la medición de una especie en particular no puede ser influenciado ni de manera positiva ni negativa por las demás especies en el volumen de aire a estudiar. Otro aspecto importante es la posibilidad de tener resultados en tiempo real y de forma remota, es decir, que no sea necesario analizar una muestra en un laboratorio y no estar en el lugar en donde se encuentra la fuente para realizar la medición (mediciones *in situ*). Esto suma un nuevo nivel de complejidad al intentar hallar nuevos métodos efectivos.

Uno de los primeros instrumentos para investigar la atmósfera fue el espectrómetro de Dobson [4]. El objetivo de este instrumento era cuantificar los niveles de ozono estratosférico. Dicho instrumento permitía recibir y comparar la radiación en dos longitudes de onda distintas y bien definidas (una en donde el ozono absorbe y otra donde no lo hace). Las medidas realizadas por dicho instrumento duraron más de 40 años y ayudaron a entender los cambios sufridos en el ozono en el corto y largo plazo. Hoy en día este trabajo continúa desde tierra a través de distintas

 $<sup>^1\</sup>mathrm{Partes}$  por trillón. Equivale aproximadamente a una concentración de  $2\times10^{16}$  moléculas/cm^3

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Partes por billón. Equivale a un *mixing ratio* de  $10^{-9}$ .

redes de monitoreo internacionales y también a través de medidas satelitales (como por ejemplo, las realizadas desde el satélite GOME-3).

#### Espectroscopía por correlación con máscara (COSPEC)

La espectroscopía por correlación con máscara (COSPEC, en inglés) fue originalmente propuesta como herramienta para la exploración de petróleo a través de la detección de vapor de iodo  $(I_2)$  atmosférico que se encuentra frecuentemente asociadoa depósitos de petróleo. La idea fundamental de COSPEC es analizar las características de la absorción de los constituyentes atmosféricos en la luz solar que llega al instrumento luego del proceso de *scattering* que sufre la misma. Rápidamente, otras aplicaciones fueron encontradas, tales como la observación de columnas troposféricas de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en emisiones industriales o en emisiones volcánicas.

El COSPEC fue desarrollado en los años sesenta. Utiliza un correlador optomecánico [20] [21] para identificar y cuantificar el espectro de los gases traza presentes en la atmósfera. Así surgió un instrumento compacto y eficaz dado que el reconocimiento de las moléculas de gases a ser medidas se realizaba con una electrónica simple y sin necesidad de procesar datos en computadoras.

Si bien el COSPEC fue una gran innovación tecnológica para su época, hoy en día se encuentra en desuso por diferentes razones como por ejemplo interferencia entre distintos gases presentes en la región a analizar, líneas de Fraunhofer, efectos de polarización de la luz y múltiple *scattering* en aerosoles y nubes. Además el instrumento es muy sensible a distorsiones mecánicas y de temperatura, generando problemas como el desplazamiento en longitud de onda de las distintas máscaras utilizadas.

#### Espectroscopía de absorción óptica diferencial (DOAS)

Hoy en día una de las técnicas más utilizadas para medir la presencia de gases traza en distintas capas de la atmósfera es la técnica DOAS (Diferential Optical Absorption Spectroscopy) [24]. Dicha técnica se basa en la ley de Lambert-Beer:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\sum_{i=0}^{i=n} \sigma_i(\lambda) \cdot c_i \cdot L)$$
(2.1)

siendo  $\lambda$  la longitud de onda de la luz, n la cantidad de especies presentes en el medio,  $c_i$  la concentración del gas i, L el largo del camino óptico recorrido por la luz,  $I_0$  la luz antes de pasar por el medio donde se encuentran presentes las nespecies y  $\sigma_i(\lambda)$  la sección eficaz del gas i. Esta sección eficaz da la información de la región del espectro electromagnético donde el gas i absorbe.

En la atmósfera la situación es más compleja dado que la luz emitida además de ser absorbida por los distintos gases traza presentes, también interacciona con moléculas de aire y aerosoles produciendo su atenuación. Esto es conocido como fenómeno de *scattering*. Para modelar este fenómeno se modifica la ley presentada en (2.1) de la siguiente manera:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp\left[-L \cdot \left(\Sigma_i(\sigma_i(\lambda) \cdot c_i) + \epsilon_R(\lambda) + \epsilon_M(\lambda)\right)\right] \cdot A(\lambda)$$
(2.2)

9

#### Capítulo 2. Fundamento teórico

donde:

•  $\epsilon_R(\lambda)$  corresponde al efecto del *scattering* de Rayleigh. Dicho efecto ocurre cuando un fotón interactúa con partículas que son mucho más pequeñas en comparación con la longitud de onda del fotón. Al ocurrir, la luz es desviada de su dirección original permitiendo así que llegue una menor cantidad a un determinado punto. Cabe aclarar que no solo ocurre en la atmósfera o en gases, sino que también ocurre en materiales sólidos o líquidos. Este fenómeno lleva el nombre de Rayleigh debido a Lord Rayleigh que intentó desde muy temprano explicar el color del cielo en su trabajo [28]. Una buena aproximación como un proceso de absorción para el *scattering* de Rayleigh se muestra en la ecuación (2.3).

$$\epsilon_R(\lambda) \approx \sigma_{R0} \cdot \lambda^{-4} \cdot c_{AIRE} \tag{2.3}$$

siendo  $\sigma_{R0}\approx 4,4\times 10^{-16} {\rm cm}^2 {\rm nm}^4$  y  $c_{AIRE}$  la densidad del aire.

•  $\epsilon_M(\lambda)$  corresponde al efecto de *scattering* de Mie, el cual ocurre a raíz de la interacción de la luz con partículas de dimensión comparable a la longitud de onda de la luz que interactúa con ellas. Debe su nombre a Gustav Mie que fue quien lo describió de una forma concreta en 1908. Al igual que para el de Raileigh, el *scattering* de Mie puede tratarse como una absorción de la siguiente manera:

$$\epsilon_M(\lambda) = \epsilon_{M0} \cdot \lambda^{-\alpha} \tag{2.4}$$

siendo  $\alpha$  el coeficiente de Angstrom para aerosoles (típicamente varía entre 0,5 y 2,5) y  $\epsilon_{M0}$  una constante.

•  $A(\lambda)$  resume efectos debido a turbulencias y efectos debido a instrumentos.

En la figura 2.1 se representan los efectos que se tienen en cuenta al realizar una medida DOAS en la atmósfera, mencionados anteriormente.



Figura 2.1: Representación de las influencias de una medida DOAS en la atmósfera [25], siendo la fuente de luz el sol.

Uno de los potenciales a la hora de medir con un método DOAS es la selectividad del mismo, es decir, la capacidad del método para distinguir claramente en

#### 2.1. Contaminación atmosférica

una muestra, los diferentes gases que la componen. El método DOAS tradicional, a través de ciertos algoritmos matemáticos, es capaz de separar hasta diez o más absorciones en una región del espectro electromagnético, tanto si las mismas se superponen o no. Para ello el método trabaja con la información de las secciones eficaces de los gases, que se muestran en la figura 2.2. La absorción o sección eficaz de cada gas es única (como una especie de huella dactilar) y esto es lo que le permite al método discernir entre varios gases traza presentes en la región a investigar, teniendo en cuenta ciertas hipótesis.



Figura 2.2: Secciones eficaces de distintos tipos de gases en la región UV-VIS [25].

#### Capítulo 2. Fundamento teórico

En la figura 2.1 se puede observar que el método necesita una fuente de luz (*Light Source*). Esto lleva a la clasificación de la técnica en dos conjuntos. Cuando la fuente de luz es artificial (LEDs, laser, lámparas) la misma se denomina **DOAS Activo**. Por el contrario, cuando la fuente de luz es natural (sol, luna, estrellas) a la técnica se la denomina **DOAS Pasivo**, como ocurre en el caso del presente proyecto.

Medidas realizadas en Uruguay utilizando este tipo de métodos se pueden encontrar en [5] [6] [7] [8] [9].

#### 2.1.2. Imagenología espectral

Una aplicación concreta de DOAS Pasivo es la imagenología espectral. Básicamente consiste en obtener una imagen del objetivo a visualizar a la cual se le aplicó el método DOAS. Surgió como una herramienta para investigar volcanes, dado que existen relaciones entre el gas  $SO_2$  emitido por los mismos y un posible riesgo de erupción, pudiendo tener así alertas tempranas para las mismas.

El primer dispositivo de este tipo se denominó *Imaging DOAS (IDOAS)* y consiste en medidas con un espectrómetro moviendo el mismo en dos dimensiones y analizando los resultados mediante DOAS [2] [17] [18].

Otra herramienta que surgió a partir de lo anterior, para intentar resolver la misma problemática, fue la cámara de  $SO_2$ . Consiste en tomar imágenes con una cámara que posee un detector con suficiente sensibilidad en la región en que se encuentra el gas a analizar (en este caso, la ultravioleta como se aprecia en la figura 2.2). Luego se procesan las mismas teniendo en cuenta solo dos regiones del espectro electromagnético: una donde el gas objetivo absorbe la radiación electromagnética y otra donde no lo hace. A partir de aquí se evalúan las imágenes obtenidas mediante espectroscopía diferencial.

El primer intento de realizar este tipo de sistemas se presentó en [22]. El sistema utilizado consistió en una cámara con gran sensibilidad espectral, dos filtros ópticos pasabanda y el software necesario para adquirir las imágenes. A partir de una serie de imágenes de las emisiones consideradas, el correspondiente *background*<sup>3</sup> y la ley de Lambert-Beer, se puede obtener la absorbancia aparente de  $SO_2$  como muestra la ecuación (2.5).

$$AA(i,j) = \tau(i,j) = -\log\left[\frac{(PA_s(i,j) - PA_d(i,j))/(PA_b(i,j) - PA_d(i,j))}{(PB_s(i,j) - PB_d(i,j))/(PB_b(i,j) - PB_d(i,j))}\right] + offset(i,j)$$
(2.5)

siendo:

- AA(i, j) la absorbancia aparente de  $SO_2$  en cada pixel (i, j) del detector.
- $PA(i, j) ext{ y } PB(i, j)$  la intensidad en el pixel (i, j) en la imagen para cada filtro A y B respectivamente.

 $<sup>^{3}\</sup>mathrm{Concentración}$  de gas que se encuentra en el ambiente y que no es producto directo de las emisiones a considerar.

- Los subíndices s, b y d corresonden a la emisión, *background* e imágenes de corriente de oscuridad respectivamente.
- offset(i, j) corresponde a la corrección que asegura que la absorbancia aparente fuera de la emisión sea cero. Su presencia se debe a pequeñas diferencias de intensidad recibidas debidas a distintos ángulos de visión.

A partir de allí se comenzó a utilizar el sistema en distintas mediciones de volcanes [12] [13] [14] [22] [29], mediciones preliminares de emisiones contaminantes en plantas generadoras de energía eléctrica [3] [23] o emisiones de barcos [26].

## 2.2. Filtros Ópticos

Los filtros ópticos son la herramienta que permite obtener la selectividad en longitud de onda deseada a partir de la intensidad de luz que reciben los detectores de la cámaras, para así lograr cuantificar un determinado gas. Muchos de estos filtros son fabricados de manera tal que su principio de funcionamiento está basado en la interferencia de haces múltiples.

La interferencia se da cuando dos o más ondas electromagnéticas se superponen, el principio de superposición permite obtener la intensidad de campo eléctrico E en el espacio como la suma vectorial de las perturbaciones constitutivas individuales. Por lo tanto, la interferencia óptica equivale a la interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias componentes.

Existen varios tipos de interferómetros<sup>4</sup> que trabajan de forma distinta, como los que lo hacen por división en amplitud (como por ejemplo, el interferómetro de Michelson) o por división de frentes de onda (interferómetro de Young).

Los filtros utilizados en este proyecto se basan en interferómetros de ondas múltiples, más precisamente, el interferómetro de Fabry-Perot.

#### 2.2.1. Construcción de filtros ópticos

Es importante entender el sistema de inteferometría de Fabry-Perot, dado que a partir del mismo se construyen los filtros ópticos como los que se utilizarán en el proyecto. Este inteferómetro debe su nombre a sus constructores Charles Fabry y Alfred Perot que lo realizaron a fines del siglo XIX. A continuación se presentarán algunos fundamentos básicos de su construcción y como se aplica para desarrollar filtros ópticos.

El interferómetro de haces múltiples, o interferómetro de Fabry-Perot, es de suma importancia en la óptica de hoy en día dado que, además de ser un dispositivo espectroscópico con un poder de resolución extremadamente alto, también sirve como cavidad resonante básica para el láser. En principio, el instrumento consta de dos superficies planas y paralelas, altamente reflectoras y separadas una distancia d, como se puede observar en la figura 2.3. En la práctica, dos planos ópticos de vidrio semiplateados o aluminizados forman las superficies reflectoras. El espacio de aire contenido generalmente varía de algunos milómetros a varios centímetros cuando el dispositivo se utiliza para interferometría, y cuando se emplea como cavidad resonante de láser, esta distancia es mayor. Cuando el espacio entre los espejos puede variarse mecánicamente con el movimiento de uno de ellos, al dispositivo se la llama interferómetro y cuando los mismos se mantienen fijos y se ajustan en paralelo, se le suele llamar etalón.

Supóngase que el etalón se encuentra iluminado por una fuente, como se muestra en la figura 2.3. A través de él se traza únicamente un rayo emitido desde algún punto  $S_1$  sobre la fuente. Entrando por la placa parcialmente plateada, se refleja varias veces dentro de la cavidad. Los rayos que se transmiten pasan por una lente

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>En [10] se puede encontrar información sobre los diversos tipos y su construcción.

#### 2.2. Filtros Ópticos



Figura 2.3: Diagrama de un interferómetro de Fabry-Perot [10].

convergente y se enfocan sobre por ejemplo un detector, donde allí interfieren para lograr un punto brillante o uno oscuro. Cualquier otro rayo emitido desde un punto diferente  $S_2$ , paralelo al rayo original y en el mismo plano de incidencia, formará un punto en el mismo punto P sobre el detector.

Las ondas múltiples generadas en la cavidad y que llegan a P ya sea de  $S_1$  o  $S_2$ , son coherentes entre sí. Pero los rayos que salen de  $S_1$  son totalmente incoherentes con respecto a los de  $S_2$  de modo que no hay interferencia mutua. La contribución a la irradiancia resultante en el punto P del detector es precisamente la suma de las contribuciones de ambas irradiancias.

Los filtros ópticos de interferencia pueden fabricarse a partir de la idea del interferómetro de Fabry-Perot con distintas formas de transferencias. Para producir este tipo de filtros, se depositan capas sucesivas de materiales dieléctricos, con espesor de aproximadamente entre un cuarto a la mitad de longitud de onda objetivo del filtro, en un material como vidrio óptico. Esto hace que la luz que incide en la superficie con las capas dieléctricas pase a través del filtro producto de la interferencia constructiva o se refleje y se reduzca en magnitud debido a la interferencia destructiva. Esto se puede apreciar en la figura 2.4.



Figura 2.4: Esquema de funcionamiento de un filtro óptico. Extraído de la web de Olympus.

Los materiales dieléctricos utilizados para la construcción de los filtros son en general materiales no conductores que tienen un índice de refracción específico. Los filtros ópticos pasabanda tradicionales son generalmente fabricados utilizando sulfuro de zinc, seleniuro de zinc o fluoruro de sodio y aluminio. Sin embargo todos estos materiales son higroscópicos y deben ser aislados del ambiente colocando una capa protectora. Además, el zinc y el fluoruro sufren cambios con la temperatura,

#### Capítulo 2. Fundamento teórico

haciendo que el desempeño del filtro se vea afectado. Luego de la deposición de las capas de sal de película delgada, se añade una capa final de vidrio o un revestimiento protector resistente a la abrasión, siendo por lo general de monóxido de silicio.

Una manera de mitigar muchos de los problemas ocasionados por el ambiente en el desempeño de los filtros, es introducir capas finas de revestimiento compuesto por óxidos metálicos. Los recubrimientos finos resultantes de óxidos metálicos y sales, tienen cada uno un índice de refracción específico y se aplican en capas sucesivas que van alternando su índice de refracción alto y bajo. El elemento crítico en el diseño es la interfaz entre dos materiales dieléctricos con diferente índice de refracción, la cual es responsable de producir el efecto de interferencia que resulta en la selectividad en longitud de onda. Por lo tanto, los valores de longitudes de onda transmitidos son determinados por el espesor y el índice de refracción de las distintas capas dieléctricas.

Los revestimientos dieléctricos son a menudo agrupados en unidades que se denominan cavidades, las cuales se encuentran construidas de a tres o a cinco capas alternadas de sal y óxidos metálicos separadas por una capa más amplia de fluoruro de magnesio llamada espaciador. Esto se puede observar en la figura 2.5. Los espaciadores se fabrican con un grosor tal que corresponde a igualar los múltiplos de un cuarto o mitad de longitud de onda, con el fin de reflejar o transmitir la luz en coincidencia con las capas dieléctricas. Si se incrementa el número de cavidades utilizadas, se produce un crecimiento proporcional en las pendientes de la curva de transmisión, haciendo el filtro más selectivo.



Figura 2.5: Anatomía interna de un filtro óptico pasabanda. Extraído de la web de Olympus.

De esta manera es posible construir cualquier tipo de filtro óptico, como por ejemplo pasabanda, pasabajos, pasaaltos, espejos, etc. El número de capas y las cavidades se utilizan entonces para controlar con gran precisión, la longitud de onda central del filtro, el ancho y el nivel de transmisión del mismo.

## 2.3. Cámaras CCD

#### 2.3.1. CCD

La palabra CCD es la abreviación de *charge-coupled device*. Estos dispositivos son circuitos integrados (principalmente de silicio) y consisten en una matriz de fotodiodos. Estos fotodiodos operan de tal manera que convierten la energía de la luz que reciben (en forma de fotones) en cargas eléctricas.

Por ejemplo cuando un fotón llega a un átomo de silicio en el CCD, por medio del efecto fotoeléctrico se produce un electrón libre y el hueco corresponiente. Por lo tanto la función principal de un CCD es recolectar los electrones generados mediante efecto fotoeléctrico en todos los pixels que lo componen debido a la exposición del CCD a la radiación. A mayor cantidad de luz que ingrese al CCD, mayor será la cantidad de electrones generados en cada pixel. Luego de la exposición, es posible enviar una señal de salida que será transferida a una computadora para así recrear la imagen.

En la figura 2.6 se puede observar la composición interna de un CCD. La misma consiste en un "sandwich" de capas de semiconductores cubiertas por una red de electrodos para controlar la transferencia de las cargas de cada pixel al circuito de salida.



Figura 2.6: Diagrama de la anatomía de un CCD con configuración lineal (por ejemplo la utilizada en un espectrómetro) [11]

#### 2.3.2. Corriente de oscuridad

Un parámetro importante a la hora de elegir un CCD es la llamada corriente de oscuridad (*Dark Current*, en inglés).

La corriente de oscuridad es la fuente de ruido que es intrínseca a los semiconductores y ocurre naturalmente debido a la generación de portadores minoritarios a causa de la temperatura. El término involucra la palabra "oscuridad" dado que

#### Capítulo 2. Fundamento teórico

la misma se puede medir en ausencia de luz en el CCD. Esta corriente varía con la temperatura, como se puede observar en la figura 2.7, y tiene una dependencia lineal con el tiempo de exposición de la medida.



Figura 2.7: Variación de la corriente de oscuridad en función de la temperatura de operación, en un espectrómetro [27].

La corriente de oscuridad ocurre dado que a temperatura por sobre el cero absoluto, se generan de manera aleatoria pares electrón-hueco (e-h), debido a la energía aportada por la temperatura (excitación térmica), que se recombinan en el silicio, específicamente en la interfaz Si-Si $O_2$ . Dependiendo de donde se generan los pares e-h, algunos electrones son recolectados por el CCD y los mismos traducidos como señales a la salida del CCD, contribuyendo a la generación de ruido.

Existen varias fuentes de corriente de oscuridad. Entre ellas se encuentran la generación de carga en la interfaz de Si-Si $O_2$  (surface dark current), generación de electrones en la región de agotamiento del CCD (depletion dark current) y electrones que difunden a las paredes del CCD desde el bulk del mismo y otras regiones (diffusion dark current y substrate dark current). En todos los casos, las irregularidades en la estructura del cristal de silicio son responsables de la generación de corriente de oscuridad. Por ejemplo, impurezas en los metales y defectos en cristales son conocidos como sitios de generación de portadores de carga en el Si. Dichas impurezas dentro del semiconductor o en la interfaz de Si $O_2$  introducen niveles de energía intermedios dentro de la banda prohibida, cuya consecuencia es el aumento de la generación de conducción y la de valencia. Este último proceso se denomina hopping conduction [11].

La tasa de generación de dark current puede variar espacialmente en el CCD. Esto ocurre debido a que las fuentes de dicha generación están estadísticamente distribuidos a través del material de silicio, de manera que cada pixel contiene cantidades variables de dichas fuentes. Además, la tasa de generación de dark current en cada fuente, varía en cada pixel. Algunos de estos pixeles producen una gran cantidad de corriente de oscuridad y son llamados *hot pixels*. Por lo general estos píxeles defectuosos se distribuyen aleatoriamente sobre el CCD y necesitan ser caracterizados y corregidos de alguna manera para obtener buenas mediciones.

#### 2.3.3. Eficiencia cuántica

Otro parámetro a tener en cuenta a la hora de elegir un CCD para trabajar es la eficiencia cuántica del mismo (*Quantum efficiency, en inglés*). La eficiencia cuántica (o eficiencia cuántica externa) se define como el número de electrones recolectados dividido el número de fotones incidentes en el CCD [11]. Es decir, una medida de los fotones que son absorbidos en la región de deplexión del CCD y convertidos en cargas eléctricas. No todos los fotones incidentes contribuyen a la eficiencia cuántica, debido a que existen pérdidas por reflexión en las superficies y la pérdida debido a la absorción de otros materiales.

Una vez que los fotones son absorbidos por la región activa del sensor, la eficiencia de convertir fotones en electrones es descrita por un parámetro llamado eficiencia cuántica interna. Esta eficiencia cuántica se define como el número de electrones generados divididos por el número de fotones que son absorbidos en la región activa del CCD.

Sin embargo para escoger un CCD correspondiente a la aplicación se utiliza la eficiencia cuántica externa dado que es el parámetro medido y presentado con mayor frecuencia. La eficiencia cuántica externa es una función de la longitud de onda y de la temperatura.

A modo de ejemplo, se presenta en la figura 2.8 la eficiencia cuántica del chip utilizado en este proyecto.



Figura 2.8: Ejemplo de la eficiencia cuántica de un CCD. Extraído de www.ccd.com

Se puede observar que la cámara trabaja en un alto rango, abarcando desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 3 Filtros ópticos

Como se mencionó en 2.2, los filtros ópticos son la herramienta que permite extraer la porción de luz y así, lograr la selectividad requerida por el método DOAS en las regiones de interés inherentes al gas objetivo,  $SO_2$ .

Para ello es necesario además de conocer su funcionamiento, caracterizarlos correctamente, dado que pequeños corrimientos en la longitud de onda del centro del filtro, en la banda de transmisión o cambios en el ángulo de incidencia de la luz sobre el filtro pueden afectar la correcta interpretación de los datos.

En las siguientes secciones se detallarán los procedimientos experimentales y los algoritmos para caracterizar correctamente los distintos tipos de filtros con los que se cuenta y fundamentar la elección de los mismos.

## 3.1. Caracterización

#### 3.1.1. Definiciones

Para comenzar se definirán los términos que se utilizaron como parámetros de salida para caracterizar cada filtro del sistema. Los mismos se pueden observar en la figura 3.1.

- Máximo de transmisión del filtro (Peak Transmitance): longitud de onda (en nanómetros) en la cual se ubica el máximo de transmitancia para el filtro dado.
- Full Width Half Maximum (FWHM): Ancho a mitad de altura (en nanómetros) del filtro. Se determina en base al máximo del filtro.
- Centro del filtro (Central Wavelength): Longitud de onda en la cual se encuentra el centro del filtro, a partir del FWHM.

Para hallar la transmitancia de los filtros se realizaron dos procedimientos diferentes.

Capítulo 3. Filtros ópticos



Figura 3.1: Ilustración con los parámetros utilizados para caracterizar los filtros (Extraída de la web de Edmund Optics).

En primer lugar se dividió el valor máximo de la intensidad recibida por el espectrómetro al pasar por el filtro entre el valor máximo recibido por el espectrómetro sin tener un filtro delante (es decir, la intensidad que emite la lámpara de tungsteno deuterio). A este valor se le denominó **Transmitancia por máximo** (**Transm. Máx.**).

Por otro lado, se halló la integral bajo el área definida por el FWHM de la intensidad recibida por el espectrométro al pasar por el filtro, sobre la integral bajo la misma área definida de la intensidad recibida de la lámpara. A este valor se le llamó **Transmitancia por integral (Transm. Int.)**.

Todo lo anterior se resume en las ecuaciones (3.1) y (3.2).

$$T_{max} = \frac{I_{filtro}(\lambda = \lambda_{max})}{I_{filtro}(\lambda = \lambda_{max})}$$
(3.1)

$$T_{int} = \frac{\int_{FWHM} I_{filtro}(\lambda) d\lambda}{\int_{FWHM} I_{lamp}(\lambda) d\lambda}$$
(3.2)

#### 3.1.2. Setup Experimental

Para las medidas de los parámetros de los filtros descritos en 3.1.1 fue necesario realizar un experimento en el Laboratorio de Óptica Aplicada del Instituto de Física. El mismo consistió en hacer pasar un haz de luz (cuyo espectro es conocido) a través del filtro óptico a caracterizar y recibir dicho haz en un espectrómetro. Esto se muestra de manera esquemática en la figura 3.2.



Figura 3.2: Diagrama del setup experimental realizado para caracterizar los filtros ópticos pasabanda (FOP).

La fuente de luz utilizada es una fuente de tungsteno-deuterio AIS Modelo DT 1000 con el espectro que se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3: Espectro de la lámpara utilizada para calibrar los filtros.

Con el objetivo de recibir la luz se utilizó un espectrómetro Ocean Optics USB2000 cuya respuesta va desde los 187 nm hasta los 897 nm aproximadamente. Para obtener un haz de luz colimado a la salida de la fuente se utilizó un colimador con un conector de entrada para fibra óptica tipo SMA que permite el pasaje de luz en la región ultravioleta (L1). Para recibir dicho haz se utilizó una lente concentradora para fibra óptica con transmitancia en la región ultravioleta (L2). Para conectar la fuente al colimador y la lente concentradora al espectrómetro se

### Capítulo 3. Filtros ópticos

utilizaron dos fibras ópticas Ocean Optics con un núcleo de 300 µm y que permitiera el pasaje en longitudes de onda menores a 200 nm. El detalle del setup experimental para relevar los parámetros de los filtros se puede apreciar en las figuras 3.4a y 3.4b.







Figura 3.4: Setup experimental para caracterizar los filtros ópticos pasabanda (FOP).

#### 3.1.3. Software de procesamiento de parámetros

Para la toma de los distintos espectros se utilizó el software DOASIS [15]. Posterior a la toma, se guardaron los archivos en formato de texto plano y se utilizó MatLab para el procesamiento. Se creó la función *findFWHM* para dicho fin. La misma se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3.5.



Figura 3.5: Diagrama de flujo de la función findFWHM creada en MatLab.

Como salida del programa se crea una carpeta en el directorio donde se encuentran las medidas realizadas para cada filtro y se devuelve una gráfica de la intensidad en función de la longitud de onda (transmitancia) y una tabla resumiendo los parámetros mencionados anteriormente. Dicha tabla se muestra en la figura 3.6.

Capítulo 3. Filtros ópticos

📝 Notep	ad++ - C:\Use	ers\Matias\Drop	pbox\Proyec	to\Caracteriz	acion_Filtros\Cara	cterizacion_Filtro	s_Fondo\14	0402_Filtros_2	25\abajo\txt\output\fw	hmOutput.tx	t	
Archivo	Editar Buse	ar Ver Forr	nato Lengi	uaje Config	jurar Macro Ej	ecutar TextFX	Plugins \	/entanas ?				
6	- 6 5	) X h f	) <b>&gt; C</b>	i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	s 😪 🖪 🖬	🗄 1 🔳 🖉		D 🔛 📑	🔊 H 🛃 🄝 🖨	1		
E fwhmOutput bt												
1	Filtro	Centro (n	m) FWHI	M(nm) M	láximo (nm)	Area Filtro	Area	Fuente	Transmitancia	Transm.	por 1	Máx
2	300.00	300.61	9.96	301.80	26533.62	50412.35	0.53	0.60				
3	31001.00	310.04	10.10	308.89	32127.73	59787.63	0.54	0.62	2			
4	31002.00	312.85	10.70	315.96	35350.22	63416.42	0.56	5 0.65	5			
5	320.00	321.58	11.56	323.03	43981.51	73914.52	0.60	0.67				
6	33001.00	331.58	9.26	333.41	39036.89	62079.52	0.63	3 0.68	3			
7	33002.00	331.47	9.22	333.41	39936.33	62079.52	0.64	0.70	)			
8	34001.00	340.61	8.93	342.28	42898.96	62192.07	0.69	0.75	5			
9	34002.00	339.57	9.02	337.48	38985.22	61761.08	0.63	0.70	)			
10	3651.00	363.86	10.46	361.81	42447.39	90123.67	0.47	0.56				
11	3652.00	364.41	10.62	362.17	44941.34	94379.02	0.48	0.57				
12												
13	UVCam -	Matias Oso	rio / Ga	stón Bels	sterli							
14	02-Apr-2014 16:33:39											
15	Elapsed	Time (seco	nds): 15	1.133841								

Figura 3.6: Tabla de salida de la función findFWHM.

#### 3.1.4. Resultados

En este proyecto se relevaron dos tipos de filtros. Por un lado filtros interferométricos de 50 mm de diámetro de la marca Edmund Optics y por otro lado filtros de 25 mm de diámetro de la marca Asahi Spectra.

#### Filtros de 25 mm - Asahi Spectra

Los resultados obtenidos en la caracterización de los filtros de  $25 \text{ mm}^1$ , producidos por la empresa Asahi Spectra, se resumen en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3. En dichas tablas además se detalla la información dada por el fabricante para su comparación, en los campos con sufijos **Fab**.

Filtro	Centro [nm]	Centro_Fab [nm]	Error Relativo [%]	Máximo [nm]
300	300,61	300,00	0,203	301,80
310(1)	310,04	311,50	0,013	308,89
310(2)	$312,\!85$	311,50	0,919	$315,\!96$
320	$321,\!58$	321,00	0,494	323,03
330(1)	$331,\!58$	331,00	0,479	333,41
330(2)	331,47	331,00	0,445	333,40
340(1)	340,61	340,50	0,179	342,28
340(2)	339,57	339,50	0,126	337,48

Tabla 3.1: Resultados del cálculo de los centros de los filtros de 25 mm.

Como se puede observar de la tabla 3.1 y las figuras 3.7a y 3.7b, el centro de los filtros de interés para el proyecto, 310 nm y 330 nm, se encuentran en 310.04 nm y 331.58 nm respectivamente, lo que los hace muy buena opción para utilizarlos como insumos teniendo en cuenta las regiones de absorción del  $SO_2$ , dado que el filtro de 310.04 nm se encuentra completamente en la región del espectro donde el

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Dado que para algunas longitudes de onda se tienen filtros repetidos los mismos se diferenciaron mediante números entre paréntesis. Por ejemplo: 310(1) corresponde al filtro de 310 nm tabulado como 1 y 310(2) corresponde al filtro de 310 nm tabulado como 2.
#### 3.1. Caracterización

Filtro	FWHM [nm]	FWHM_Fab [nm]	Error Relativo [%]
300	9,96	10,00	$0,\!4$
310(1)	10,10	11,00	8,2
310(2)	10,70	11,00	2,7
320	11,56	12,00	3,7
330(1)	9,26	10,00	$7,\!4$
330(2)	9,22	10,00	7,8
340(1)	8,93	9,00	0,8
340(2)	9,02	9,00	0,2

Tabla 3.2: Resultados del cálculo del FWHM de los filtros de 25 mm.

Filtro	Transm. Int.	Transm. Máx.	Transm. MáxFab
300	0,53	0,60	$0,\!62$
310(1)	0,54	0,62	$0,\!65$
310(2)	0,56	$0,\!65$	$0,\!65$
320	0,60	0,67	$0,\!67$
330(1)	0,63	0,68	0,72
330(2)	0,64	0,70	0,72
340(1)	0,69	0,75	0,77
340(2)	0,63	0,70	0,77

Tabla 3.3: Resultados del cálculo de la transmitancia para los filtros de 25 mm.

 $SO_2$  absorbe radiación electromagnética y el filtro de 331.58 nm fuera de ella. Esto se muestra gráficamente en la figura 3.8.

La posición del filtro es óptima también debido a que no se cubren regiones del espectro electromagnético menores a aproximadamente 305 nm. Esto es satisfactorio, dado que a dichas longitudes de onda, se pueden obtener medidas con interferencia debido a la presencia del ozono estratosférico, dado que el mismo absorbe la radiación solar con longitudes de onda menores a 300 nm aproximadamente. Si esto sucediera, se puede llegar a un resultado que sobreestime la cantidad de  $SO_2$  que se pueda observar.

Capítulo 3. Filtros ópticos



(a) Curva de transmitancia hallada para el filtro de 310 nm.



(b) Curva de transmitancia hallada para el filtro de  $330\,\mathrm{nm}.$ 

Figura 3.7: Curvas de transmitancia para los filtros de 310 y 330 nm de 25 mm de diámetro.



Figura 3.8: Transmitancia de los filtros de 25 mm a utilizar junto a la sección eficaz de  $SO_2$  [30].

#### 3.1. Caracterización

#### Filtros de 50 mm - Edmund Optics

Como parte del proyecto, se calibraron filtros del mismo tipo pero de 50 mm de diámetro, fabricados por la empresa Edmund Optics. Los resultados obtenidos de la calibración para los filtros de 50 mm se resumen en la tablas 3.4, 3.5 y 3.6.

Filtro	Centro [nm]	Centro_Fab [nm]	Error Relativo [%]	Máximo [nm]
310	312,51	$310,\!50$	0,644	311,13
330	330,67	330,00	0,203	330,44

Tabla 3.4: Resultados del cálculo de los centros de los filtros de 50 mm.

Filtro	FWHM [nm]	FWHM_Fab [nm]	Error Relativo [%]
310	10,74	10,00	7,4
330	9,94	10,00	0,6

Tabla 3.5: Resultados del cálculo del FWHM de los filtros de 50 mm.

Filtro	Transm. Int.	Transm. Máx.	Transm. MáxFab
310	$0,\!13$	$0,\!16$	$0,\!17$
330	0,32	$0,\!35$	$0,\!40$

Tabla 3.6: Resultados del cálculo de la transmitancia para los filtros de 50 mm.

En las figuras 3.9a, 3.9b se pueden observar las curvas de transmitancia para los filtros de  $310 \,\mathrm{nm}$  y  $330 \,\mathrm{nm}$ .

Capítulo 3. Filtros ópticos



(a) Curva de transmitancia hallada para el filtro de 310 nm.



(b) Curva de transmitancia hallada para el filtro de 330 nm.

Figura 3.9: Curvas de transmitancia para los filtros de 310 y 330 nm de 50 mm de diámetro.

En primera instancia, y de acuerdo a las figuras 3.9a y 3.9b, los filtros ópticos de 50 mm de diámetro parecen adecuados para la aplicación a desarrollar teniendo en cuenta el tamaño de las lentes que se poseen.

Al testear el sistema con dichos filtros sobre las celdas de calibración, se obtuvieron las imágenes que se muestran en la figura 3.10 y su posterior procesamiento<sup>2</sup> en la figura 3.11.

Del procesamiento se puede ver que dentro de las celdas, el sistema no calculó

 $<sup>^2\</sup>mathrm{El}$  procesamiento de la imagen que dó espejado respecto a la imagen original.

#### 3.1. Caracterización



Figura 3.10: Imágenes tomadas con las cámaras UV de las celdas de calibración. La foto correspondiente a "Image Cam 1", corresponde al filtro de 310 nm y la foto "Image Cam 2", corresponde al de 330 nm. Ambos son de 50 mm de diámetro.



Figura 3.11: Resultados de la evaluación de las imágenes de las celdas de calibración obtenidas con los filtros de 50 mm.

absorbancias distintas para cada una de ellas. Debido a que las celdas están en orden de menor a mayor en concentración, se debería observar una diferencia que a priori no existe. Una posible explicación de esto se puede dar mirando la transmitancia relativa del filtro de 310 nm en la figura 3.9a. Se puede ver que existe un pico pequeño alrededor de los 385 nm. Esto quiere decir que a dicha longitud de onda existe un pasaje de luz donde el  $SO_2$  no absorbe radiación electromagnética. Dado que a esta longitud de onda la eficiencia cuántica de la cámara es al menos cinco veces mayor que la región de 310 nm, se está obteniendo información equivocada, más precisamente, se está obteniendo una imagen donde la intensidad que se registra es la ultravioleta más una componente de la visible, haciendo así que se subestime la cantidad de  $SO_2$  presente en las celdas de las figura 3.10. De la

#### Capítulo 3. Filtros ópticos

misma manera, es posible observar en el filtro de 310 nm otro pico considerable alrededor de los 260 nm. Si bien puede llegar a haber interferencia con ozono a esa longitud de onda, no existe tal problema debido a que la eficiencia cuántica de la cámara a longitudes de onda menores que 300 nm es nula.

Otra ventaja que poseen los filtros de 25 mm es la transmitancia. Dicha transmitancia es al menos una vez y media mayor en comparación con los filtros de 50 mm. Dado que la cámara, en la región de trabajo, tiene una eficiencia cuántica pequeña (menor al 10%), cuanto más luz alcance el detector es mejor y esto ocurre con la elección de los filtros pequeños. Por lo tanto, **para desarrollar el sistema se utilizaron los filtros de 25 mm de diámetro**.

## 3.2. Desplazamiento en longitud de onda

Un efecto que se puede apreciar en los filtros interferométricos es que al variar el ángulo de incidencia de la luz con respecto a la normal a la superficie del filtro, la transmitancia va disminuyendo y el centro del filtro se desplaza respecto de su valor nominal [13] [16].

Para analizar este fenómeno se realizó otro experimento, con el mismo setup experimental que el utilizado para la caracterización, variando el ángulo de incidencia de la luz. Dicho setup se puede observar en la figura 3.12.



Figura 3.12: Diagrama experimental para relevar la respuesta de un filtro cuando la incidencia de la luz no es normal.

#### 3.2. Desplazamiento en longitud de onda

#### 3.2.1. Resultados

Como los filtros poseen un comportamiento similar, se testeó el desplazamiento en la longitud de onda en el filtro denominado 330(1), candidato a ser utilizado en el proyecto.

Se tomaron los espectros del haz de luz de la fuente luego de pasar por el filtro para cada ángulo que se giró el mismo. Los ángulos utilizados fueron desde la incidencia normal  $(0^{\circ})$  hasta los  $20^{\circ}$ , con paso de dos grados. Los resultados pueden observarse en las figuras 3.13 y 3.14.



Figura 3.13: Corrimiento de la función de transferencia del filtro en los datos experimentales.

Según [16] es posible aproximar el corrimiento en longitud de onda central  $(\lambda_C)$  mediante la ecuación (3.3),

$$\lambda(\theta) = \lambda(\theta = 0)\sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{n^2}}$$
(3.3)

siendo  $\theta$  el ángulo de incidencia de la luz respecto al plano normal al filtro y n el índice de refracción del filtro.

La incógnita del problema es la información del índice de refracción del filtro. Según 2.2, este tipo de filtro interferométrico se construye a partir de varias capas de distintos materiales. Cada uno de estos materiales tiene un índice de refracción distinto (ver tabla 3.7). Además no se tiene la información del número exacto de las distintas capas de sustratos con las cuales fue construido el filtro. Por lo tanto esto hace que el cálculo exacto del corrimiento de la longitud de onda central del filtro sea complejo.

Para obtener la caracterización del corrimiento en longitud de onda de los filtros se procedió de la siguiente forma: en primer lugar se realizó el experimento





Figura 3.14: Corrimiento de la longitud de onda central del filtro en función del ángulo de incidencia de la luz en los experimentos.

Material	Índ. de Refracción a 310 nm	Índ. de Refracción a 330 nm
Fused Silica	1,485	1,481
$HfO_2$	2,054	2,027
$SiO_2$	1,483	1,479

Tabla 3.7: Índices de refracción de los distintos compuestos de los filtros a utilizar. Provistos por Asahi Spectra.

mencionado anteriormente. En segundo lugar se contactó con la empresa proveedora de los filtros y realizaron simulaciones de como debería ser el corrimiento teórico. A partir de éstas se halló un índice de refracción efectivo  $(n_{eff})$  y se comparó con el índice de refracción efectivo obtenido a partir de las medidas en laboratorio y posterior procesamiento en MatLab.

Para las medidas experimentales realizadas se obtuvo un índice de refracción efectivo de **1**,909.

#### Simulaciones

En las figuras 3.15 y 3.16 se pueden observar los resultados de las simulaciones para el filtro de 330 nm. Para dichas simulaciones el índice de refracción efectivo hallado fue de 1,729.

#### 3.2. Desplazamiento en longitud de onda



Figura 3.15: Corrimiento de la función de transferencia del filtro en las simulaciones.



Figura 3.16: Modelado del corrimiento de la longitud de onda central del filtro en función del ángulo de incidencia de la luz.

#### Capítulo 3. Filtros ópticos

#### Conclusiones

Si bien los índices efectivos hallados difieren entre sí, esta diferencia es mínima y puede ser atribuible a varios factores como errores en las mediciones y principalmente en que los índices de refracción de los materiales que componen el filtro que fue medido no serán exactamente iguales a los valores en las simulaciones. Sin embargo, se puede ver que la caracterización obtenida es efectiva y a los efectos de cuantificar el corrimiento en longitud de onda debido al ángulo de incidencia de la luz es válida.

# Capítulo 4

# Cámaras CCD

Las cámaras son los elementos que permiten la resolución temporal y espacial en las medidas para el monitoreo atmosférico. Si bien en el alcance del proyecto no se involucra la construcción de las mismas, es necesario entender su funcionamiento, sus principales componentes y caracterizar distintos aspectos que puedan tener influencia en las mediciones, como por ejemplo, el ruido que genera en cada medida.

En el presente capítulo se hará una breve descripción de la conformación de las mismas para luego desarrollar sobre algunos aspectos caracterizados, así como del software de control desarrollado para el correcto control y toma de imágenes.

## 4.1. Introducción

Las cámaras utilizadas en este proyecto son modelo Alta U6 de la marca Apogee Imaging Systems (www.ccd.com). Están compuestas por un CCD Kodak KAF-1001E, construido con una matriz de 1024 por 1024 píxeles y su respuesta espectral abarca desde los 300 nm hasta los 1100 nm. El tamaño de cada pixel que compone el CCD es de 24 por 24 micrones formando así una superficie de imagen de 24.6 mm por 24.6 mm.

El tiempo de exposición de cada imagen puede variar desde 1 ms hasta los 183 minutos. Tienen también un obturador o *shutter* que permite que la luz ingrese de acuerdo a las necesidades del usuario. Para la conexión a una computadora, las mismas utilizan una interfase USB 2.0.

Las cámaras también cuentan con una unidad de enfriamiento con su respectivo control incorporado permitiendo enfriar el interior de las mismas, logrando así ser utilizada en un ambiente con temperaturas desde -25 °C hasta 40 °C, con una estabilidad de  $\pm 0.1$  °C.

# 4.2. Caracterización

#### 4.2.1. Consumo

Para testear el consumo en operación, se procedió a tomar los datos correspondientes a las medidas de campo realizadas el día 16 de abril de 2014. La temperatura exterior dicho día fue de 21 °C y la temperatura de operación de la cámara fue fijada en 10 °C, tomando como regla que la diferencia entre la temperatura interna y externa sea de aproximadamente 10 °C.

Cada cámara consume un máximo de 40 W alimentada a 12 VDC, según el fabricante. De acuerdo a los datos obtenidos con el software de control y toma UVCam, se procedió a realizar el cálculo de la potencia consumida para la temperatura de operación mencionada. El resultado de los cálculos se puede observar en la figura 4.1 y la variación en la temperatura de operación una vez que se logra el régimen en la figura 4.2.



Figura 4.1: Potencia consumida por las cámaras en función del tiempo, en las medidas de campo del día 16/4/2014.

En primer lugar se puede observar que la temperatura de operación de las cámaras tiene un transitorio al principio que dura aproximadamente veinte minutos. Esto es necesario tenerlo en cuenta al momento de adquirir las imágenes y entender como la temperatura de operación es fuente de generación de ruido.

También se observa que la potencia consumida por la cámara no supera los 5 W en régimen. Este bajo consumo es muy importante dado que brinda una importante autonomía a la hora de realizar medidas de campo alimentadas desde baterías de 12 VDC.

#### 4.2. Caracterización



Figura 4.2: Temperatura interna medida en función del tiempo en las medidas de campo del día 16/4/2014.

#### 4.2.2. Corriente de oscuridad

Para caracterizar la corriente de oscuridad del dispositivo se procedió a realizar medidas obstruyendo la entrada de luz al CCD (con el obturador de la cámara cerrado). Las mediciones se realizaron a distintas temperaturas y a distintos tiempos de exposición como se muestra en la tabla 4.1.

Temperaturas [°C]	Tiempo Exp. [s]
-15	1
-10	2
-5	5
0	10
5	30
10	
15	

Tabla 4.1: Temperaturas y tiempos de exposición utilizados para calcular la corriente de oscuridad.

Para cada temperatura de operación se tomaron cinco imágenes de oscuridad con los tiempos que se describieron anteriormente. Para alcanzar un régimen en la temperatura de operación se dejó que la cámara alcanzara la temperatura propuesta por aproximadamente diez a quince minutos.

#### Capítulo 4. Cámaras CCD

Como se mencionó en 2.3, la relación de la corriente de oscuridad en función del tiempo de exposición a temperatura constante es lineal. Para demostrar esto, se procedió a obtener distintas imágenes con los tiempos descritos en la tabla 4.1, a distintas temperaturas. Para obtener un valor que represente dicha imagen se realizó un promedio de todos los píxeles de la misma. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.4.

En primer lugar se logra apreciar que a distintas temperaturas, la relación entre la corriente de oscuridad de las imágenes tomadas en función del tiempo de exposición utilizado es lineal. La tabla 4.2 da cuenta de ello al observar los valores de  $R^2$  obtenidos.

Temp. [°C]	Pend. Cám1 [cuentas/pixel/s]	Pend. Cám2 [cuentas/pixel/s]	$R^2$ Cám1	$R^2$ Cám2
-15	0,491	1,705	0,9974	1
-10	0,588	1,909	0,9998	0,9995
-5	0,976	2,693	0,9997	0,9999
0	0,988	2,611	0,9997	0,9995
5	1,030	2,102	0,9966	0,9864
10	1,873	3,587	1	0,9999
15	3,523	5,307	1	1

Tabla 4.2: Resultados obtenidos para la caracterización de la corriente de oscuridad de las cámaras a utilizar.

Para todas las temperaturas el valor de  $R^2$  es prácticamente uno, por lo que indica una correlación lineal fuerte y la demostración de lo anterior.

Es importante observar que cada pendiente hallada, para cada temperatura, es una medida en promedio de la cantidad de cuentas que cada pixel tiene en función del tiempo. Graficando dichas pendientes en función de la temperatura se puede obtener la figura 4.3 y observar la relación del ruido de corriente de oscuridad para cada temperatura de trabajo.

En primer lugar se puede observar la diferencia en los ruidos para cada cámara. Se puede observar que la denominada **Cámara 2**, tiene mayor cantidad de ruido de corriente de oscuridad que la **Cámara 1**. Esta diferencia como se puede observar no es demasiado grande, pero es importante a la hora de tener en cuenta para realizar las correcciones de corriente de oscuridad de cada imagen que se toma con cada cámara, dado que si no se corrige cada una de ellas con la imagen de corriente de oscuridad de la cámara correspondiente, se pueden inducir errores en las mediciones.

Otra propiedad que se puede observar es que el ruido generado por la corriente de oscuridad disminuye cuando la temperatura lo hace. Esto es coherente dado que al disminuir la temperatura de operación en el CCD, las cargas tendrán menos energía para poder moverse por el mismo y los voltajes que se obtienen a las salidas son menores, lo que se interpreta en menos cuentas.

También se puede observar que a medida que disminuye la temperatura, en algunos casos, la corriente de oscuridad aumenta un poco, contradiciendo lo anterior. Esto también es posible explicarlo debido al aislamiento térmico de cada

#### 4.2. Caracterización



Figura 4.3: Corriente de oscuridad promedio calculada en función de la temperatura de operación.

unidad. Si bien la parte exterior está hecha de material metálico y tiene disipadores con ventiladores, al disminuir la temperatura de operación interna, la parte exterior aumenta sensiblemente su temperatura, haciendo que quizás no se puede disipar correctamente el calor que se genera internamente debido a la parte de enfriamiento.

De todas maneras, son necesarias nuevas pruebas (que exceden el alcance del proyecto) con distintos setups experimentales como por ejemplo cámaras por separado y que no estén en contacto debido al riel de aluminio construido para su fijación y alineación.

Capítulo 4. Cámaras CCD





42

## 4.3. Montaje

Para realizar el correcto montaje de todo el sistema fue necesario crear distintas piezas. Las mismas se detallan a continuación.

#### Portafiltro

El portafiltro consiste en una pieza de aluminio que se coloca entre la cámara y la lente telescópica con la particularidad de que sirve como interfaz del sistema de 50 mm tipo F de las lentes con el de 25 mm de los filtros ópticos a utilizar, teniendo en cuenta la entrada tipo C de la cámara.

Este tipo de conexión tiene ventajas y contras. Una de las ventajas más importantes es que, por como la pieza está fabricada, el filtro siempre queda paralelo a la cámara y a resguardo de la luz lateral que puede recibir el sistema, previniendo así determinados inconvenientes que ocasiona este tipo de luz con los filtros y evitando problemas en las imágenes como apariciones borrosas de los objetivos. También es importante notar que con este tipo de conexionado se tiene un gran área de trabajo en el CCD, pese a que el filtro utilizado es de 25 mm y una lente de este diámetro utilizado en el sistema reduciría sensiblemente el área de la imagen utilizada en el CCD.

El principal problema que acarrea este setup es la aparición de un "vignetting mecánico: El vignetting es la falta de luz en los bordes de la imagen debido a la configuración de la cámara con la lente. Este efecto se puede apreciar más claramente en los bordes de las imágenes. El problema del "vignetting mecánicoës similar, pero este ocurre por la falta de luz que llega al CCD debido a la acción del filtro óptico y del diafragma de la lente, no permitiendo pasar la luz debido a que la misma rebota en la superficie del filtro y/o diafragma. En la figura 4.5 se pueden apreciar ambos vignettings sobre la imagen.



Figura 4.5: Imagen de un cielo tomada con el filtro de  $330 \,\mathrm{nm}$ . Se puede apreciar al borde de la imagen el efecto del *vignetting* producido por la lente y la disminución de la intensidad de manera radial desde el centro hacia los costados de la imagen, producto del *vignetting* mecánico.

#### Capítulo 4. Cámaras CCD

La aparición de estos efectos es debido a la combinación de la posición del filtro en el sistema con el diafragma utilizado en la mayoría de las imágenes (f/4, 5 o f/5, 6, esto es, las posiciones donde el diafragma se encuentra más cerrado) haceque la luz que llega de costado, luego de pasar por la lente, no llegue al detectorproducto de que queda en el diafragma. Por lo tanto la única luz que llega aldetector es la luz que viene de frente, produciendo mayor intensidad en dicharegión ("punto blanco") y una intensidad menor a lo largo de la imagen de maneraradial. Esto implica que si se utiliza este sistema se debe tener en cuenta quela posición del objetivo no debe estar en dicho "punto blanco", que puede serperjudicial al momento de evaluar, sobre todo si dicha parte se llega a encontrarsaturada.

#### Base para cámaras

Se construyó en aluminio y su objetivo es colocar las dos cámaras utilizadas lo más cercanas y paralelas posibles, para que se puedan utilizar determinadas hipótesis cuando se vaya a realizar el tratamiento de imágenes correspondiente.

# 4.4. Software de control y adquisición: UVCam v1.0

Las cámaras no poseían ningún tipo de programa que las controle, por lo que se decidió desarrollar un software en el lenguaje de programación C++, cuyo objetivo sea la correcta captura de las imágenes y que a la vez sea capaz de relevar y controlar la temperatura interna de la cámara. Para esto, se utilizó el entorno de desarrollo *Microsoft Visual C++ 2010 Express* debido a que los drivers para el desarrollo de aplicaciones con los que se contaba de parte del fabricante de las cámaras estaban desarrollados para dicho lenguaje.

La interfaz de usuario del programa se puede observar en la figura 4.6.

🖳 UVCam	N. S. C. L. S.	1 m 8 3 1		
CAMERA	CONNECTION		MAGE ACQUISITION	
Find Camera 1	Find Camera 2	Save Path Folder not selected		
		Exp. Time Camera 1 (s) 0,00	Exp. Time Camera 2 (s)	0,00
Info Camera 1	Info Camera 2	Image Description Cam 1	Image Description Cam 2	
TEMPERATURE CONTROL CAM 1	TEMPERATURE CONTROL CAM 2			
Cooler ON #1 = #2	Cooler ON			
Set Temperature (°C) Current Set Temp. (°C) Set	Set Temperature (°C) Current Set Temp. (°C) Set		Take Image Stop	
Fan Speed 👻	Fan Speed 👻		-	
CAM 1 STATUS	CAM 2 STATUS			
DC Supply (V)	DC Supply (V)			
Cooler Enabled	Cooler Enabled	-		-
Temp Value ("C)	Temp Value (°C)	-		-
Drive Level (%)	Drive Level (%)		Dark Same as image	
Auto Update Refresh	Auto Update Refresh			
UVCam 1.0				About

Figura 4.6: Interfaz de usuario del programa UVCam.

En la interfaz de usuario se pueden localizar distintos bloques o secciones dentro de la ventana. Ellos son:

- CAMERA CONNECTION: Módulo que realiza el reconocimiento y comunicación de las cámaras con el PC mediante la conexión USB.
- **TEMPERATURE CONTROL**: Módulos, uno para cada cámara, para realizar el control de temperatura. Realizan básicamente el encendido y apagado del enfriador interno, el *set* de temperatura interna de trabajo y el control de la velocidad de los ventiladores externos.
- CAM STATUS: Módulo que permite al usuario observar el estado en tiempo real de la cámara. Se muestran la tensión de alimentación, si el control del enfriamiento se encuentra encendido o apagado, el valor de la temperatura dentro de la cámara y el porcentaje de corriente que consume el control de enfriamiento.
- IMAGE ACQUISITION: Módulo que permite al usuario seleccionar la carpeta donde se guardarán las imágenes y los logs de estado de las cámaras. Además es el módulo que controla la toma de imágenes permitiendo para cada cámara, la configuración del tiempo de exposición a tomar y la

introducción de una descripción de la imagen que se guardará en el log correspondiente. También existe la opción de tomar imágenes de *dark current* para poder corregir el ruido térmico de cada toma, proveniente de la temperatura de operación. Luego de cada toma el programa actualiza en la sección correspondiente una vista previa de la última toma realizada.

La operación del software se puede apreciar en el diagrama de flujo de la figura 4.7.



Figura 4.7: Diagrama de flujo para la operación del programa UVCam.

El software, luego de haber abierto la conexión con cada cámara y seleccionado el directorio donde se guardarán las imágenes, crea una carpeta llamada *img* para cumplir dicho objetivo y dentro de ella, crea tres carpetas llamadas *log* (donde se guardan los logs de estado e imágenes de ambas cámaras), *dark* (donde se guardan las imágenes de corriente de oscuridad para cada cámara) y *prev* (donde se colocan las últimas imágenes tomadas para que puedan ser pre visualizadas desde fuera del programa).

A partir de este punto es posible controlar la temperatura interna de las cámaras a través de los comandos correspondientes y observar en tiempo real el estado de las mismas, además de poder comenzar la toma de imágenes.

Luego de realizar la toma de una imagen, el programa procede a guardarla en formato binario (.*bin*) de la siguiente forma: *nroImagen\_nroCamara.bin*. Por ejemplo, para una tercer toma, se guardan dos imágenes en la carpeta *img*: 3\_cam1.bin y 3\_cam2.bin. Se escogió el formato binario (.*bin*) en este proyecto, dado que se quería la imagen tal cual se extrae de la cámara, sin realizar ninguna compresión y

además porque MatLab puede leer y trabajar con este tipo de archivos sin ningún tipo de inconvenientes.

En la figura 4.8 se observa como que da conformada la carpeta img luego de varias tomas.

Name	Size	Туре	Date modified
퉬 dark		File Folder	14/06/2014 06:28 p.m.
퉬 log		File Folder	14/06/2014 06:28 p.m.
퉬 prev		File Folder	14/06/2014 06:28 p.m.
11_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:33 p.m.
11_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:33 p.m.
12_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:33 p.m.
12_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:33 p.m.
13_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:34 p.m.
13_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:34 p.m.
14_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:34 p.m.
14_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:34 p.m.
15_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:34 p.m.
15_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:34 p.m.
16_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:34 p.m.
16_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:34 p.m.
17_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
17_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
18_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
18_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
19_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
19_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
20_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
20_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
21_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
21_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:35 p.m.
22_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:36 p.m.
22_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:36 p.m.
23_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:37 p.m.
23_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:37 p.m.
24_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:37 p.m.
24_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:37 p.m.
25_cam1.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:37 p.m.
25_cam2.bin	2.048 KB	BIN File	15/04/2014 12:37 p.m.

Figura 4.8: Carpeta generada por el programa UVCam para las mediciones de campo del día 15 de abril.

Los logs que crea el programa son dos para cada cámara: un log de estado (que guarda los datos de fecha y hora, temperatura interna, tensión de operación, corriente que pasa por el sistema de enfriamiento y si dicho sistema se encuentra activo o no) y un log con la información inherente a cada imagen que se toma (fecha y hora, número de imagen, tiempo de exposición y el comentario opcional que se puede emitir para cada una de ellas). El log de estado se actualiza cada 20 s y el de las imágenes cada vez que se toma una. Los logs se guardan en formato de texto .txt.

Las imágenes adquiridas mediante el software desarrollado se procesarán según los fundamentos del capítulo siguiente.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 5

# Procesamiento de imágenes espectroscópicas

Una imagen se puede definir como una función f(x, y), dónde  $x \in y$  son las coordenadas espaciales, y la amplitud de f para cualquier par de puntos (x, y) se le llama intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto. La misma puede ser continua con respecto a sus coordenadas  $x \in y$ , y también en amplitud. Convertir dicha imagen a un formato digital requiere que tanto las coordenadas como la amplitud sean digitalizadas. El proceso de digitalizar las coordenadas (x, y) se denomina sampling o muestreo y el de digitalizar la amplitud, cuantización. Este proceso se hace mediante el muestreo y la cuantización.

El resultado de este proceso es una matriz de números reales que es la representación digital de una imagen.

$$f = \begin{pmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,N) \\ f(2,1) & f(2,2) & \cdots & f(2,N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M,1) & f(M,2) & \cdots & f(M,N) \end{pmatrix}$$
(5.1)

El valor de la función f para cada coordenada o *pixel* (x, y) se obtiene mediante la luz recogida por la cámara CCD utilizada de acuerdo al sistema de la figura 5.1.



Figura 5.1: Diagrama óptico de un sistema con lente convergente.

#### Capítulo 5. Procesamiento de imágenes espectroscópicas

Para el proyecto fue necesario realizar un procesamiento de imágenes para poder operar correctamente con las mismas, dado que como las cámaras se encuentran en ubicaciones diferentes, pese a que la distancia entre ellas sea muy pequeña (del orden de los centímetros), se puede ver afectada la información para cada pixel que cada una recoge.

# 5.1. Preparación de las imágenes adquiridas

Para el estudio de las imágenes que se obtienen del sistema es necesario considerar ciertas hipótesis sobre las condiciones de adquisición de las mismas. Dichas hipótesis son:

- 1. Las dos cámaras se encuentran mirando la misma escena del espacio y en foco.
- 2. Las cámaras están puestas sobre una base rígida fija.
- 3. Las imágenes no están saturadas en la zona de interés.
- 4. No existen falsas esquinas debido a objetos que se encuentren por delante a otra distancia distinta a la del objetivo.

El procesamiento de las imágenes se resume en el diagrama de flujo de la figura 5.2.



Figura 5.2: Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes para los métodos A y B.

Se comienza con la carga de dos imágenes correspondientes a una medida (es decir que cumple con las cuatro hipótesis antes mencionadas), junto con las imágenes necesarias para realizar las correcciones de corriente de oscuridad y *background*.

La corrección de la corriente de oscuridad (DC en adelante) de las imágenes se realiza considerando un modelo aditivo para el ruido generado por la corriente de oscuridad, por lo que la corrección debido a este fenómeno se lleva a cabo restando

#### Capítulo 5. Procesamiento de imágenes espectroscópicas

la imagen de DC a la imagen de interés. La captura de una imagen de DC se puede realizar mediante dos métodos:

- 1. Tomar una imagen de DC para cada cámara con el mismo tiempo de exposición utilizado en la imagen a corregir.
- 2. Tomar una imagen de DC para cada cámara con un tiempo largo de exposición en función de las medidas realizadas. En el caso de este proyecto, un tiempo largo en  $t_{DC}$  pueden ser 30 s, aproximadamente treinta veces el tiempo de exposición de la toma de una imagen de una emisión. Luego se toma la imagen de DC correspondiente a la fracción de tiempo de la imagen a corregir como se muestra en la ecuación (5.2).

$$I_{DC}^{*}(i,j) = \frac{t_{em} \times I_{DC}(i,j)}{t_{DC}}$$
(5.2)

siendo  $I_{DC}^*$  la imagen de corriente de oscuridad para corregir la imagen de una emisión adquirida con un tiempo  $t_{em}$ .  $I_{DC}$  es la imagen de corriente de oscuridad adquirida con un tiempo  $t_{DC}$ . Un ejemplo del resultado de la corrección de corriente de oscuridad se pueden observar en las figuras 5.3 y 5.4.



Figura 5.3: Ejemplo de emisión de la refinería de combustible, adquirida utilizando el filtro de  $310 \,\mathrm{nm}$  y con la corrección del efecto de corriente de oscuridad.

Una vez que se corrigieron los efectos de la corriente de oscuridad en las imágenes, es necesario aislar la fuente de emisión a la atmósfera de su entorno por lo que se necesita considerar el efecto producido por el *background* existente. Esto se logra normalizando la señal correspondiente al *background* en ambas imágenes, dado que en el algoritmo de evaluación se realiza la resta entre las absorbancias aparentes provenientes de cada imagen con distintos filtros observada en la ecuación (2.5).

#### 5.1. Preparación de las imágenes adquiridas



Figura 5.4: Ejemplo de imagen de *background* utilizando el filtro de  $310 \,\mathrm{nm}$  y con la corrección del efecto de corriente de oscuridad.

El valor de interés a obtener de ambas imágenes es el de la intensidad de la luz recibida por el CCD. Partiendo de que el valor en cada pixel de la imagen representa el valor de intensidad de la luz que llega al detector (el cual tiene una eficiencia cuántica dependiente de la longitud de onda de la luz incidente y de la temperatura del mismo) al pasar por la lente y el filtro óptico (que tienen asociada una transferencia que depende de la longitud de onda y del ángulo de incidencia de la luz), todo esto integrado en el tiempo de exposición del detector a la luz. De manera más formal,

$$I_{CCD}(i,j) = I_S(\lambda) \times Q(\lambda,T) \times L(\lambda,\theta) \times F(\lambda,\theta) \times t_{exp}$$
(5.3)

donde:

- $I_{CCD}(i, j)$  es la intensidad de luz recibida en cada pixel (i,j) del detector.
- $I_S(\lambda)$  es la intensidad de la luz solar antes de ingresar al sistema y que sufrió el proceso de *scattering* en la pluma a estudiar.
- $Q(\lambda, T)$  es la eficiencia cuántica de la cámara.
- $L(\lambda, \theta)$  es la transferencia de la lente utilizada en el sistema óptico.
- $F(\lambda, \theta)$  es la transferencia de los filtros ópticos utilizados.
- $t_{exp}$  es el tiempo de exposición utilizado para adquirir la imagen.

#### Capítulo 5. Procesamiento de imágenes espectroscópicas

- $\lambda$  es la longitud de onda de la luz que incide sobre el sistema.
- $\theta$  es el ángulo de incidencia de la luz.
- T es la temperatura de operación del CCD.

Se presentan dos métodos para realizar la corrección del background.

El **método** A [19] utiliza cuatro imágenes distintas para realizar la evaluación de la absorbancia aparente de una medida. Esto se debe a que es necesario normalizar las imágenes del *background* obtenidas a distintas longitudes de onda a partir de los filtros, para luego poder aplicar la ecuación (2.5).

Para lograr esto se construyen dos nuevas imágenes de background  $\widehat{I}_A(i,j) = k_A \times I_{CCD,A,0}(i,j)$  y  $\widehat{I}_B(i,j) = k_B \times I_{CCD,B,0}(i,j)$ , siendo  $\widehat{I}_A(i,j)$  e  $\widehat{I}_B(i,j)$  las nuevas imágenes de background a utilizar en el análisis para cada longitud de onda correspondiente,  $I_{CCD,A,0}(i,j)$  e  $I_{CCD,B,0}(i,j)$  las imágenes de background originales corresondientes a los filtros A y B respectivamente y  $k_A$  y  $k_B$  factores de normalización definidos en la ecuación (5.4).

$$k = \frac{\overline{I}_E^{CL}}{\overline{I}_0^{CL}} \tag{5.4}$$

siendo  $\overline{I}_E^{CL}$  el promedio de una área de la imagen libre de pluma (CL), en la imagen de emisión y  $\overline{I}_0^{CL}$  el promedio de un área de la imagen libre de pluma en la de *background*.

Por lo tanto, la absorbancia aparente por el método A se halla mediante la ecuación (5.5), siendo  $I_{A,E}$  y  $I_{B,E}$  las imágenes de las emisiones adquiridas con los filtros de 310 nm y 330 nm respectivamente.

$$\tau_{MetA} = -\ln\left(\frac{I_{A,E}}{\widehat{I}_{A,0}}\right) + \ln\left(\frac{I_{B,E}}{\widehat{I}_{B,0}}\right)$$
(5.5)

Por otro lado, se desarrolló otro método de evaluación, denominado **método B**, que no necesita de una foto extra que contenga solamente la señal del *background* para cada filtro, si no que la idea es aprovechar que la emisión cubre una porción pequeña del área de la imagen y por lo tanto es posible estimar un *background* a partir de allí para realizar la corrección. El objetivo de este método es eliminar la señal del background realizando para ello una normalización de las intensidades de los píxeles de ambas imágenes que contienen dicha información únicamente.

Por lo tanto la absorbancia aparente mediante este método se calcula por la ecuación (5.6).

$$\tau_{MetB} = -\ln(I_{310}) + \ln(\widehat{I}_{330}) \tag{5.6}$$

siendo  $\widehat{I}_{330} = k^* \times I_{330}$  y  $k^*$  calculado como se muestra en la ecuación (5.7).

$$k^* = \frac{\overline{I}_{310}^{CL}}{\overline{I}_{330}^{CL}} \tag{5.7}$$

#### 5.1. Preparación de las imágenes adquiridas

Es decir,  $k^*$  se halla como la constante de proporcionalidad entre una imagen a 310 nm y otra a 330 nm de la misma región de *background*.

La constante  $k^*$  depende de la zona escogida por el usuario para promediar. Esto hace que el método B sea sensible a dicha elección y por lo tanto es necesario caracterizar de alguna manera dicha dependencia. Para analizar la dependencia del usuario al momento de la elección de la región del cielo en la imagen para hallar el factor de normalización  $k^*$ , se obtuvo el histograma de la figura 5.6 que representa en cada pixel el valor de dicho factor y se analiza su variación en toda la imagen. La imagen se armó a partir del cociente entre las imágenes de la emisión con distintos filtros como se muestra en la figura 5.5.



Figura 5.5: Valor del factor de normalización para el método B, en cada pixel.

Ahora se procede a estudiar el efecto del factor de normalización sobre el valor de la densidad óptica resultante. La misma se determina a partir de la ecuación (5.6). Se puede concluir que la misma incertidumbre que se tenga sobre k se tendrá sobre  $\tau$ , por lo que con el método B se está agregando una incertidumbre sobre  $\tau$ de aproximadamente un 10 % en la mayoría de los casos como peor escenario. Es decir que para una misma medida dos usuarios distintos podrían, en el peor caso, obtener valores de  $\tau$  diferentes en hasta un 10 %.

De lo analizado hasta ahora sobre ambos métodos de corrección, se opta por trabajar con el método A ya que este muestra mejores resultados sobre las evaluaciones, a pesar de que necesite una imagen extra del cielo por cada elección de tiempos de exposición, requisito que no representa grandes dificultades en la mayoría de las salidas de campo.

Capítulo 5. Procesamiento de imágenes espectroscópicas



Figura 5.6: Histograma del factor de normalización para el método B.

### 5.2. Tratamiento de imágenes

Para lograr obtener un valor de absorbancia aparente o de concentración a partir de dos imágenes, es necesario que la información espectral en cada imagen esté referida a un mismo punto del espacio. Para lograr esto es fundamental lograr una correcta superposición de las imágenes ya que de lo contrario se estará obteniendo un valor de concentración que no condice con la realidad.

El método utilizado para realizar dicha superposición de las imágenes se basa en hallar dónde se maximiza la correlación cruzada de ambas imágenes. La correlación cruzada de dos imágenes básicamente mide la similitud entre dos imágenes a partir de la comparación de la convolución de las mismas. Se optó por este método, dado que cumplía perfectamente con los requerimientos del sistema en función de las hipótesis utilizadas.

Como salida de la correlación se obtiene una matriz que se puede representar como una imagen, donde cada elemento representa los coeficientes de dicha correlación. La ubicación del máximo de esta matriz permite hallar la traslación a aplicar a una imagen para lograr una correcta superposición.

Para contar con un algoritmo más robusto se realizó un binarizado de las imágenes, tal que todos los valores mayor que un umbral determinado por el usuario (con un valor por defecto que funciona para la mayoría de los casos aplicados a las medidas obtenidas) se fijan en uno y los menores a dicho umbral se fijan en cero. Esto mejora el funcionamiento del algoritmo, ya que las imágenes de entrada preservan la información de la fuente de emisión, ya sean chimeneas u otro tipo de estructuras, además se independizan de elementos que tengan poca absorción de luz, como se puede ver en la figura 5.7.



Figura 5.7: Imágenes luego del binarizado. A la izquierda se encuentra la imagen obtenida con el filtro de 310 nm y a la derecha con el de 330 nm.

Luego de que se tiene una imagen y la traslación de la otra para lograr la superposición, se conservan las partes de las imágenes que son comunes a las dos.

Para verificar el funcionamiento del algoritmo, dado que lo que se pretende evaluar es solamente su desempeño, se toma una imagen y se seleccionan dos zonas, las cuales representarían cada una de ellas el campo de visión de cada una de las cámaras como muestran las figuras 5.8 y 5.9.



Figura 5.8: Selección de una zona en la imagen de prueba del algoritmo de superposición (*Imagen 1*).

Al aplicar el algoritmo de superposición a dichas imágenes, el mismo devuelve como resultado la zona de cada imagen donde efectivamente existe una superposición, ya que como se puede observar en las figuras 5.8 y 5.9 es posible que no exista Capítulo 5. Procesamiento de imágenes espectroscópicas



Figura 5.9: Selección de una zona en la imagen de prueba del algoritmo de superposición (*Imagen 2*).

superposición sobre el total de la imagen. En el ejemplo que se está analizando el algoritmo devuelve como resultado las imágenes que se pueden ver en las figuras 5.10 y 5.11.



Figura 5.10: Recorte de la imagen 5.8 que muestra la región común a la imagen 5.9.

Para determinar que tan eficaz es el algoritmo se evalúa el promedio del error relativo entre las imágenes definido en la ecuación (5.8).

$$\epsilon = \sum_{i,j} \frac{|Im_1(i,j) - Im_2(i,j)|}{Im_1(i,j)}$$
(5.8)

siendo  $Im_1$  e  $Im_2$  el conjunto de imágenes obtenido como salida del algoritmo de superposición.

#### 5.2. Tratamiento de imágenes



Figura 5.11: Recorte de la imagen 5.9 que muestra el área común a la imagen 5.8.

Para el caso del ejemplo, como en la gran mayoría de los casos en los que se ha probado el algoritmo, el valor de  $\epsilon$  es cero, es decir que se obtuvo una superposición de las imágenes de prueba sin error como se puede observar en la figura 5.12.



Figura 5.12: Resta de las imágenes de prueba.

Una vez que las imágenes obtenidas y sus áreas de interés se pueden superponer, se puede proceder a analizar el contenido de  $SO_2$ .

Capítulo 5. Procesamiento de imágenes espectroscópicas

# 5.3. Banco de imágenes espectroscópicas

Uno de los objetivos del proyecto era la creación de un banco de imágenes espectroscópicas. Esto es, la creación de un registro electrónico a través del cual se pueda guardar y obtener la información de cada medición de forma rápida y concisa.

Para ello se elaboraron dos programas. El banco de imágenes espectroscópicas fue realizado en *Microsoft Access 2007*. La elección de este programa en particular es que cumple con todos los requerimientos necesarios, además de ser de fácil uso y no muy sofisticado. El otro programa fue una función en MatLab llamada *bin2png*. La idea de esta función es que dado que las imágenes se guardan en un archivo *.bin*, es necesario tener algún tipo de visualización luego de haber realizado las tomas. La función *bin2png* cumple dicho objetivo: crea una imagen *.png* a partir de dos imágenes tomadas al mismo tiempo con extensión *.bin*.

En la figura 5.13 se pueden observar capturas de pantalla del banco de imágenes creado en el proyecto.

El menú principal se divide en dos partes, como se muestra en la figura 5.13a. La primera parte corresponde al alta de la información de la toma. Esto es, el ingreso de la información más relevante de la toma en los siguientes campos:

- Fecha: Fecha de la toma.
- Lugar: Lugar de la toma.
- Hora de inicio: Hora de inicio de la toma.
- Hora de fin: Hora de fin de la toma.
- Filtro Cámara 1: Longitud de onda del filtro correspondiente a la cámara 1.
- Filtro Cámara 2: Longitud de onda del filtro correspondiente a la cámara 2.
- Objetivo: Fuente de emisión a considerar.
- Lente: Tipo de lente a utilizar. Existen dos opciones: de 25 mm o de 50 mm de diámetro.
- Directorio: Directorio de guardado de las imágenes obtenidas<sup>1</sup>.
- Tipo de fuente: Tipo de fuente de luz (solar o artificial).
- Meteorología: Comentarios sobre meteorología.
- Comentarios: Comentarios en general.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>El guardado de todas las imágenes espectroscópicas se realizan en un disco duro externo cuyo contenido es únicamente el mencionado.

5.3. Banco de imágenes espectroscópicas

INGRESO TOMAS	FECHA
	FILTROS
	LUGAR
	TIPO DE FUENTE
	OBJETIVO
	Salir

(a) Pantalla principal del banco de imágenes.

-3	Principal 📴 Date	os Toma				
	😑 Da	itos Toma				
	ID: FECHA: LUGAR: HORA FIN: FILTRO 1: FILTRO 1: FILTRO 2: OBJETIVO:	7 15/04/2014 REFINERIA LA TEJA 11:38 12:45 330 340 CHIMENEAS		LENTE: DIRECTORIO: TIPO DE FUENTE: WETEOROLOGÍA: COMENTARIOS:	50 MM [ Img_L40415_ancap SOL ALGO DE RUBES. VIENTO NNO A 24 KM/H SE UTILIZARON FILTROS 25 MM	
Regi	stro: H 4 2 de 2	🕨 🖻 🙀 Sin filtro	Buscar			

(b) Ejemplo del alta de una toma de imágenes en la base de datos.

Figura 5.13: Setup experimental de las medidas de campo.

Luego del ingreso de la toma, es posible realizar informes a través de la segunda parte del menú principal. Es decir, el usuario puede realizar búsquedas por campos, obteniendo como resultado la lista de los directorios que tienen imágenes con las características de dicha búsqueda, lo cuál es muy útil si se manejan grandes cantidades de imágenes.

Después de obtener la información del directorio donde se encuentran las imágenes se puede proceder a visualizarlas de manera rápida a través de las imágenes .png creadas por la función bin2png.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.
# Capítulo 6 Celdas de calibración de $SO_2$

Las celdas de  $SO_2$  son el instrumento que permite calibrar la relación entre la absorbancia aparente (obtenida en la evaluación DOAS de las imágenes) y la concentración de gas presente en ellas.

La idea básica de la calibración consiste en tomar una imagen con el filtro de 310 nm (donde el  $SO_2$  absorbe radiación electromagnética) y otra con el filtro de 330 nm (donde el gas no lo hace). Se procesa de la misma manera que las imágenes y a partir de allí es posible obtener un valor promedio de absorbancia aparente para cada concentración. Luego, se deduce la relación entre ellas y se obtiene la curva de calibración para la concentración.

Este paso es muy importante dado que sin él no sería posible obtener una cuantificación exacta de la contaminación en un área.

## 6.1. Características y calibración

Las celdas de  $SO_2$  se muestran en la figura 6.1. Para este proyecto se contó con cinco celdas cuyas concentraciones (en ppm.m) son: 94, 194, 480, 985 y 1748 con una tolerancia del 10%. En la figura 6.2 se pueden observar las celdas en su respectivo soporte para ser medidas.



Figura 6.1: Celdas utilizadas en el proyecto para calibrar el sistema.

La calibración del sistema con las celdas se realizó mediante la toma de dos imágenes para cada filtro: una imagen con las celdas y una imagen del cielo (*back*- Capítulo 6. Celdas de calibración de  $SO_2$ 



Figura 6.2: Celdas colocadas en el soporte construido para su medición.

*ground*) para así utilizar los métodos de evaluación A y B que se discutieron en el capítulo 5. Luego se realiza el mismo tipo de análisis que cuando se tienen emisiones industriales.

La diferencia radica en que es posible relacionar con las celdas, el valor de la absorbancia aparente calculada con una determinada concentración.

# 6.2. Setup experimental

El setup experimental propuesto para la calibración se observa en la figura 6.3.



Figura 6.3: Setup experimental para la calibración. Las cámaras se encuentran enfocando al soporte con las celdas de  $SO_2$ .

El mismo consiste en colocar las cinco celdas juntas en un mismo soporte frente a cada cámara y tomar la imagen correspondiente. Una vez que se obtienen dichas imágenes, se procede a evaluarlas mediante el método DOAS para obtener la absorbancia aparente.

Luego de obtener la absorbancia aparente para la imagen, se calibra la relación entre ella y la concentración en ppm.m relacionando el valor promedio de la imagen evaluada en la región interna de cada celda en función del valor nominal de cada una. La anterior relación se invierte pixel a pixel y se obtiene la imagen final en ppm.m.

## 6.3. Resultados

En primer lugar, se evaluaron las imágenes de las celdas utilizando el método A para corregir. Para calibrar el sistema, se utilizaron imágenes que no estén saturadas tomadas a distintos tiempos de exposición y que además la saturación sea similar en ambas. Para verificar dicha condición, se halló el porcentaje de saturación para cada pixel en un área de la imagen que sea de interés a analizar (se hizo foco en el centro de la imagen, dejando de lado las aberraciones por vignetting).

En segundo lugar, se evaluaron las mismas imágenes, pero utilizando el método B teniendo en cuenta el área de la imagen que se quiere analizar.

Luego de realizar las evaluaciones, se procedió a realizar el ajuste de la relación entre la absorbancia aparente con la concentración de las celdas, observando el comportamiento para una calibración con un polinomio de orden 1 y con uno de orden 2. Esto es debido a que a concentraciones mayores de 2000 ppm.m aproximadamente, la relación ya deja de ser lineal [3].

Por lo tanto, encontrar como se comporta el sistema que se describe en este proyecto para la calibración y demostrar que la relación es lineal, es de suma importancia para que la misma sea correcta.

Se analizarán cuatro conjuntos (*sets*) de imágenes. Dos para el día 15 de abril de 2014 y dos para el día 16 de abril 2014, que cumplen con ciertas condiciones en la saturación de las imágenes. Para cada set, se analizó el comportamiento con los dos polinomios.

## 6.3.1. 15 de Abril de 2014

### Evaluaciones utilizando Método A

#### Primer Set - 12:34:32

Para el primer set del día 15 de abril, se trabajó con imágenes tomadas con un tiempo de exposición de 0.7 s para la cámara con el filtro de 310 nm (cámara 1 en adelante) y 0.08 s para la cámara con el filtro de 330 nm (cámara 2 en adelante). Todas las imágenes fueron tomadas en el mismo instante (esto lo garantiza el software de adquisición), permitiendo así descartar la influencia de la variación de la posición del sol en las mediciones. Además se utilizaron los diafragmas de ambas lentes en f/5, 6. Dichas imágenes se pueden observar en la figura 6.4.





Figura 6.4: Primer set de imágenes a analizar del día 15 de abril de 2014.

Como se puede observar en la figura 6.4, este grupo de imágenes cumple en principio con la condición de que la saturación sea similar en todas, como se muestra en la tabla 6.1.

Imagen	Saturación Promedio [%]	
Celda 310 nm	50,45	
Celda 330 nm	50,79	
Cielo 310 nm	53,54	
Cielo 330 nm	57,48	

Tabla 6.1: Porcentaje de saturación de las imágenes de la figura 6.4.

Una vez verificado que el porcentaje de saturación de las imágenes es similar, se procedió a evaluar las imágenes mencionadas anteriormente mediante los algoritmos realizados obteniendo los resultados de la figura 6.5.

Calculando el valor de  $\mathbb{R}^2$  se obtienen los valores mostrados en la tabla 6.2.



(a) Calibración con polinomio de <br/>or-(b) Calibración con polinomio de orden 1 $$\rm den\ 2$$ 



(c) Resultado de la calibración con(d) Resultado de la calibración con polinomio de orden 1 polinomio de orden 2

Figura 6.5: Resultados de la calibración con distintos polinomios para el primer set de imágenes.

Orden Polinomio	$R^2$
1	0,976
2	0,979

Tabla 6.2: Valores de  $\mathbb{R}^2$  para los distintos ajustes con polinomios para el primer set de imágenes.

#### Segundo Set - 12:35:44

De la misma forma, se trató con otro set de imágenes pero con tiempos de exposición de 0.65 s para la cámara 1 y 0.07 s para la cámara 2, manteniendo la posición del diafragma en f/5, 6. Las mismas se pueden observar en la figura 6.6.

Se halló nuevamente la saturación promedio de los pixels de cada imagen y los resultados se muestran en la tabla 6.3.

Se analizó el segundo set con polinomios de distinto orden y se obtuvieron los resultados de la figura 6.3. En la tabla 6.4 se pueden observar los valores de  $R^2$  para cada caso de estudio en el orden del polinomio.

De la figura 6.7 se ve nuevamente que no existen grandes diferencias entre la calibración con un polinomio de orden 1 o de orden 2 por lo que se puede calibrar el sistema con un polinomio de orden 1 sin introducir un error perceptible o por



Capítulo 6. Celdas de calibración de  $SO_2$ 

Figura 6.6: Segundo set de imágenes a analizar del día 15 de abril de 2014.

Imagen	Saturación Promedio [%]
Celda 310 nm	46,43
Celda 330 nm	45,31
Cielo 310 nm	54,89
Cielo 330 nm	56,23

Tabla 6.3: Porcentaje de saturación de las imágenes de la figura 6.6.

Orden Polinomio	$R^2$
1	0,985
2	0,989

Tabla 6.4: Valores de  $\mathbb{R}^2$  para los distintos ajustes con polinomios para el segundo set de imágenes.

encima del error inherente al método.



(a) Calibración con polinomio de <br/>or-(b) Calibración con polinomio de orden 1 $$\rm den\ 2$$ 



(c) Resultado de la calibración con(d) Resultado de la calibración con polinomio de orden 1 polinomio de orden 2

Figura 6.7: Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segundo set de imágenes.

En primera instancia y de acuerdo a la tablas 6.2 y 6.4 el ajuste con un polinomio de orden 1 tiene el mismo desempeño que con uno de orden 2. Sin embargo observando las figuras 6.5a, 6.5b, 6.7a y 6.7b se puede ver que en las celdas con mayor concentración, en algunos pixels, la misma aumenta para la calibración con el polinomio de grado 2. Esto se debe al mismo comportamiento del polinomio. Sin embargo esta diferencia es pequeña y no introduce más error que el que se puede obtener al tomar imágenes con distinto tiempo de exposición por ejemplo.

De todas maneras, es necesario notar que la relación a partir de aproximadamente 2000 ppm.m no es lineal (o más precisamente, no es polinómica), por lo que si se quiere llegar a calibrar un sistema de este estilo (cuyo objetivo sean emisiones de más de 2000 ppm.m), es necesario probar con polinomios de orden mayor a 1 y quizás con otras funciones como logarítmicas, dado que lo anteriormente presentado se desprende de la ley de Lambert-Beer. Capítulo 6. Celdas de calibración de  $SO_2$ 

#### Evaluaciones utilizando Método B

Realizando el mismo análisis, pero ahora sin corregir con imágenes del cielo, se obtuvieron los siguientes resultados.

Primer Set - 12:34:32



(a) Calibración con polinomio de or-(b) Calibración con polinomio de orden 1 $$\rm den\ 2$$ 



(c) Resultado de la calibración con(d) Resultado de la calibración con polinomio de orden 1 polinomio de orden 2

Figura 6.8: Resultados de la calibración con distintos polinomios para el primer set de imágenes, evaluando por el método B.

Orden Polinomio	$R^2$
1	0,977
2	0,967

Tabla 6.5: Valores de  $R^2$  para los distintos ajustes con polinomios para el primer set de imágenes, evaluando por el método B.

En primer lugar se observa que al no corregir con una imagen de cielo para cada filtro, la absorbancia aparente hallada en el ajuste, tanto lineal como cuadrático, para valores muy pequeños de concentración puede llegar a ser negativa, introduciendo error. De todas formas, dichos valores pequeños si son menores al límite de detección del sistema pueden no detectarse, por lo que se deben tener en cuenta cuestiones referidas al límite de detección al evaluar. Sin embargo, en concreto para este primer set evaluado mediante el método B, se puede observar que se obtienen diferencias de entre 250 a 300 ppm.m en las celdas de mayor concentración. Esto lleva a sobreestimar (para estas mediciones en particular) las concentraciones de gas utilizando un polinomio de orden 2 para calibrar.

#### Segundo Set - 12:35:44



(a) Calibración con polinomio de <br/>or-(b) Calibración con polinomio de orden 1 $$\rm den\ 2$$ 



(c) Resultado de la calibración con(d) Resultado de la calibración con polinomio de orden 1 polinomio de orden 2

Figura 6.9: Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segundo set de imágenes, evaluando por el método B.

Orden Polinomio	$R^2$
1	0,981
2	0,976

Tabla 6.6: Valores de  $R^2$  para los distintos ajustes con polinomios para el segundo set de imágenes, evaluando por el método B.

Al igual que para la evaluación de las imágenes utilizando el método A, se observa un comportamiento muy similar entre ambos polinomios que se puede resumir a partir de la tabla 6.6. Las imágenes evaluadas en las figuras 6.9c y 6.9d dan evidencia de que se observa prácticamente el mismo comportamiento,

# Capítulo 6. Celdas de calibración de $SO_2$

obteniendo en las celdas de mayor concentración algunas diferencias, pero lógicas debido al mismo método de calibración y de normalización de las imágenes de *background*.

## 6.3.2. 16 de Abril de 2014

Al igual que en el día 15 de Abril, se tomaron imágenes de las distintas celdas para calibrar el sistema. Nuevamente se procedió a tomar dos sets de imágenes no consecutivos y se las evaluó mediante los dos métodos propuestos y así obtener la calibración mediante los dos polinomios.

Para observar las posibles diferencias, se compararon imágenes obtenidas con el diafragma en f/5, 6 y tomando tiempos de exposición donde el porcentaje de saturación promedio en las imágenes sean similares. De todas las imágenes adquiridas, se tomaron los sets que se presentan a continuación.

### Evaluaciones utilizando Método A

#### Primer Set - 12:29:09

Se seleccionaron las imágenes de la figura 6.10. Las mismas tienen un tiempo de exposición de 0.7 s para la cámara 1 y 0.08 s para la cámara 2. En la tabla 6.7 se pueden observar los valores de saturación promedio en la zona de interés de cada imagen.



Figura 6.10: Primer set de imágenes a analizar del día 16 de abril de 2014.

Capítulo 6. Celdas de calibración de  $SO_2$ 

Imagen	Saturación Promedio [%]
Celda 310 nm	43,80
Celda 330 nm	48,22
Cielo 310 nm	53,30
Cielo 330 nm	60,60

Tabla 6.7: Porcentaje de saturación de las imágenes de la figura 6.10.

De acuerdo a lo que se observa en la tabla 6.7 las saturaciones de las imágenes de las celdas por un lado y los cielos por otro, son bastante similares, por lo que se procedió a analizarlas con los distintos métodos.

En la figura 6.11 se pueden observar las celdas evaluadas con polinomios de distinto orden.



(a) Calibración con polinomio de <br/>or-(b) Calibración con polinomio de orden 1 $$\rm den\ 2$$ 



(c) Resultado de la calibración con(d) Resultado de la calibración con polinomio de orden 1 polinomio de orden 2

Figura 6.11: Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segundo set de imágenes, evaluando por el método B.

Orden Polinomio	$R^2$
1	0,981
2	0,974

Tabla 6.8: Valores de  $R^2$  para los distintos ajustes con polinomios para el primer set de imágenes del día 16, evaluando con método A.

#### Segundo Set - 12:29:40

Para el segundo set, se utilizaron imágenes con un tiempo de exposición de 0.75 s para la cámara 1 y 0.09 s para la cámara 2, manteniendo el diafragma constante en ambas lentes en una posición de f/5, 6. Las imágenes escogidas, tanto celdas como *background*, se muestran en la figura 6.12.



Figura 6.12: Segundo set de imágenes a analizar del día 16 de abril de 2014.

Al evaluar las imágenes que se observan en la figura 6.12 se obtienen los resultados mostrados en la figura 6.13 y en la tabla 6.10.

En primer lugar, se puede observar que los porcentajes de saturación de las imágenes utilizadas (tablas 6.7 y 6.9) son sensiblemente distintos comparándolos con los del día 15. Esto es debido a la distinta iluminación presente en ambos días (dado que los tiempos de integración para cada imagen en uno de los casos es el mismo y en el otro son muy similares y la hora en que se sacaron las imágenes es prácticamente la misma). Además es necesario notar que el día 15 de abril, el cielo

Capítulo 6. Celdas de calibración de  $SO_2$ 

Imagen	Saturación Promedio [%]	
Celda 310 nm	49,52	
Celda 330 nm	57,06	
Cielo 310 nm	57,43	
Cielo 330 nm	$68,\!54$	

Tabla 6.9: Procentaje de saturación de las imágenes de la figura 6.12.



(a) Calibración con polinomio de or-(b) Calibración con polinomio de orden 1 $$\rm den\ 2$$ 



(c) Resultado de la calibración con(d) Resultado de la calibración con polinomio de orden 1 polinomio de orden 2

Figura 6.13: Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segundo set de imágenes, evaluando por el método A.

Orden Polinomio	$R^2$
1	0,972
2	0,998

Tabla 6.10: Valores de  $R^2$  para los distintos ajustes con polinomios para el segundo set de imágenes del día 16, evaluando con método A.

se encontraba sensiblemente cubierto en relación al día 16 de abril, por lo que ello hace que las diferencias resalten.

Por lo tanto se concluye que es necesario tener una calibración para cada día

de medición. Es decir, no se puede utilizar calibraciones de días distintos a las mediciones realizadas en determinado día. Factores de iluminación, nubosidad, aerosoles, entre otros, pueden afectar sensiblemente los niveles de intensidad de las imágenes para días distintos.

Otro factor importante a tener en cuenta es la posición del sol. Al cambiar la posición a lo largo del día, para una misma dirección de observación, la iluminación varía, por lo que si se quieren realizar tomas a lo largo del día será necesario tomar varias veces imágenes de las celdas y tener distintas calibraciones para distintos momentos.

Volviendo a los resultados de la calibración para el día 16, se puede observar que en los casos estudiados se vuelve a repetir el comportamiento con polinomios de distinto orden, obteniendo muy pocas diferencias entre los resultados que se muestran en las figuras 6.11c y 6.11d y las figuras 6.13c y 6.13d.

#### Evaluaciones utilizando Método B

Para este caso, se realizó el mismo análisis que para el día 15 de Abril. Primer Set - 12:29:09



(a) Calibración con polinomio de <br/>or-(b) Calibración con polinomio de orden 1 $$\rm den\ 2$$ 



(c) Resultado de la calibración con(d) Resultado de la calibración con polinomio de orden 1 polinomio de orden 2

Figura 6.14: Resultados de la calibración con distintos polinomios para el primer set de imágenes, evaluando por el método B.

Capítulo 6. Celdas de calibración de  $SO_2$ 

Orden Polinomio	$R^2$
1	0,985
2	0,984

Tabla 6.11: Valores de  $R^2$  para los distintos ajustes con polinomios para el primer set de imágenes, evaluando por el método B.

Segundo Set - 12:29:40



(a) Calibración con polinomio de <br/>or-(b) Calibración con polinomio de orden 1 $$\rm den\ 2$$ 



(c) Resultado de la calibración con(d) Resultado de la calibración con polinomio de orden 1 polinomio de orden 2

Figura 6.15: Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segundo set de imágenes, evaluando por el método B.

Orden Polinomio	$R^2$
1	0,973
2	0,985

Tabla 6.12: Valores de  $R^2$  para los distintos ajustes con polinomios para el segundo set de imágenes, evaluando por el método B.

Nuevamente se observan los comportamientos relativos a la no influencia del orden del polinomio para calibrar el sistema, como se observa en la figura 6.15.

## 6.4. Conclusiones

Del análisis de los resultados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

• La calibración para este sistema no mejora sustancialmente si se utiliza un polinomio de orden 2 como alternativa al polinomio de orden 1 dado que para las concentraciones existentes en las celdas, la relación entre la absorbancia aparente y dichas concentraciones es lineal.

De todas maneras hay que considerar la alternativa de si se mide en situaciones de elevada concentración de  $SO_2$  (tanto como para que la relación entre la absorbancia aparente y la concentración de la emisión no sea lineal) o en el caso de tener celdas con mayores concentraciones. Por lo tanto en este proyecto, se realizarán calibraciones con polinomios de orden 1 para las evaluaciones de las imágenes.

- Para cuantificar correctamente las emisiones, es necesario realizar calibraciones para cada día de medición, por más que la iluminación del área objetivo a medir sea igual para cada día, ya que es difícil sean idénticas de un día a otro.
- Al tomar las imágenes para cada celda, es necesario que las mismas queden lo más centrado posible en el sistema. Esto es una complicación al momento de medir, porque no pueden estar demasiado cerca de las cámaras dado que debido a las distancias se puede no observar la misma área de cielo de fondo, pero tampoco demasiado lejos y obtener muy pocos puntos para promediar la absorbancia aparente dentro de cada celda.
- Una forma para solucionar el ítem anterior es poner cada celda de SO<sub>2</sub> inmediatamente adelante de cada lente y así tener una gran área para promediar la absorbancia.
- Es importante que en el setup experimental, las celdas se encuentren lo más paralelas posible al sistema óptico de las cámaras.
- A la hora de calibrar es importante tener en cuenta que los valores de concentración de las celdas para calibrar, tengan todas absorbancias menores o iguales a la absorbancia de la emisión a medir. Si esto no se tiene en cuenta se puede sobreestimar de manera considerable la concentración de la emisión. A modo de ejemplo: si la emisión tiene una absorbancia máxima de 0.3, no se deben utilizar celdas con absorbancia mayores a ese valor, como por ejemplo, de 0.4 en adelante. Así se evitarían errores sobreestimando concentraciones.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 7 Medidas y análisis de datos

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de las emisiones de la refinería de combustible "La Teja", realizadas los días 15 y 16 de abril de 2014. También se muestra la rutina sugerida para la medición junto a los cuidados que hay que tener en la adquisición de imágenes.

## 7.1. Procedimientos y rutinas de medidas

En esta sección se presentan los cuidados necesarios a tener en cuenta y los pasos a seguir en la rutina de medidas, para una correcta adquisición de las imágenes.

Para elegir una buena ubicación al momento de realizar medidas de campo, es óptimo ubicarse en una posición tal que la dirección de propagación de la pluma sea perpendicular a la linea imaginaria objetivo-UVCam. Además es necesario tener en cuenta las condiciones meteorológicas (nubosidad, neblina entre otras), ya que las mismas influyen en el desempeño del método DOAS [25].

Las cámaras cuentan con control de temperatura lo que permite establecer su temperatura interna para cada medida. Dado que el enfriamiento tiene un tiempo hasta alcanzar el régimen de aproximadamente 15 minutos, es de gran importancia comenzar con esta tarea al momento de adquirir para hacer un uso más eficiente del tiempo, de esta manera se puede armar la óptica del sistema y tomar las imágenes de prueba, para ajustar el foco de las lentes y los tiempos de exposición de las cámaras. Debido a que el sistema está constituido por dos cámaras, es necesario evitar obstáculos que se presenten a distinta distancia del objetivo, ya que los mismos harían aparecer en las imágenes, falsas referencias espaciales para el algoritmo de superposición, que impide obtener una correcta superposición de las imágenes.

A pesar de que el método A de procesamiento de las imágenes normaliza las intensidades de las imágenes de los cielos libres de emisiones, para minimizar la influencia de esta normalización, es recomendable que la adquisición de las imágenes que se utilizan para realizar la corrección (imagen de corriente de oscuridad e imagen de cielo libre de emisiones) se haga con el mismo tiempo de exposición que

#### Capítulo 7. Medidas y análisis de datos

se utiliza para la medida de la pluma.

Otro cuidado a tener en cuenta al momento de adquirir la imagen del cielo libre de pluma, es no alejarse demasiado del objetivo, y tratar de mantener el objetivo apuntando a la misma altura sobre la superficie, para obtener de esta manera una imagen del cielo con aproximadamente la misma iluminación, lo que favorece la corrección del *background*.

## 7.2. Medidas de campo

El sistema completo (cámaras, lentes y filtros) se testeó a través de medidas de campo. La fuente de emisiones escogida fue la refinería de combustible localizada en el barrio "La Teja" de la ciudad de Montevideo. En la figura 7.1 se puede observar el lugar elegido para las mediciones junto a la localización de la refinería.

Las pruebas se llevaron a cabo los días 15 y 16 de abril de 2014. A simple vista la refinería estaba activa como se puede apreciar en las figuras 7.2a y 7.2b.



Figura 7.1: Localización del punto de observación en función de la refinería.

En la tabla 7.1 se pueden observar las condiciones meteorológicas junto al horario de comienzo y fin de las mediciones. Es importante notar que las medidas se realizaron en condiciones meteorológicas diferentes y se discutirá si afectan a las medidas más adelante. Esto quiere decir que el día 15 de abril el cielo estaba algo nublado, mientras que el día 16 estaba completamente despejado, haciéndolo ideal para realizar mediciones de desempeño.

La instalación de los equipos tardó aproximadamente veinte minutos: se montaron las cámaras en el trípode, se estabilizó la temperatura en  $(10 \,^{\circ}\text{C})$  y se hizo foco con las lentes. Una vez que todo esto estuvo listo, se procedió a adquirir las imágenes.

### 7.2. Medidas de campo



(a) Medidas de campo del día 15/4.

(b) Medidas de campo del día 16/4.

Figura 7.2: Setup experimental de las medidas de campo.

Día	Inicio	Fin	<b>Temp.</b> [°C]	Humedad [%]	Presión [hPa]	Viento
15/4/14	11:38	12:45	19	56	1019	NNO - $24.1 \mathrm{km}\mathrm{h}^{-1}$
16/4/14	11:45	13:00	21	60	1015	NNO - $20.4 \mathrm{km}\mathrm{h}^{-1}$

	Tabla 7	.1: Info	rmación	meteorológica	de	las	mediciones	de	campo	o. Fuente:	SUML	J.
--	---------	----------	---------	---------------	----	-----	------------	----	-------	------------	------	----

Las imágenes adquiridas se tomaron con distintos tiempos de exposición y distintos diafragmas. El detalle de los mismos se presentan en las tablas 7.2 y 7.3 para los días 15/4 y 16/4 respectivamente.

Cámara	Filtro [nm]	Diafragma	Tiempos exp. [s]
1	310	f/5, 6; f/4, 5	0,4; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,8
2	330	f/5, 6; f/8	$0,05;\ 0,07;\ 0,08;\ 0,09;\ 0,15;\ 0,2;\ 0,25$

Tabla 7.2: Resumen de los tiempos de exposición y los diafragmas utilizados para las medidas del día 15/4.

Cámara	Filtro [nm]	Diafragma	Tiempos exp. [s]
1	310	f/5, 6; f/4, 5	$0,35;\ 0,4;\ 0,5;\ 0,6;\ 0,65;\ 0,7;\ 0,8;\ 0,85$
2	330	f/5, 6; f/16	0,05; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6

Tabla 7.3: Resumen de los tiempos de exposición y los diafragmas utilizados para las medidas del día 16/4.

Los tiempos de exposición y las aberturas del diafragma fueron escogidos teniendo en cuenta lo presentado en el capítulo 2, sección 2.3. La eficiencia cuántica de la cámara y las transmitancias de los filtros son distintas y es necesario tomar imágenes con similar saturación en el área de trabajo de interés. Para lograr este objetivo se compensan las imágenes adquiridas con distintos tiempos de exposi-

#### Capítulo 7. Medidas y análisis de datos

ción entre ellas. Ello hace que se hayan tomado imágenes con conjuntos de tiempos distintos para lograr los objetivos propuestos.

Luego de encontrar los tiempos necesarios y tomar las imágenes de las emisiones, se procedieron a tomar las imágenes del cielo libre de emisiones (*background*), las imágenes con las celdas de  $SO_2$  para calibración y las imágenes para la corrección de la corriente de oscuridad.

Para corregir la corriente de oscuridad y el background, se adquirieron imágenes utilizando los mismos tiempos de exposición y aperturas de diafragmas que los utilizados en las imágenes adquiridas de las emisiones.

## 7.2.1. Emisiones

En la figuras 7.3a y 7.3b se puede observar un ejemplo de las imágenes de las emisiones registradas el día 16 de abril con las cámaras. Claramente se puede observar el efecto de la absorción y la no absorción del gas a estudiar. A 310 nm se observa que el gas absorbe radiación electromagnética y es posible observar la pluma y su forma. Por el contrario, a 330 nm prácticamente la misma no se observa. La combinación de estos dos efectos produce los resultados que se mostrarán más adelante.



(a) Imagen de la emisión con el filtro de 310 nm. (b) Imagen de la emisión con el filtro de 330 nm.

Un conjunto de imágenes de las emisiones de la refinería obtenidas el día 15 de abril de 2014, entre la hora 11:40:03 y la hora 11:41:42, se muestran en las figuras 7.4 (método A) y 7.5 (método B), y las del día 16 de abril de 2014 (entre la hora 11:50:12 Y la hora 11:52:55) se muestran en las figuras 7.6 (método A) y 7.7 (método B). Las imágenes se encuentran con el correspondiente procesamiento de corrección de corriente de oscuridad, de superposición de las mismas y la selección

Figura 7.3: Emisión de la refinería tomada con los distintos filtros para el día 16/4.

## 7.2. Medidas de campo

del área de interés. El resultado se encuentra expresado en absorbancia aparente, descrito según la ecuación (2.5).



## Capítulo 7. Medidas y análisis de datos

Figura 7.4: Set de medidas del día 15/04/2014 dónde se muestra los valores de absorbancia aparente con el método A.

## 7.2. Medidas de campo



Figura 7.5: Set de medidas del día 15/04/2014 dónde se muestra los valores de absorbancia aparente con el método B.



## Capítulo 7. Medidas y análisis de datos

Figura 7.6: Set de medidas del día 16/04/2014 dónde se muestra los valores de absorbancia aparente con el método A.

## 7.2. Medidas de campo



Figura 7.7: Set de medidas del día 16/04/2014 dónde se muestra los valores de absorbancia aparente con el método B.

#### Capítulo 7. Medidas y análisis de datos

## 7.2.2. Calibración de $SO_2$

Luego de haber adquirido las imágenes de la emisión, se procedió a capturar las imágenes para calibrar con las celdas de  $SO_2$ , teniendo en cuenta lo presentado en el capítulo 6, en especial, lo hablado sobre la absorbancia de las emisiones y las celdas. A partir de las absorbancias de las emisiones presentadas en las figuras 7.4, 7.5, 7.6 y 7.7, se procedió a calibrar teniendo en cuenta solamente las celdas con concentraciones de 94, 480 y 985 ppm.m.

En las figuras 7.8 y 7.9 se observan las absorbancias aparentes halladas con la calibración y el correspondiente resultado de la calibración aplicados a las celdas. En la tablas 7.4 y 7.5 se resumen las pendientes de la recta de calibración (término a) y el término independiente (b) obtenidas como salidas de la sección de calibración del programa, considerando la función de calibración como una lineal.

Fecha	$a \; [\mathrm{ppm.m}]$	b [ppm.m]		
15/4/14	$2,6840 \times 10^{-4}$	0,022698		
16/4/14	$2,7284 \times 10^{-4}$	-0,00226		

Tabla 7.4: Parámetros de calibración del sistema con el método A.

Fecha	$a \; [ m ppm.m]$	b [ppm.m]
15/4/14	$3,7069 \times 10^{-4}$	-0,051595
16/4/14	$3,7361 \times 10^{-4}$	-0,074570

Tabla 7.5: Parámetros de calibración del sistema con el método B.

Es importante resaltar que pese a la diferencias en las imágenes y a las condiciones de nubosidad en el cielo, la calibración por los dos métodos para ambos días dan prácticamente iguales lo que demuestra lo robusto de la misma.

Sin embargo se observan diferencias para las calibraciones del mismo día aplicando los métodos A y B. Esto se explica debido a que las normalizaciones, si bien se basan en la misma idea, en el método B al no dividir la imagen por una imagen de *background*, no es seguro que se quiten efectos que puedan influír en las medidas como aerosoles por ejemplo, lo que hace que la diferencia exista y sea evidente, por más que sea pequeña en relación al método A.

## 7.2. Medidas de campo



(a) Absorbancia aparente calculada para el día(b) Resultado de la calibración para las celdas con 15/4 con el método A. el método A para el día 15/4.



(c) Absorbancia aparente calculada para el día(d) Resultado de la calibración para las celdas con 15/4 con el método B. el método B para el día 15/4.

Figura 7.8: Resultado de la calibración con celdas el día 15/4.

Capítulo 7. Medidas y análisis de datos



(a) Absorbancia aparente calculada para el día(b) Resultado de la calibración para las celdas con 16/4 con el método A. el método A para el día 16/4.



(c) Absorbancia aparente calculada para el día(d) Resultado de la calibración para las celdas con 16/4 con el método B. el método B para el día 16/4.



## 7.3. Programa de evaluación UVCam

Como parte del proyecto, se diseñó un programa con interfaz de usuario en MatLab, que pudiera realizar toda la etapa de evaluación. Una captura de pantalla del mismo se encuentra en la figura 7.10.



Figura 7.10: Programa de evaluación de imágenes espectroscópicas desarrollado en el proyecto.

Al igual que para el programa de toma y adquisición de imágenes desarrollado, se pueden observar distintos bloques en el programa. A continuación se detallan los mismos.

- **IMAGEN 310 NM**: Sector de carga de imagen tomada con la cámara con el filtro de 310 nm.
- **IMAGEN 330 NM**: Sector de carga de imagen tomada con la cámara con el filtro de 330 nm.
- BACKGROUND: Sector de carga de imágenes de background.
- DARK CURRENT: Bloque de carga y corrección de la corriente de oscuridad. El panel OBJETIVO indica que tipo de imagen se quiere corregir (imagen de emisión, *background* o celdas).
- MATCHING: Bloque para realizar la superposición de imágenes. Permite escoger de antemano que tipo de evaluación realizar, método A ("Con Cielo") o método B ("Sin Cielo") y decidir el umbral necesario para la binarización.

#### Capítulo 7. Medidas y análisis de datos

- CELDAS SO2: Bloque de carga de imágenes, matching y calibración de las celdas. Permite obtener la función de calibración del sistema a partir de las celdas, mediante el ingreso de los valores nominales de las mismas en ppm.m. Como resultado de la calibración se obtienen los coeficientes del polinomio de orden 1 a utilizar y se rellena el campo "Absorbancia".
- PROCESAMIENTO: Bloque de evaluación de imágenes. Permite evaluar las imágenes obtenidas y hacer la conversión de absorbancia aparente a ppm.m.
- **PERFILES DE PLUMA**: Sector que permite obtener distintos cortes transversales (perfiles) de la pluma a partir de la evaluación correspondiente.
- **FLUJO SO2**: Bloque de cálculo de flujo de *SO*<sub>2</sub> (trabajo a futuro).

El correcto funcionamiento del sistema se puede apreciar en el diagrama de flujo de la figura 7.11.



Figura 7.11: Diagrama de flujo del programa de evaluación de imágenes espectroscópicas desarrollado.

7.4. Evaluaciones

## 7.4. Evaluaciones

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de las imágenes que se obtuvieron, utilizando el programa de evaluación UVCam desarrollado. La evaluación se aplicó a las mediciones realizadas los días 15 y 16 de abril de 2014. Se separaron los resultados para ambos métodos, A y B y los mismos se encuentran expresados en absorbancia aparente.

Las medidas del día 15 de abril que se evaluaron fueron tomadas en el intervalo 11:40:03 a 11:41:42, mientras que las medidas del día 16 de abril corresponden al intervalo 11:50:12 a 11:52:47.

## 7.4.1. Método A

Los resultados obtenidos en ppm.m para el día 15/4 se muestran en la figura 7.12 y para el día 16/4 en la figura 7.13. Las evaluaciones se realizaron con el método A y se procesaron las imágenes de la figuras 7.4 y 7.6 mediante una función lineal con los parámetros de la tabla 7.4 de la fecha correspondiente.



15 de abril de 2014

Figura 7.12: Resultados de las medidas del día 15/04/2014 en ppm.m, mediante el método A.

Capítulo 7. Medidas y análisis de datos

16 de abril de 2014



Figura 7.13: Resultados de las medidas del día 16/04/2014 en ppm.m, mediante el método A.

## 7.4.2. Método B

Al igual que para el día 15/4, se calibraron las imágenes de la figuras 7.5 y 7.7 mediante una función lineal, cuyos parámetros se encuentran en la tabla 7.5. Los resultados correspondientes se muestran en las figuras 7.14 y 7.15 para los días 15 y 16 respectivamente.

15 de abril de 2014



Figura 7.14: Resultados de las medidas del día 15/04/2014 en ppm.m, mediante el método B.



16 de abril de 2014



Figura 7.15: Resultados de las medidas del día 16/04/2014 en ppm.m, mediante el método B.
7.5. Resultados

### 7.5. Resultados

#### 7.5.1. Comparación de métodos

Para la comparación del desempeño de los métodos de evaluación, se procedió a obtener perfiles (datos obtenidos manteniendo constante la posición horizontal). En la primer imagen de las figuras 7.16 y 7.17 se señalan con segmentos rojos los perfiles escogidos para cada día. Dicha información se muestra para el método A en la columna central y para el método B en la columna de la derecha.

#### 15 de abril de 2014



Figura 7.16: Perfiles hallados para el día 15 de abril, correspondientes a las horas 11:40:03, 11:41:18 y 11:41:25 en orden superior a inferior.

#### Capítulo 7. Medidas y análisis de datos

#### 16 de abril de 2014



Figura 7.17: Perfiles obtenidos para el día 16 de abril, correspondientes a las horas 11:50:12, 11:52:47 y 11:52:55 en orden superior a inferior.

Observando las figuras 7.16 y 7.17 se puede decir en primer lugar que los valores máximos adquiridos (considerando los perfiles 1,2 y 3 correspondientes a la pluma) de las emisiones de  $SO_2$  en ambos métodos son muy similares para cada toma realizada. Estos valores oscilan entre 600 ppm.m y 1000 ppm.m para el día 15 de abril y entre 400 ppm.m y 800 ppm.m para el día 16 de abril.

Por otra parte es posible observar que pese a que el día 15 de abril el cielo se encontraba algo cubierto de nubes, no afectó el desempeño del sistema, dado que se obtuvieron valores similares para ambos métodos, en la región contigua a la pluma (alrededor del pixel 400 aproximadamente). Sin embargo, una diferencia notoria entre ambos métodos en este día es el comportamiento del resultado en la región donde la pluma no se encuentra (desde el pixel número 0 al pixel número 350 aproximadamente). Con el método A, para todos los cortes transversales realizados a las tres tomas mostradas, los niveles de concentración de  $SO_2$  se muestran negativos (entre 0 ppm.m y -200 ppm.m) y constantes en las regiones fuera de la pluma, coherente con lo que se esperaba.

Los valores negativos se pueden explicar dado que la evaluación es diferencial,

es decir, se referencia en base a una imagen en que se supone que se obtuvo en el mismo instante que la de la emisión. Esto no es así, dado que las imágenes de *background* se tomaron al final de cada medición. En este caso, las referencias se tomaron aproximadamente 35 minutos después de las imágenes de las emisiones. Cambios en la iluminación y posición del sol llevan a que estos errores surjan. Teniendo en cuenta esto último y cómo puede afectar en la misma pluma, se estima que el método puede introducir un error de hasta el 20 % para esta medida en particular.

Para el caso del método B, el comportamiento es peor para la región mencionada anteriormente. Claramente se observa que al alejarse de la pluma hacia un área de cielo limpio de manera vertical se encuentran valores cada vez más negativos (aproximadamente entre -400 ppm.m a -200 ppm.m) y al acercarse a la pluma estos valores aumentan hasta acercarse prácticamente a cero. Es importante observar aquí que para este método, los pixeles de la región alrededor de la pluma se encuentran prácticamente en cero por lo que demuestra que la operación se realizó correctamente para las referencias escogidas.

Además se demuestra que la elección del área para normalizar mediante el método B, localizándose esta área a la altura de la pluma, pero en la región de *background*, es correcta.

Otra posible observación a realizar, en especial con los cortes 1, 2 y 3 es que claramente se ve de qué manera varía la forma y el ancho de la pluma. Esto por lo tanto permite que mediante este método de medición remota, además de conocer y cuantificar una emisión, se puedan obtener mediante un correcto procesamiento de la imagen, la velocidad del viento por ejemplo, muy importante para el cálculo de flujo. Este trabajo excede el alcance del proyecto y queda como tarea a futuro.

Para el día 16 de abril, las figuras mostradas en 7.17 muestran el mismo comportamiento que las del día anterior. Para el método A se obtuvieron valores que van desde 0 ppm.m a -200 ppm.m en las regiones de cielo libre de emisiones, y valores máximos de entre 400 ppm.m y 800 ppm.m dependiendo este valor de la distancia del corte a la fuente. La evaluación mediante método B para este día también tiene el mismo comportamiento en la región libre de emisión y la región de la pluma, obteniendo valores en el primer caso que van desde 0 ppm.m a -200 ppm.m y en el segundo caso valores máximos en la pluma de entre 400 ppm.m y 800 ppm.m.

Por lo tanto es importante destacar que si bien fuera de la región de la emisión, los diferentes métodos tienen comportamientos distintos debido a la propia manera de normalizar las imágenes (en especial el método B, que al no utilizar una imagen de *background* para corregir, pueden no desaparecer efectos de aerosoles u otras interferencias en las medidas), en la región en que se encuentra la pluma los métodos cuantifican prácticamente la misma concentración. Esto es muy útil dado que puede ocurrir que no se tenga la posibilidad de tomar imágenes de *background* por distinto motivo.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

## Capítulo 8 Conclusiones

En este último capítulo se presentarán las conclusiones obtenidas a partir de todo lo descrito anteriormente. Las conclusiones se basarán en las medidas realizadas los días 15 y 16 de abril de 2014.

Además se discutirán las dificultades que se sortearon en el transcurso del proyecto y se hará un breve resumen del trabajo a futuro y las perspectivas.

#### 8.1. Conclusiones del trabajo

El desarrollo del sistema UVCam le brinda una nueva dimensión al estudio de emisiones atmosféricas del grupo de Óptica Aplicada. La ventaja principal respecto a otros métodos es obvia. Como resultado de cada medida se obtiene una imagen espectroscópica que contiene la concentración de  $SO_2$  con una alta resolución temporal. Dicha resolución es de aproximadamente dos segundos.

El método propuesto en este proyecto (método B) tiene un desempeño muy bueno y prácticamente similar al hallado en la bibliografía (método A), pudiéndose implementar como alternativa si no se tiene oportunidad de obtener imágenes de background. Se lograron medir para el día 15 de abril de 2014 concentraciones de  $SO_2$  de hasta 800 ppm.m, y para el día 16 de abril de 2014 se midieron concentraciones de hasta 900 ppm.m. También se pudo obtener una aproximación a la dinámica de la pluma en la atmósfera, dado que es posible seleccionar mediante el sistema desarrollado, distintos cortes transversales sobre la emisión y así observar su evolución a través del espacio.

La creación de un banco de imágenes espectroscópicas permitió llevar un registro de las características de adquisición de las mismas. Todo esto se dio gracias a que desde el principio se fue muy exigente con los resultados de cada etapa del proyecto. Obtener un correcto funcionamiento del sistema UVCam, es un objetivo que se alcanzó gracias a que se logró superar cada una de las mismas; desde la comunicación de las cámaras con la computadora, la caracterización de los filtros ópticos y las cámaras CCD, la obtención de un protocolo o rutina para la adquisición de las medidas, el desarrollo del software de adquisición y control, el desarrollo del software de tratamiento y procesamiento de las imágenes, hasta el

#### Capítulo 8. Conclusiones

proceso de calibración, sin olvidarse de la experiencia que se obtuvo por parte de los integrantes del grupo, tanto en cada una de esas etapas, cómo en las salidas de campo. Esta experiencia permitió desarrollar un algoritmo de evaluación que tiene un desempeño igual que los algoritmos ya existentes, pero con la ventaja de no necesitar una imagen extra.

#### 8.2. Dificultades y aprendizajes

En el transcurso del proyecto, desde el principio se sortearon muchas dificultades. Desde el comienzo se debió generar un *know how* acerca de muchas de las partes que se utilizaron para armar el sistema de medición, dado que nunca se había trabajado con ninguna de ellas. Un ejemplo fueron las cámaras CCD. Si bien se tenía conocimiento acerca de como funcionaba un espectrómetro, nunca se había trabajado con este tipo de cámaras. Si bien el programa de adquisición de imágenes desarrollado realizó un primer acercamiento a estas herramientas, llevó un tiempo considerable familiarizarse con todos los parámetros necesarios para lograr buenas imágenes. Esto y lograr un rápido armado del sistema óptico (colocación de piezas, hacer foco con lentes, colocación de celdas delante de las cámaras) llevó tiempo de trabajo tanto en campo como en laboratorio, pero se adquirieron una gran cantidad de conocimientos, al punto tal que es posible armar el sistema en aproximadamente 10 minutos.

Más dificultades se encontraron al momento de utilizar el sistema con los filtros de 50 mm de diámetro. El sistema inicial estaba armado para utilizar dichos filtros. Luego de diversas salidas de campo, pruebas en el laboratorio y caracterizaciones se logró determinar que estos filtros no estaban correctamente construidos (precisamente el de 310 nm), lo que llevó a una inversión de tiempo considerable que se aprovechó para ir dejando armado el sistema final.

El mayor problema estuvo cuando una de las cámaras se averió y fue necesario enviarla al exterior para su reparación. Como estaba previsto en el análisis de riesgos del proyecto, sin la cámara es imposible tomar imágenes de emisiones, por lo que a partir de ese día se distribuyeron las tareas para lograr terminar el proyecto a tiempo. Afortunadamente se contaba con medidas de emisiones para analizar.

Un gran aprendizaje del proyecto fue la necesidad de ser críticos con el trabajo experimental. Se aprendió a cuestionarse los resultados y a incentivarnos a volver a obtenerlos a través de distintas medidas de campo. También se fortaleció el hecho de ser perfeccionistas con el trabajo. Intentar siempre apuntar a más y obtener buenos resultados que puedan servir para futuros trabajos, lo que se planea hacer cuando se obtengan mayores mediciones de emisiones.

Una enseñanza importante del proyecto fue también aprender a que muchas veces la solución a utilizar es más simple de lo que se puede pensar desde el comienzo. Esto fue utilizado en diversas oportunidades, como por ejemplo, cuando se quisieron realizar programas complejos y automatizados que intentaran resolver problemas más grandes que los originales. Realizando soluciones simples y menos complejas, se obtuvieron resultados excelentes.

Por lo tanto creemos que este proyecto de fin de carrera fue un aporte notable

para la carrera de ingeniero desde el punto de vista experimental, dado que se realizaron actividades prácticas que nunca se habían hecho a lo largo de la carrera.

### 8.3. Perspectivas y Trabajo a Futuro

Si bien el proyecto final de carrera concluye con este documento, las actividades de investigación del Grupo de Óptica Aplicada con las cámaras CCD continuarán. Por lo tanto como trabajo a futuro quedan los siguientes items:

- Corrección de bugs del programa UVCam: si bien el programa de control y toma de imágenes funciona y cumple con su objetivo, es necesario realizar algunas correcciones inherentes al manejo de excepciones que puedan surgir dentro del programa.
- Medidas de campo: es necesario seguir realizando mediciones de campo para terminar y verificar caracterizaciones del CCD de cada cámara, además de obtener imágenes de nuevas fuentes para cuantificar.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

## Referencias

- G.J.S. Bluth, J.M. Shannon, I.M. Watson, A.J. Prata, and V.J. Realmuto. Development of an ultra-violet digital camera for volcanic SO<sub>2</sub> imaging. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161:47–56, 2007.
- [2] N. Bobrowski, G. Honninger, F. Lohberger, and U. Platt. IDOAS: a new monitoring technique to study the 2D distribution of volcanic gas emissions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 150:329–338, 2006.
- [3] M. P. Dalton, I. M. Watson, P. A. Nandeau, C. Werner, W. Morrow, and J. M. Shannon. Assessment of the UV camera sulfur dioxide retrieval for point source plumes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188:358– 366, 2009.
- [4] G. M. B. Dobson. Forty years' research on atmospheric ozone at oxford: a history. Applied Optics, 7(3):387 – 405, March 1968.
- [5] E. Frins, N. Bobrowski, M. Osorio, N. Casaballe, G. Belsterli, T. Wagner, and U. Platt. Scanning and Mobile multi-axis DOAS measurements of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> emissions from an electric power plant in Montevideo, Uruguay. *Atmospheric Environment*, 2014.
- [6] E. Frins, O. Ibrahim, N. Casaballe, M. Osorio, F. Arismendi, T. Wagner, and U. Platt. Ground based measurements of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> emissions from the oil refinery La Teja in Montevideo City. *Journal of Physics: Conference Series*, 274, 2011.
- [7] E. Frins, M. Osorio, N. Casaballe, G. Belsterli, T. Wagner, and U. Platt. DOAS-measurement of the NO<sub>2</sub> formation rate from NO<sub>x</sub> emissions into the atmosphere. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(5):1165–1172, 2012.
- [8] E. Frins, M. Osorio, N. Casaballe, T. Wagner, and U. Platt. New proposal to measure NO<sub>2</sub> formation rate from NO emissions in the atmosphere. *Journal* of *Physics: Conference Series*, 274, 2011.
- [9] E. Frins, U. Platt, and T. Wagner. High spatial resolution measurements of NO<sub>2</sub> applying topographic target light scattering-differential optical absorption spectroscopy (ToTaL-DOAS). Atmospheric Chemistry and Physics, 8(24):7595-7601, 2008.

#### Referencias

- [10] E. Hecht. Optics. Pearson, 2005.
- [11] James R. Janesick. Scientific Charge-Coupled Devices, volume PM83. SPIE, 2001.
- [12] E. P. Kantzas, A.J.S. McGonigle, G. Tamburello, A. Aiuppa, and R. G. Bryant. Protocols for UV camera volcanic SO<sub>2</sub> measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 194(1?3):55–60, 2010.
- [13] C. Kern, F. Kick, P. Lubcke, L. Vogel, M. Wohrbach, and U. Platt. Theoretical description of functionality, applications, and limitations of SO<sub>2</sub> cameras for the remote sensing of volcanic plumes. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(3):733–749, 2010.
- [14] C. Kern, C. Werner., T. Elias, A. J. Sutton, and P. Lubcke. Applying UV cameras for SO<sub>2</sub> detection to distant or optically thick volcanic plumes. *Journal* of Volcanology and Geothermal Research, 262:80–89, 2013.
- [15] S. Kraus. DOASIS. University of Heidelberg, https://doasis.iup.uniheidelberg.de/bugtracker/projects/doasis/, 2003.
- [16] P. H. Lissberger and W. L. Wilcock. Properties of AU-dielectric interference filters. ii. filters in parallel beams of light incident obliquely and in convergent beams. *Journal of the Optical Society of America*, 49(2):126–130, Febrero 1959.
- [17] F. Lohberger, G. Honninger, and U. Platt. Ground-based imaging differential optical absorption spectroscopy of atmospheric gases. *Applied Optics*, 43:4711–4717, 2004.
- [18] I. Louban, N. Bobrowski, D. Rouwet, S. Inguaggiato, and U. Platt. Imaging DOAS for volcanological applications. *Bulletin of Volcanology*, 71:753–765, 2009.
- [19] P. Lubcke, N. Bobrowski, S. Illing, C. Kern, J. M. Alvarez Nieves, L. Vogel, J. Zielcke, H. Delgado Granados, and U. Platt. On the absolute calibration of SO<sub>2</sub> cameras. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6:677–696, 2013.
- [20] M. M. Millan. Remote sensing of air pollutants. a study of some atmospheric scattering effects. Atmospheric Environment, 14:1241–1253, 1980.
- [21] M. M. Millan and R. M. Hoff. Dispersive correlation spectroscopy: a study of mask optimization procedures. *Applied Optics*, 16:1609–1618, 1977.
- [22] T. Mori and M. Burton. The SO<sub>2</sub> camera: A simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO<sub>2</sub> in volcanic plumes. *Geophysical Research Letters*, 33(24), 2006.
- [23] G. C. Nisulescu, I. Ionel, B. Malan, and M. Dobrin. Remote SO<sub>2</sub> monitoring with UV cameras for stack emissions. *Chemistry Magazine*, 63(9):940–944, 2012.

- [24] U. Platt. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS). Chem. Anal. Series, 127:27–83, 1994.
- [25] U. Platt and J. Stutz. Differential Optical Absorption Spectroscopy. Springer, 2008.
- [26] A. J. Prata. Measuring SO<sub>2</sub> ship emissions with an ultraviolet imaging camera. Atmospheric Measurement Techniques, 7:1213–1229, 2014.
- [27] J. Ramos and E. Frins. Development of a DOAS system for ToTaL-DOAS applications with temperature control. *Journal of Physics: Conference Series*, 274(1), 2011.
- [28] Lord Rayleigh. On the light from the sky, its polarization and colour. Phil. Mag., 1871.
- [29] G. Tamburello, E. P. Kantzas, A. J. S. McGonigle, A. Aiuppa, and G. Giudice. UV camera measurements of fumarole field desgassing. *Journal of Volcanology* and Geothermal Research, 199:47–52, 2011.
- [30] A. C. Vandaele, P. C. Simon, M. Guilmot, M. Carleer, and R. Colin. SO<sub>2</sub> absorption cross section measurement in the UV using a fourier transform spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, 99:25599–25605, 1994.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

## Índice de tablas

1.1.	Actores del proyecto UVCam	5
3.1.	Resultados del cálculo de los centros de los filtros de 25 mm.	26
3.2.	Resultados del cálculo del FWHM de los filtros de 25 mm	27
3.3.	Resultados del cálculo de la transmitancia para los filtros de 25 mm.	27
3.4.	Resultados del cálculo de los centros de los filtros de 50 mm	29
3.5.	Resultados del cálculo del FWHM de los filtros de 50 mm	29
3.6.	Resultados del cálculo de la transmitancia para los filtros de 50 mm.	29
3.7.	Índices de refracción de los distintos compuestos de los filtros a utilizar. Provistos por Asahi Spectra	34
4.1.	Temperaturas y tiempos de exposición utilizados para calcular la	
	corriente de oscuridad	39
4.2.	Resultados obtenidos para la caracterización de la corriente de os-	
	curidad de las cámaras a utilizar	40
6.1.	Porcentaje de saturación de las imágenes de la figura 6.4.	66
6.2.	Valores de $\mathbb{R}^2$ para los distintos ajustes con polinomios para el pri-	
	mer set de imágenes	67
6.3.	Porcentaje de saturación de las imágenes de la figura 6.6	68
6.4.	Valores de $\mathbb{R}^2$ para los distintos ajustes con polinomios para el se-	
	gundo set de imágenes	68
6.5.	Valores de $R^2$ para los distintos ajustes con polinomios para el pri-	
0.0	mer set de imágenes, evaluando por el método B	70
6.6.	Valores de $R^2$ para los distintos ajustes con polinomios para el se-	<b>F</b> 1
07	gundo set de imagenes, evaluando por el metodo B	71
0.1. 6 9	Porcentaje de saturación de las imagenes de la figura $0.10$	14
0.0.	mer set de imágenes del día 16 evaluando con método A	75
69	Procentaie de saturación de las imágenes de la figura 6.12	76
6.10.	Valores de $R^2$ para los distintos ajustes con polinomios para el se-	
	gundo set de imágenes del día 16, evaluando con método A	76
6.11.	Valores de $R^2$ para los distintos ajustes con polinomios para el pri-	
	mer set de imágenes, evaluando por el método B	78
6.12.	Valores de $\mathbb{R}^2$ para los distintos ajustes con polinomios para el se-	
	gundo set de imágenes, evaluando por el método B	78

### Índice de tablas

7.1.	Información meteorológica de las mediciones de campo. Fuente: SU-	
	MU	83
7.2.	Resumen de los tiempos de exposición y los diafragmas utilizados	
	para las medidas del día $15/4$	83
7.3.	Resumen de los tiempos de exposición y los diafragmas utilizados	
	para las medidas del día $16/4$	83
7.4.	Parámetros de calibración del sistema con el método A	90
7.5.	Parámetros de calibración del sistema con el método B	90

1.1.	Resultados obtenidos en volcanes [22]	3
2.1.	Representación de las influencias de una medida DOAS en la atmósfe- ra [25], siendo la fuente de luz el sol	10
2.2.	Secciones eficaces de distintos tipos de gases en la región UV-VIS [25].	11
2.3.	Diagrama de un interferómetro de Fabry-Perot [10].	15
2.4.	Esquema de funcionamiento de un filtro óptico. Extraído de la web de Olympus.	15
2.5.	Anatomía interna de un filtro óptico pasabanda. Extraído de la web de Olympus.	16
2.6.	Diagrama de la anatomía de un CCD con configuración lineal (por	
2.7.	ejemplo la utilizada en un espectrómetro) [11]	17
	de operación, en un espectrómetro $[27]$	18
2.8.	Ejemplo de la eficiencia cuántica de un CCD. Extraído de www.ccd.com	19
3.1.	Ilustración con los parámetros utilizados para caracterizar los filtros (Extraída de la web de Edmund Optics).	22
3.2.	Diagrama del setup experimental realizado para caracterizar los fil- tros ópticos pasabanda (FOP).	23
3.3.	Espectro de la lámpara utilizada para calibrar los filtros	23
3.4.	Setup experimental para caracterizar los filtros ópticos pasabanda (FOP)	94
3 5	Diagrama de fluio de la función $findFWHM$ creada en MatLab	25
3.6	Tabla de salida de la función <i>findFWHM</i>	26
3.7	Curvas de transmitancia para los filtros de 310 y 330 nm de 25 mm	20
0	de diámetro	28
3.8.	Transmitancia de los filtros de 25 mm a utilizar junto a la sección	00
2.0	encaz de $SO_2$ [30]	28
3.9.	de diémetre	20
2 10	Imégenes tomadas con las cómeros IIV de las coldas de colibración	30
3.10.	La foto correspondiente a "Image Cam 1", corresponde al filtro de 210 pm y la foto "Image Cam 2", corresponde al de 220 pm. Amber	
	son de 50 mm de diámetro.	31

3.11	Resultados de la evaluación de las imágenes de las celdas de cali- bración obtenidas con los filtros de 50 mm	31
3.12	Diagrama experimental para relevar la respuesta de un filtro cuando	01
0.12	la incidencia de la luz no es normal.	32
3.13	. Corrimiento de la función de transferencia del filtro en los datos	
	experimentales.	33
3.14	Corrimiento de la longitud de onda central del filtro en función del	
	ángulo de incidencia de la luz en los experimentos	34
3.15	Corrimiento de la función de transferencia del filtro en las simula-	
	ciones	35
3.16	Modelado del corrimiento de la longitud de onda central del filtro	
	en función del ángulo de incidencia de la luz.	35
4.1.	Potencia consumida por las cámaras en función del tiempo, en las	20
	medidas de campo del dia $16/4/2014$ .	38
4.2.	Temperatura interna medida en función del tiempo en las medidas	20
4.0	de campo del dia $16/4/2014$ .	39
4.3.	Corriente de oscuridad promedio calculada en funcion de la tempe-	41
4 4	ratura de operación.	41
4.4.	Corrientes de oscuridad promedio a distintas temperaturas	42
4.5.	Imagen de un cielo tomada con el flitro de 330 nm. Se puede apreciar	
	a borde de la imagen el electo del <i>vignetting</i> producido por la lente	
	y la distinución de la intensidad de manera radial desde el centro hacia los costados de la imagen, producto del <i>vignetting</i> mecánico	43
4.6	Interfaz de usuario del programa UVCam	45 45
4.0.	Diagrama de fluio para la operación del programa UVCam	40 46
4.1.	Carneta generada por el programa UVCam para las mediciones de	40
4.0.	campo del día 15 de abril	47
		11
5.1.	Diagrama óptico de un sistema con lente convergente	49
5.2.	Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes para los méto-	
	dos A y B	51
5.3.	Ejemplo de emisión de la refinería de combustible, adquirida utili-	
	zando el filtro de $310\mathrm{nm}$ y con la corrección del efecto de corriente	
	de oscuridad	52
5.4.	Ejemplo de imagen de <i>background</i> utilizando el filtro de 310 nm y	
	con la corrección del efecto de corriente de oscuridad	53
5.5.	Valor del factor de normalización para el método B, en cada pixel.	55
5.6.	Histograma del factor de normalización para el método B	56
5.7.	Imágenes luego del binarizado. A la izquierda se encuentra la imagen	
	obtenida con el filtro de 310 nm y a la derecha con el de 330 nm.	57
5.8.	Selección de una zona en la imagen de prueba del algoritmo de	
	superposición ( <i>Imagen 1</i> )	57
5.9.	Selección de una zona en la imagen de prueba del algoritmo de	<b>F</b> 0
	superposición ( $Imagen \ Z$ )	58

5.10	Recorte de la imagen 5.8 que muestra la región común a la imagen	58
5 11	Becorte de la imagen 5.0 que muestra el área común a la imagen 5.8	50
5 1 2	Resta de las imágenes de prueba	50
5.12	Setup experimental de las medidas de compo	61
0.10	. Setup experimental de las medidas de campo	01
6.1.	Celdas utilizadas en el proyecto para calibrar el sistema	63
6.2.	Celdas colocadas en el soporte construido para su medición	64
6.3.	Setup experimental para la calibración. Las cámaras se encuentran	
	enfocando al soporte con las celdas de $SO_2$	64
6.4.	Primer set de imágenes a analizar del día 15 de abril de 2014	66
6.5.	Resultados de la calibración con distintos polinomios para el primer	
	set de imágenes.	67
6.6.	Segundo set de imágenes a analizar del día 15 de abril de 2014. $\ .$	68
6.7.	Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segun-	
	do set de imágenes	69
6.8.	Resultados de la calibración con distintos polinomios para el primer	
	set de imágenes, evaluando por el método B	70
6.9.	Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segun-	
	do set de imágenes, evaluando por el método B	71
6.10	. Primer set de imágenes a analizar del día 16 de abril de 2014	73
6.11	. Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segun-	
	do set de imágenes, evaluando por el método B	74
6.12	. Segundo set de imágenes a analizar del día 16 de abril de 2014. $\ .$	75
6.13	. Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segun-	
	do set de imágenes, evaluando por el método A	76
6.14	. Resultados de la calibración con distintos polinomios para el primer	
	set de imágenes, evaluando por el método B	77
6.15	. Resultados de la calibración con distintos polinomios para el segun-	
	do set de imágenes, evaluando por el método B	78
7.1.	Localización del punto de observación en función de la refinería.	82
7.2.	Setup experimental de las medidas de campo.	83
7.3.	Emisión de la refinería tomada con los distintos filtros para el día	00
	16/4	84
7.4.	Set de medidas del día 15/04/2014 dónde se muestra los valores de	-
	absorbancia aparente con el método A	86
7.5.	Set de medidas del día 15/04/2014 dónde se muestra los valores de	
	absorbancia aparente con el método B	87
7.6.	Set de medidas del día 16/04/2014 dónde se muestra los valores de	
	absorbancia aparente con el método A	88
7.7.	Set de medidas del día 16/04/2014 dónde se muestra los valores de	
	absorbancia aparente con el método B	89
7.8.	Resultado de la calibración con celdas el día 15/4	91
7.9.	Resultado de la calibración con celdas el día $16/4$	92

7.10. Programa de evaluación de imágenes espectroscópicas desarrollado	
en el proyecto.	93
7.11. Diagrama de flujo del programa de evaluación de imágenes espec-	
troscópicas desarrollado.	94
7.12. Resultados de las medidas del día $15/04/2014$ en ppm.m, mediante	~
el método A.	95
7.13. Resultados de las medidas del dia $16/04/2014$ en ppm.m, mediante	0.0
el metodo A	90
al método B	07
7 15 Resultados de las medidas del día 16/04/2014 en ppm m. mediante	91
el método B	98
7.16. Perfiles hallados para el día 15 de abril, correspondientes a las horas	00
11:40:03, 11:41:18 v 11:41:25 en orden superior a inferior.	99
7.17. Perfiles obtenidos para el día 16 de abril, correspondientes a las	
horas 11:50:12, 11:52:47 y 11:52:55 en orden superior a inferior.	100

Compilado el martes 26 agosto, 2014. http://iie.fing.edu.uy/