



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**“DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO ÓPTICO PARA  
MEDIR LA VELOCIDAD DE UNA PLUMA VOLCÁNICA DE  
SO<sub>2</sub>”**

**T E S I S**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:  
ASTRID HERNÁNDEZ SÁNCHEZ**

**TUTOR PRINCIPAL DE TESIS:** Dr. Wolfgang Stremme  
Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM

**COMITÉ TUTOR:** Dr. Yuri Taran  
Instituto de Geofísica. UNAM  
Dr. Michel Grutter de la Mora  
Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM  
Dr. Luis Carlos Álvarez Núñez  
Instituto de Astronomía. UNAM  
Dr. Miguel Ángel Alatorre Ibarra  
Ciencias de la Tierra-IIGRCC. UNICACH



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# AGRADECIMIENTOS

---

Mi enorme agradecimiento a mi tutor el Dr. Wolfgang Stremme por ayudarme, apoyarme, confiar en mí; por la paciencia y dedicación que tuvo conmigo para hacer posible este proyecto de maestría, mi admiración y agradecimiento por guiar un proyecto que implicara telescopios.

Agradezco grandemente a mi comité tutor en especial a la Dra. Claudia Rivera Cárdenas por su incansable apoyo en este proyecto, por guiarme y ser mi mentora también durante estos años, por enseñarme e ir conmigo a campo; sin su ayuda y esfuerzo éste proyecto no hubiese sido completado. Gracias también por su amistad, comprensión y paciencia durante mis estudios. Agradezco a la otra parte de mi comité tutor el Dr. Agustín García Reynoso por facilitar datos para agregar a mi tesis y por estar presente en todas las evaluaciones con firmeza.

Agradezco al jurado que evalúa mi tesis y respeto en gran manera: Al Dr. Yuri Taran, al Dr. Michel Grutter, al Dr. Miguel Alatorre y mi enorme gratitud al Dr. Luis Álvarez quien compartió conmigo su conocimiento de telescopios, por su apoyo en taller y quien también me alentó en todo momento con este proyecto de tesis.

Gracias a los técnicos del taller en CCA que me ayudaron con los problemas de mi instrumento; a Don Alfredo por los ensambles y a Omar por ayudarme repetidas ocasiones a reparar los daños del equipo.

Agradezco a los responsables del posgrado en Ciencias de la Tierra y en especial las gestiones y trámites de Araceli Chamán durante todos mis estudios.

Gracias a los más importantes para mí, mi familia. A mi amado Robin que siempre me incentiva en la ciencia y me inspira a ser mejor y mi pequeña Katia por acompañarme siempre en esta aventura por la ciencia. A mis padres por el amor, guía y motivación que siempre me dan y a mis queridos hermanos Diego y Alex.

Gracias infinitas a mis amigos Thomas y Noemie por ayudarme, por su cariño y disposición de apoyar en este proceso de tesis.

# Resumen

Las mediciones que emplean técnicas de percepción remota están basadas en la radiación solar dispersa y pueden ser utilizadas por ejemplo para la identificación de una pluma volcánica, el estudio de la columna de SO<sub>2</sub> y la velocidad de su propagación. Combinando mediciones de la columna de SO<sub>2</sub>, la estimación de velocidad de la pluma y su geometría permiten estimar la tasa de emisión volcánica. Para el monitoreo de la emisión de gases volcánicos se han desarrollado diferentes técnicas como la medición hiperspectral de radiación solar dispersa en diferentes ángulos elevación (MaxDoas), mediante travesías o a través de cámaras UV. Sin embargo, la estimación de la velocidad de la propagación de la pluma volcánica es una de las mayores fuentes de incertidumbre en la estimación de flujo de gas. En este trabajo se desarrolló un arreglo óptico portátil capaz de realizar mediciones de la velocidad de una pluma volcánica de SO<sub>2</sub> activamente desde el suelo y que puede ser posicionado en un lugar adecuado apuntando a la pluma volcánica de manera fija o durante una campaña. El instrumento consiste de un telescopio, dos espectrómetros y una cámara. Se diseñó, construyó y probó el funcionamiento del instrumento en un día con condiciones favorables y se determinó la velocidad de la propagación de la pluma de SO<sub>2</sub> del Volcán Popocatepetl que en este experimento fue de 11.55 m/s  $\pm$ 2.82m/s.

# ÍNDICE

Resumen .....	3
Introducción.....	6
1.1. Emisiones volcánicas.....	6
1.2. Percepción remota aplicada a la vulcanología .....	8
1.3. Objetivo y Metas .....	10
1.4. Hipótesis .....	10
2. CONCEPTOS GENERALES (Luz, interacción con la materia, composición de la atmósfera).....	11
2.1 Transferencia radiativa .....	14
2.1.1. Esparcimiento.....	14
2.1.2. Absorción por gases.....	15
2.1.3. Dispersión Raman y efecto Ring.....	16
2.1.4. Ley de Beer Lambert .....	17
2.2. Óptica .....	18
2.2.1. Lentes vs Espejos .....	19
2.2.2. Telescopios.....	21
2.2.3. Efectos .....	22
2.3. DOAS .....	25
2.3.1. Espectrómetro.....	25
2.3.2. Procesamiento y análisis .....	29
2.3.3. Aplicaciones basadas en DOAS: .....	31
3. DESARROLLO INSTRUMENTAL .....	35
3.1. Arreglo óptico .....	35
3.2. Características del lente .....	41
3.3. Aberración de lente .....	42
3.4. Adquisición de datos .....	49
3.4.1. Adquisición de imágenes y Adquisición de espectros .....	52
3.5. Calibración de los espectrómetros.....	53
3.6. Procesamiento .....	56
3.7. Dificultades en las mediciones.....	58

4. MEDICIONES Y RESULTADOS .....	61
4.1. Volcán Popocatepetl.....	61
4.2. Comparación de la medición de viento.....	69
5. CONCLUSIONES .....	75
6. RECOMENDACIONES .....	77
BIBLIOGRAFÍA .....	78

# CAPÍTULO 1

## Introducción

### 1.1. Emisiones volcánicas

Desde el origen de la Tierra los volcanes han existido, influyen en el clima y también se les atribuyen algunas desventajas en daños a la salud e infraestructuras para las poblaciones que habitan a sus alrededores. Al mismo tiempo representa ventajas para los suelos ricos en minerales haciéndolos óptimos para cultivos ya que sus cenizas contienen nutrientes que vuelven fértiles los suelos y plantas donde se depositan. Estas increíbles y fascinantes manifestaciones de la Tierra básicamente son una especie de respiraderos en la superficie de la Tierra por donde se expulsa roca fundida y gases del interior de la Tierra. Si bien el vulcanismo activo puede tener un gran impacto en la atmósfera, se considera que algunas erupciones volcánicas son predecibles gracias al continuo monitoreo volcánico mediante detección de señales de actividad sísmica, térmica, deformación y geoquímica. La abundancia y composición de los gases emitidos por los volcanes son una de las señales que pueden detectarse y ser medidas para conocer los cambios de una erupción volcánica. En un estudio realizado por Halmer en 2002 sobre la entrada anual de gases volcánicos a la atmósfera se estima que la emisión global anual de azufre es del orden de  $7.5 - 10.5 \times 10^{12} g/año$  de  $SO_2$  que representa entre el 10% y 15% de la producción anual del azufre antropogénico. Una de las principales manifestaciones de actividad volcánica es la desgasificación magmática ya sea mediante conducto abierto o por medio de fumarolas; los gases volcánicos que se transportan hasta la superficie tienden a presentar una movilidad más rápida que la del magma que los generó; por ello en el estudio de los volcanes la fase gaseosa es uno de los medios más importantes para identificar señales geoquímicas precursoras de erupciones volcánicas, así como el cambio de actividad eruptiva. Se considera que

los gases son el “motor” de las erupciones volcánicas, son los gases que permiten al magma subir hasta la superficie (Tazieff, 1983).

Los gases volcánicos se emiten a través de fuertes emisiones de vapores ácidos o emanaciones invisibles que incluyen el dióxido de carbono. A través de los suelos, los gases volcánicos influyen en el comportamiento de un volcán; un volcán libera tanto gases ácidos de su cráter activo como también vapores altamente concentrados a través de fumarolas o grietas y algunos volcanes liberan gases de baja temperatura a través de sus flancos distantes del área activa del cráter.

El estudio de los gases volcánicos proporciona información de la existencia de magma presente en niveles poco profundos de un área volcánica, permite comparar si un magma es rico o pobre en gas disuelto; los mismos gases se encuentran presentes en cada volcán aunque en proporciones diferentes. Los mayores elementos consistentes en los volcanes son: hidrógeno (H), carbono (C), oxígeno (O), azufre (S), nitrógeno (N) y alógenos incluyendo cloro (Cl), flúor (F) y bromo (Br); los elementos incluyen los gases raros como helio (He), neón (Ne), argón (Ar), criptón (Kr) y xenón (Xe) y cantidades a niveles traza de metales como por ejemplo, sodio, vanadio, cromo, bismuto, cobre, zinc, oro. El hidrógeno está presente en gran medida como agua ( $H_2O$ ) junto con otras especies portadoras de moléculas de hidrógeno como metano ( $CH_4$ ) y amoníaco ( $NH_4$ ) que ocurre en cantidades menores. De la especie de carbono el más dominante es el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), mientras que el metano y monóxido de carbono (CO) ocurren en menores cantidades; por su parte el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) componen principalmente especies de azufre. Se ha estudiado que los gases disueltos en magmas se pueden suministrar en profundidades de diversas fuentes, incluyendo el manto, la corteza y el material de subducción durante la generación y ascenso del magma; dado que estas fuentes presentan distintas composiciones. La composición química de los gases liberados del magma y descargados en la superficie en forma de fumarolas de altas temperaturas varían considerablemente y para que estos gases internos sean estudiados se rastrean sus orígenes profundos, al igual que el de los magmas; utilizando especies isotópicas de gas mayor y menor (Delmelle y Stix, 2000).



## 1.2. Percepción remota aplicada a la vulcanología

La percepción remota o teledetección es la ciencia de adquirir información de un objeto, sin estar en contacto directo con él (Lindenlaub, 1976). El  $\text{SO}_2$  es uno de los gases volcánicos que se puede medir más fácilmente con diferentes técnicas de percepción remota y es principalmente usado para estimar la cantidad de emisiones de un volcán activo.

Para el estudio de los gases volcánicos y dentro del avance científico y tecnológico deben de considerarse las nuevas técnicas de teledetección que permitan la medición de la composición de los gases en una pluma volcánica, tales como son la espectroscopia (“FTIR” Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier, “COSPEC” espectrómetro de correlación, “DOAS” Differential Optical Absorption Spectroscopy).

Existen otros trabajos previos realizados de las aplicaciones con cámaras  $\text{SO}_2$  y sus limitaciones para la detección remota de plumas volcánicas (Kern *et al.*, 2010), que realiza la medición de absorción ultravioleta de  $\text{SO}_2$  en una ventana de longitud de onda estrecha alrededor de 3 a 10 km de distancia del cráter mediante el uso de interferencia de paso de banda, un filtro de interferencia de dos dimensiones y un detector CCD (Charge Coupled Device, por sus siglas en inglés) encargado de la conversión de una señal luminosa en una señal eléctrica sensible a los rayos UV, el cual representan un ejemplo de técnicas de percepción remota. Con el fin de adecuar la definición de teledetección a ésta tesis se describe como una técnica de monitoreo que permite obtener información de  $\text{SO}_2$  a una distancia segura del volcán.

Para el presente trabajo de investigación se ha utilizado una técnica óptica para realizar mediciones a una distancia considerada “segura” en caso de una crisis volcánica. La adquisición de datos es en tiempo real a una distancia de 4.1 km en línea recta del volcán Popocatepetl.

Dentro de la integración de componentes para la recopilación de datos se encuentran: A) la fuente de energía (radiación solar) en la cual influye el ángulo de elevación y la divergencia solar B) la atmósfera, especialmente la que se refiere a

la dispersión selectiva de la radiación electromagnética, C) la cubierta terrestre, que en general es la imagen captada y en la cual intervienen las características físicas, químicas y la rugosidad de la superficie en un instante de tiempo; y D) el sensor, el cual incluye en la geometría de la toma y la calidad de datos. A pesar de la complejidad que presenta la observación remota se pueden modificar las firmas espectrales, características de los diferentes tipos de coberturas y se permite manipular de una manera eficiente las imágenes en la computadora (FAM, 2010).

## 1.3. Objetivo y Metas

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un instrumento que permite medir simultáneamente dos espectros en dos direcciones diferentes, los cuales pueden ser elegidos, definidos y documentados con imágenes. La información generada por el instrumento se utilizará para determinar la velocidad de propagación de la pluma de  $\text{SO}_2$  emitida por el volcán Popocatepetl.

Las metas de este trabajo de tesis son:

- Registrar imágenes cada 20 segundos y espectros de absorción en el UV a dos distancias del volcán.
- Analizar los espectros para determinar la densidad de columna oblicua de  $\text{SO}_2$  (concentración integrada sobre el paso de la luz en unidades moléculas/cm<sup>2</sup>) a dos diferentes distancias del cráter.
- Calcular la velocidad de la pluma volcánica mediante correlación cruzada de las dos series temporales de  $\text{SO}_2$  medidas por cada espectrómetro.
- Comparar la velocidad reconstruida en este trabajo con valores de modelo de pronóstico o análisis de clima.
- Interpretar a través de las imágenes obtenidas la interacción dinámica del gas volcánico emitido con la atmósfera en la estela del cráter de emisión.

## 1.4. Hipótesis

El telescopio acoplado a una cámara oscura con dos espectrómetros es una herramienta ideal para el monitoreo en tiempo real de la velocidad de propagación de una pluma volcánica, así como también una técnica remota segura que permite realizar las observaciones y mediciones a distancia desde el suelo.

## CAPITULO 2

### 2. CONCEPTOS GENERALES (Luz, interacción con la materia, composición de la atmósfera)

Para los objetivos es necesarios introducir algunos fundamentos básicos de la interacción de la luz con la atmósfera. La luz es una forma de energía electromagnética y su radiación a través del espacio se puede representar de dos formas diferentes; como ondas o como paquetes de energía (Teoría mecánica cuántica) que siguen haces o rayos (óptica geométrica).

En la actualidad no hay un consenso en la comunidad científica sobre la existencia de la atmósfera terrestre primitiva, debido a la dificultad que se tendría para mantener sus gases más ligeros. Sin embargo, se han desarrollado modelos teóricos y realizado diversos experimentos para entender cómo ha evolucionado la atmósfera a lo largo de la historia geológica del planeta (García y Salvan, 2017). Existen evidencias geológicas que la atmósfera primitiva no contenía oxígeno molecular. Se cree que inicialmente la atmósfera de la Tierra se encontraba formada por vapores de agua, hidrógeno, amoníaco, metano y anhídrido sulfúrico. (García y Salvan, 2017). La atmósfera actual que presenta el planeta Tierra, no es un residuo de gases primitivos sino una mezcla de ellos que se fueron acumulando gradualmente por desgasificación del interior de la Tierra. El  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y vapor de agua fueron emitidos desde el interior de la Tierra por medio de erupciones volcánicas para constituir a la presente atmósfera que se encuentra formada por aire y partículas en suspensión; siendo el aire una mezcla gaseosa en distinta proporción, cuyos elementos más importantes son: nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua y otros gases en menor proporción. Todo el  $\text{O}_2$  de la atmósfera tiene sus orígenes directamente del proceso de fotosíntesis. En la atmósfera también se encuentran en suspensión diversas cantidades de partículas diminutas sólidas tales como el polen, arena fina, cenizas volcánicas, bacterias; entre otros y, en su conjunto componen el denominado polvo atmosférico (Nadal y Muñuzuri, 2006).

La intensidad de la radiación solar se atenúa al atravesar la atmósfera por la absorción de diferentes gases, por esparcimiento molecular (como esparcimiento de Rayleigh) y por esparcimiento de los aerosoles denominada turbidez o turbiedad (Iqbal, 1983).

De acuerdo a la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se compone de los dos campos: el eléctrico y el magnético, los vectores de ambos campos están ortogonales y se propagan a la velocidad de la luz. Los frentes de ondas que se expanden concéntricamente y de forma radial desde la fuente de luz se describen con la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la luz, que es la distancia entre frentes de onda adyacentes, frecuencias de la luz ( $\nu$ ), es el número de frentes de ondas que pasan por un punto en un segundo. Frecuencia y longitud de onda son relacionados con la velocidad de la luz ( $c= 299.792.458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) con la relación  $\lambda = c / \nu$ .

La teoría ondulatoria explica el fenómeno de la interferencia. Ondas de la misma frecuencia que tienen una diferencia en la fase, generan interferencia, lo que significa que su amplitud se amplifica o cancela dependido de la diferencia relativa en sus fases.

La energía fluye en forma de una corriente con partículas llamadas fotones, de la cual se puede calcular la cantidad de energía que se transporta por fotón, siempre y cuando se tenga conocimiento de la frecuencia que presenta.

$$Q = h F \quad (1.1)$$

Donde Q= Energía radiante de un fotón (J)

h= Constante de Planck ( $6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ )

$$F = \text{Frecuencia (s}^{-1}\text{)} \quad Q = hc\lambda \quad (1.2)$$

Por lo que se establece que, a mayor longitud de onda, la cantidad de energía transportada será menor y viceversa (ecuación 1.2) (Pérez *et al.*, 2015).

Mientras que el espectro electromagnético es el conjunto de ondas electromagnéticas diferenciadas por la frecuencia de cada uno, su longitud de

onda y por la energía emitida. Es la radiación electromagnética que emite (el espectro de emisión) o absorbe (el espectro de absorción) de una sustancia y sirve para identificar una sustancia o gas. Todos los objetos pueden ser observados mediante los electroscopios, el cual permite hacer las medidas de longitud de onda y la radiación en frecuencia que se presenta (García *et al.*, 2002).

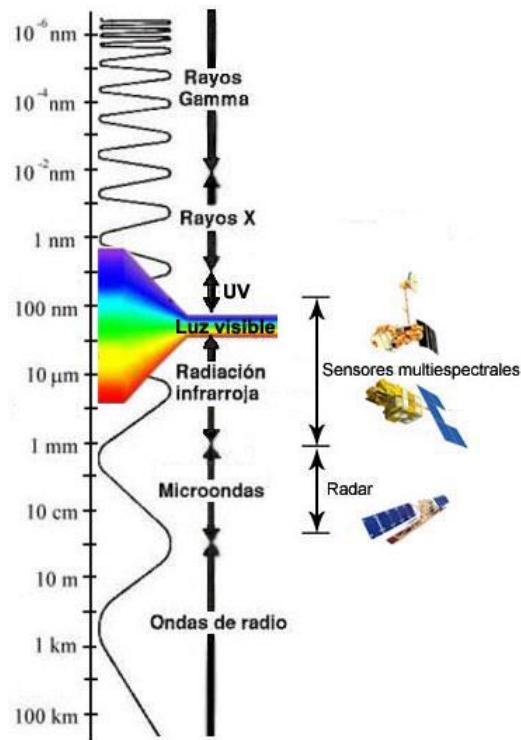


Figura 1. Espectro electromagnético y las radiaciones usadas en percepción remota (Hetch,2001).

El espectro electromagnético se divide en secciones clasificadas por longitudes de ondas, llamadas bandas que son el resultado del comportamiento de la radiación. Dichas longitudes de ondas abarcan desde la luz ultravioleta, luz visible y los rayos infrarrojos en mayor longitud; las ondas electromagnéticas como lo son ondas de radio y continuando a través de la menor longitud presentándose en los rayos cósmicos, rayos gama y rayos x (ver figura 1).

- Las longitudes largas son aquellas que se utilizan en los radares y para el envío de la información.

- Las microondas, como su nombre lo indica son ondas con la longitud en el rango de micrómetros que exigen transiciones de rotación en las moléculas.
- Los rayos infrarrojos (rayos no observables) son irradiados por los cuerpos dependiendo de la temperatura que estos tengan y pueden introducir una transición de vibración en las moléculas.
- Luz visible. Éste es el rango en el que el sol y las estrellas emiten la mayor parte de su radiación, es la longitud de onda entre 400 y 700nm (ver esquema de figura 1). En este rango espectral existen transiciones eléctricas de átomos y moléculas.

Los rayos ultravioleta pueden ionizar moléculas y son divididos en tres secciones:

- Cercano (400 a 300 nm). Menor energía emitida.
- Lejano (300 a 200 nm). Energía media emitida.
- Extremo (121 a 10 nm). Mayor energía emitida.

Siendo las regiones lejano y extremo aquellas que no llegan a penetrar la atmósfera y solo el UV cercano alcanza la superficie de la Tierra, ya que la capa de ozono absorbe todas las longitudes de onda por debajo de 290 nm (Brown, 2007).

## **2.1 Transferencia radiativa**

### **2.1.1. Esparcimiento**

El esparcimiento es la dispersión de la luz visible o cualquier otra radiación electromagnética por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de los fotones esparcidos. Ocurre también cuando la luz viaja por sólidos y fluidos transparentes, pero se ve con mayor frecuencia en los gases. La dispersión de la luz es otro fenómeno de la interacción de la luz con la materia y la dispersión de ondas electromagnéticas por heterogeneidades en el medio de propagación.

El esparcimiento de Rayleigh es la dispersión de cualquier radiación electromagnética o luz visible por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de los fotones esparcidos. El esparcimiento se produce cuando el tamaño de la partícula es insignificante, como lo es en el caso de las moléculas de gas y se obtiene también como resultado de la polarización eléctrica de las partículas. Cada molécula u otro centro de esparcimiento está descrito como un dipolo oscilando con la frecuencia de la radiación, el esparcimiento y extinción aumenta con la frecuencia; el disminuir con la longitud de onda, eso se llama “dispersión de Rayleigh” y hace el color del cielo azul (Betancourt, 2014).

El esparcimiento de Mie se aplica cuando el parámetro del tamaño (tamaño/longitud) de las partículas es cercano o superior a 1. En comparación con la dispersión de Rayleigh la dependencia de la longitud de onda de la dispersión de Mie es menor. La propia teoría de Mie es válida solo por partículas esféricas. La luz que interactúa con partículas esféricas sufrirá refracción, que conducirá a la dispersión en otras direcciones y también sufrirá absorción durante su camino a través de la partícula. El espesor óptico o la eficiencia de extinción de una capa de aerosol con espesor  $z$  que contiene una densidad numérica  $N$  de partícula con un diámetro  $A$  está dado por:

$$\beta_e = AzNk_e \quad (1.3)$$

Donde

$k_e$  Es la extinción de las secciones cruzadas (cross-section) de la partícula.

### 2.1.2. Absorción por gases

La interacción entre los átomos y moléculas están descrito con la mecánica cuántica. Una molécula puede absorber un fotón con una energía  $\Delta E$ , si existe una transición permitida de su estado inicial  $E_i$  a un estado final  $E_f$ , con la diferencia energética  $E_f - E_i$  es exactamente igual a la energía del fotón  $\Delta E$ . Las transiciones permitidas son en principio las que conservan el ángulo momento entre molécula y fotón y tienen una mayor probabilidad de ocurrencia. En el rango infrarrojo los estados involucrados describen la vibración y rotación de una molécula, en el visible



existen estados de las moléculas y átomos a donde uno de sus electrones está excitado en el estado final. En el rango UV, ocurre con la absorción de la energía del fotón la separación de partes de molécula en dos partes (moléculas o átomos).

### **2.1.3. Dispersión Raman y efecto Ring**

El esparcimiento de Raman es un proceso inelástico, es decir que los fotones esparcidos no tienen la misma longitud que la longitud del fotón incidente. Es una dispersión que se hace a nivel de las moléculas, un fotón que llega a la molécula, lo absorbe y re-emite en otra dirección; pero parte de la energía del fotón puede ser absorbida o también aumentado. En los dos casos que la energía del fotón dispersada es mayor (i) o menor (ii) a la del fotón incidente, se llama el fenómeno “stocks” (i) “anti-stocks” (ii). Las alteraciones en un espectro diferencial (DOAS) (medido con luz solar indirecta) que produce la dispersión Raman se pueden modelar con una sección eficaz adicional. El efecto Ring describe que las líneas de Fraunhofer observadas con luz solar indirecta tienen menos profundidad de los fotones que se obtienen después del esparcimiento Raman, la energía y longitud de onda de la línea Fraunhofer y la dirección correcta para ser observado (Vountas, 1998). Este proceso se puede apreciar en la figura 2.

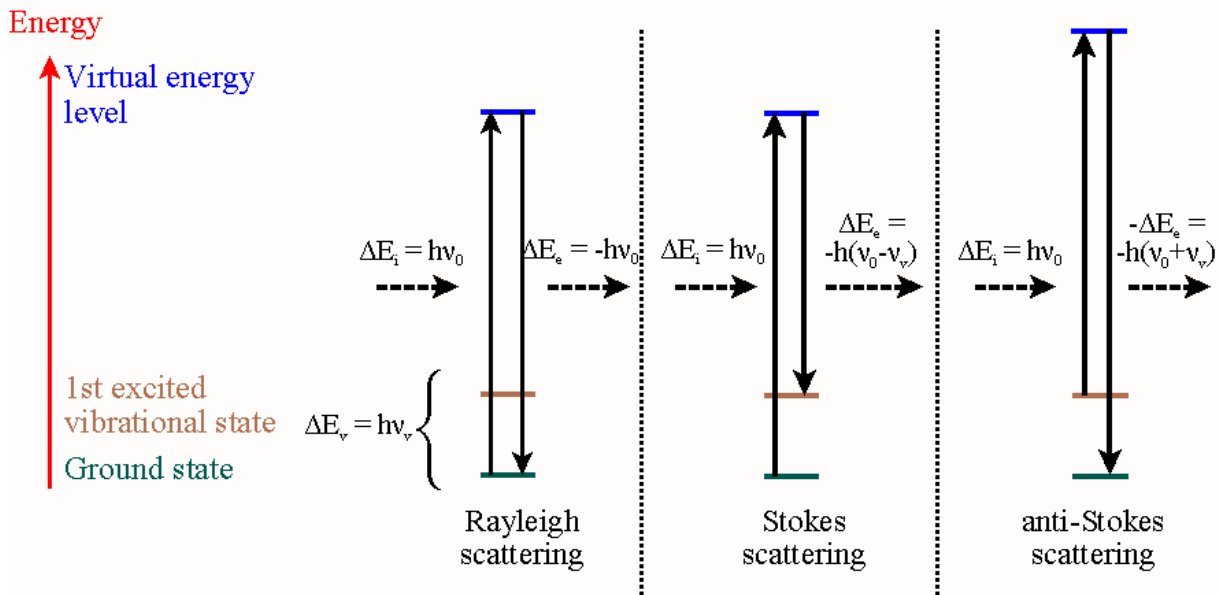


Figura 2. Posibilidades que presenta una luz dispersada. Dispersión de Rayleigh (sin el efecto Raman). La dispersión Stokes donde la molécula absorbe energía. Dispersión anti-Stokes donde la molécula pierde energía (imagen tomada de Schrader, 1995).

#### 2.1.4. Ley de Beer Lambert

La Ley de Beer Lambert describe como se atenúa la luz, es decir la radiación electromagnética, al propagarse en un medio; ésta atenuación es exponencial y depende de la concentración del medio, de su longitud de onda y de su coeficiente de absorción.

Ésta ley establece la relación de las propiedades de la radiación de la luz con las propiedades del material que atraviesa el haz. La vinculación en esta ley entre las propiedades de un medio y la intensidad de luz entrante y saliente a través del mismo medio en que existe absorción de incidencia inicial se expresa a través de ecuaciones. También se aplica Beer-Lambert para describir la atenuación de la radiación solar al pasar a través de la atmósfera. Para este caso también hay dispersión en la atmósfera además de la absorción que existe. Para la atmósfera esta ley se expresa en su forma matemática:

$$I = I_0 \exp(-m(k_a + k_g + k_{NO_2} + k_w + k_{O_3} + kr + k_{SO_2})) \quad (1.4)$$

Donde de forma independiente cada  $k_x$  hace referencia a un coeficiente de extinción donde cada subíndice identifica la fuente de absorción y dispersión (Atkins, 2006):

$m$ = masa del aire

$a$ = son aerosoles densos (que absorben y dispersan)

$g$ = son gases uniformemente mezclados (principalmente dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) que solo absorbe

El dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) solo absorbe

$w$ = es la absorción producida por el vapor de agua

EL Ozono ( $O_3$ ) solo se absorbe.

$r$ =es el esparcimiento de Rayleigh

$k_{SO_2}$ , no se encuentra en Atkins (2006), pero es relevante por mi trabajo y por esa razón añadido a la ecuación.

## 2.2. Óptica

La óptica es la rama de la física que se encarga del estudio del comportamiento y las propiedades de la luz, se utiliza como una técnica de construcción de instrumentos para corregir o mejorar la visión. Algunos fenómenos dependen del hecho de que la luz muestra indistintamente propiedades como onda y partícula. La explicación de estos efectos requiere acudir a la mecánica cuántica. Al considerar las propiedades de la luz similares a las de las partículas, se puede modelar como un conjunto de fotones individuales. La óptica cuántica se ocupa de la aplicación de la mecánica cuántica a los sistemas ópticos, como ciencia es un campo muy relevante, y es estudiada en muchas disciplinas con las que está íntimamente relacionada, como la astronomía, construcción de telescopios, sistemas de fibra óptica, microscopios, equipos láser; por mencionar algunos ejemplos (Rossi, 2003).

### 2.2.1. Lentes vs Espejos

La refracción es un comportamiento del haz de luz incidente sobre una superficie lisa y material transparente de diferente índice de refracción del medio donde procede, por lo tanto, el cambio de dirección del haz se activa al incidir en la superficie.

Cuando un haz de luz proveniente del aire (medio 1) incide sobre un cristal (medio 2) da origen a otro haz refractado que se desvía en su dirección al pasar al segundo medio; conocido como la ley de Snell.

Por otro lado, de acuerdo con el principio de Fermat que establece “El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es estacionario respecto a posibles variaciones de la trayectoria” (Mihás, 2005). El principio de Fermat, en óptica es un principio de tipo extremal donde matemáticamente se expresa como el tiempo que tarda la luz en recorrer una distancia  $s$  en un medio dado es  $t=s/c$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en este medio (Mahoney, 1994) como se observa en la figura 3.

La reflexión es el comportamiento de la luz al cambiar de dirección e incidir sobre un material reflexivo. El ángulo de incidencia del rayo de luz determina el porcentaje en que este rayo de luz sea refractado o reflejado.

Si un haz de luz incide sobre otro medio con un ángulo igual a cero mantendrá su trayectoria para el nuevo medio, es decir, no se refractará. Por el contrario, cuando un haz de luz pasa a un medio con un índice de refracción menor, el haz es completamente reflejado.

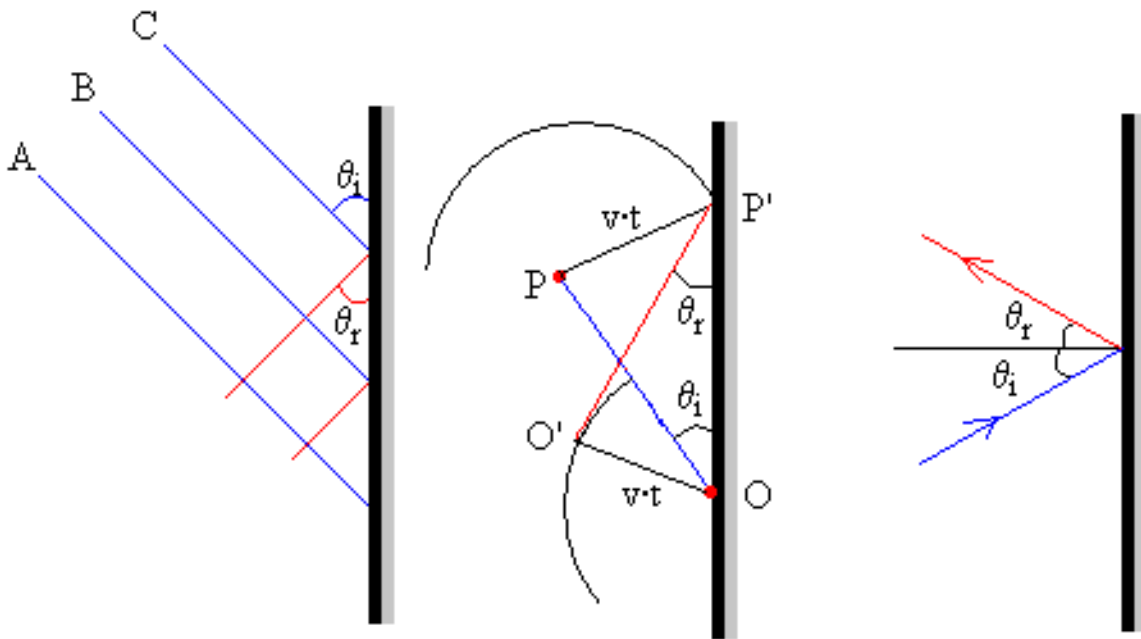


Figura 3. La figura muestra un aspecto de onda

Los frentes de ondas de luz tienen una velocidad uniforme en el vacío ( $c$ ), la velocidad de la luz en el vacío ( $c$ ) dividida por la velocidad de la luz en un material refractante ( $m$ ) es el índice de refracción ( $n$ ) del material:  $n = c/m$ . (Imagen tomada de Carreño, 2001).

Una lente es principalmente caracterizada con su distancia focal  $f$ , que determina adonde se formará la imagen de un objeto. Si la distancia entre objeto y lente es 'o', la distancia entre la imagen y la lente  $b$ , está dada por la siguiente ecuación:

$$1/b + 1/o = 1/f. \quad (1.5)$$

En los instrumentos astronómicos se utilizan lentes de vidrio, cristal o sustrato para refractar la luz. Normalmente los vidrios son una mezcla de sílice fundida (óxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ ) entre óxido de varios metales que incluyen el sodio, calcio, aluminio y magnesio que se añaden para mejorar la dureza, durabilidad y resistencia del vidrio; además de modificar las propiedades ópticas como el índice de refracción.

Este tipo de materiales son los que más suelen ser utilizados por la fácil fabricación y el costo económico que representan. En este sistema óptico, el haz de luz se encuentra limitado en extensión lateral por un lente del sistema que recibe el nombre de pupila de entrada o apertura del sistema.

De acuerdo al efecto que se desea conseguir respecto a la dirección y dispersión de la luz se determina el diseño del lente. Dentro de los lentes más comunes se encuentran las lentes biconvexas, lentes de menisco positivo, lentes de plano convexa, lentes bicóncavas, lentes de plano cóncava y lentes de menisco negativo (Malacara, 2015); estas lentes acumulan las ondas de luz y las transportan a través del sistema óptico. Normalmente las imperfecciones de la imagen se generan al producirse un defecto en la onda por causa de los elementos del sistema (González, 2015).

El usar lentes o espejos en un telescopio deben ser definidos por el trabajo que se va a desarrollar con el instrumento; la finalidad para la que va a ser utilizado el instrumento óptico y debe de aclararse que ambos, tanto espejos como lentes presentan aberraciones; ningún telescopio es 100% libre de aberraciones. Por ejemplo, una lente es mucho más costosa en cuanto a economía se refiere, porque tiene muchos elementos, tienen que estar diseñados para la longitud de onda de trabajo en que se van a aplicar. Mientras que las desventajas de usar un espejo es que aproximadamente el 30% de luz es obstruida, un espejo presenta alta resolución y no sufre aberraciones cromáticas, puede trabajar más al límite de difracción por concentrar mayor energía.

La resolución angular de un sistema óptico permite el poder separar dos objetos presentando una resolución mínima para visualizar independientemente el objetivo, a esto se le conoce como resolución de Rayleigh.

### **2.2.2. Telescopios**

Los telescopios han sido utilizados desde tiempos remotos con fines de investigación y estudio científico; en sus inicios para estudiar los cuerpos celestes y posteriormente se adaptaron para otras aplicaciones. Se denomina telescopio al instrumento óptico que permite las observaciones de objetos lejanos con mucho más detalle de lo que se puede observar a simple vista, al captar radiación electromagnética éste principio del telescopio va proseguido de la espectroscopia que se encarga también del estudio de la interacción entre la radiación

electromagnética y la materia. La finalidad de un telescopio es el poder recolectar la mayor cantidad de energía en forma de luz que permitirá detectar imágenes que a simple vista sin ningún artefacto extra para visión son inapreciables y para ello se vale de un sistema que puede ser de lentes o de espejos; o bien ya sea una combinación de ambos, tanto espejos como lentes.

### 2.2.3. Efectos

#### 2.2.3.1 Aberraciones

Las aberraciones en sistemas ópticos son deformaciones que la imagen sufre al pasar a través de un sistema óptico como una lente o un espejo, las cuales se pueden clasificar en dos tipos: Aberraciones geométricas y físicas que son debido a la naturaleza física y ondulatoria de la luz al pasar a través de un medio o reflejar a través de una superficie lisa; y las aberraciones por manufactura, estas son principalmente por una mala fabricación de los sistemas ópticos. Desde la invención del telescopio en el siglo XVII y siglo XVIII las aberraciones han estado presentes, éste es el hecho por el que la imagen se percibe borrosa. Posteriormente se detectó que las grandes relaciones focales disminuían en gran manera el efecto de las aberraciones y producían una imagen amplificada, pero presentaba algunos inconvenientes tal como la inestabilidad del telescopio, la dificultad de manipulación por el gran tamaño y también era muy poco luminoso. Por ello se considera que a mayor área (campo de visión) será el telescopio un mejor colector de luz y obtendrá por lo tanto una mejor resolución.

Los telescopios utilizan corrección de dispersión atmosférica (ADC por sus letras en inglés) que es un corrector de atmósfera climática, siendo que la atmósfera del planeta Tierra presenta turbulencia, lo cual degrada la calidad de imagen.

Considerando que los telescopios ópticos requieren presentar algunos parámetros fundamentales para su correcto funcionamiento tal como la potencia de recolección, la razón focal, la escala de imagen, el campo de visión, la luminosidad de un telescopio; es decir que tan brillante va a captar la imagen sin necesidad de modificarla y finalmente, el lente que representa el ángulo sólido para ver un

objeto; es decir, el ángulo que capta la luz en un detector. Uno de los principales parámetros de gran importancia en observaciones con telescopios es la potencia de recolección ( $P$ ) que es la cantidad de energía recolectada por unidad de tiempo; aquí es importante detallar que la potencia es directamente proporcional al área colectora al cuadrado del diámetro, lo que se refiere a que cuanto mayor es el área colectora menor exposición se necesita.

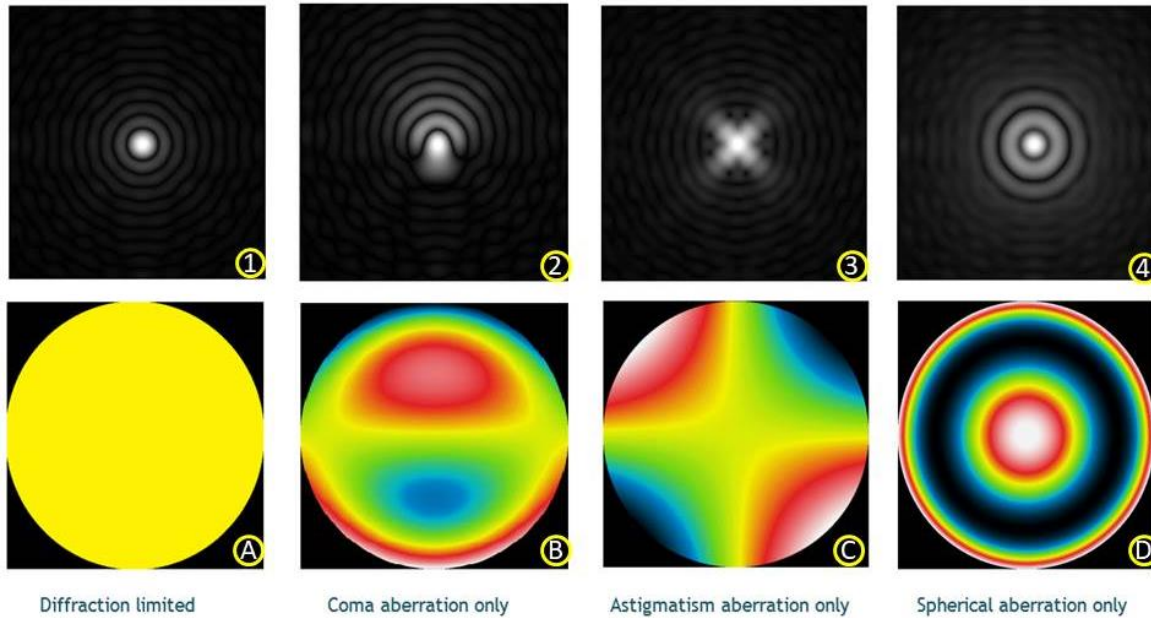
La razón focal es un término relacionado con la capacidad de un sistema óptico en poder coleccionar la luz de objetos distantes y es el cociente de la distancia focal entre el diámetro de la apertura; cuanto más corta es esta relación los objetos serán más luminosos en el detector. Lo ideal es tener un sistema óptico con mínimas o nulas aberraciones para maximizar la energía del detector; dado que el presente proyecto de tesis cuenta con un lente sencillo (singlete) por razones de presupuesto, se considera para trabajos a futuro utilizar un lente de mejor calidad o un sistema óptico a base de espejos.

Las aberraciones ópticas o también conocidas como aberraciones de tercer orden debido a la aproximación paraxial de la luz fueron primeramente clasificadas por Philipp Ludwig Ritter von Seidel, astrónomo, óptico y matemático alemán quien en 1855 concibió la teoría de las aberraciones ópticas que lleva su nombre, llamadas aberraciones de Seidel (Dichburn, 1982). Gracias a esta teoría podemos clasificar las aberraciones en dos tipos: Monocromáticas y cromáticas.

Las monocromáticas a su vez se clasifican en cinco tipos (Seidel): aberración esférica que parece ser un círculo, astigmatismo la cual ocurre para objetos que no estén en el eje, la coma que se asemeja a una imagen en forma de cometa, curvatura de campo y distorsión que se debe al hecho de que el aumento depende de la distancia del punto objeto al eje y en el caso de un objeto extenso esta distancia varía, mientras que las cromáticas que dependen de la longitud de onda se clasifican en cromática longitudinal y cromática transversal (Tipler, 2006). Por lo tanto, las aberraciones son una imperfección que presenta un sistema óptico la cual tiende a producir imágenes defectuosas, misma que deteriora la capacidad de un sistema óptico para producir una imagen clara y exacta del objeto (ver figura 4); sin embargo, el análisis de frente de onda proporciona una evaluación cuantitativa



precisa de todo el sistema óptico y las aberraciones relacionadas al sistema; sabiendo que la atmósfera dispersa la luz de una fuente puntual entre varios pixeles, de modo que las cuentas en cada pixel son mayores en el centro y disminuye en los bordes por lo tanto, la distribución tiene una forma de campana que se conoce como función de dispersión de punto o “PSF”.



*Figura 4. Fila de arriba de izquierda a derecha, la función de dispersión de puntos (PSF) de: (1) un alcance limitado de difracción perfecta.*

*Luego, para una aberración de onda de 70 nm rms (2) solo coma, (3) solo astigmatismo y (4) solo esférico. La fila de abajo (A, B, C, D) muestra las reconstrucciones modales de frente de onda de Shack Hartmann, codificadas por colores de rojo para máximo y azul para error de fase mínimo (Imagen tomada de innovationsforesight, 2015).*

### 2.2.3.2 Disco de Airy

El disco de Airy es un fenómeno óptico debido a la naturaleza ondulatoria de la luz. Cuando ésta atraviesa una apertura circular se difracta produciendo un patrón de interferencia de regiones iluminadas y oscuras sobre una pantalla alejada de la apertura. El patrón de difracción resultante en una apertura circular iluminada uniformemente tiene una región central brillante conocida como disco de Airy rodeada de una serie de anillos concéntricos denominados patrón de Airy (ambos nombrados así en honor a George Airy en 1835). El diámetro del

disco central está relacionado con la longitud de onda de la luz y el tamaño de la abertura circular (Airy, 1868).

Esta aplicación es más usada e importante para telescopios. Debido a la difracción, el punto más pequeño en el que se puede enfocar un rayo de luz usando una lente tiene el tamaño de un disco de Airy. Así, incluso teniendo una lente perfecta, aún existe un límite para la resolución de una imagen creada por dicha lente. Un sistema óptico en el que la resolución no está limitada por imperfecciones en las lentes sino sólo por difracción (Airy, 1835).

### **2.3. DOAS**

El DOAS Differential Optical Absorption Spectroscopy por sus siglas en inglés, es una técnica que se utiliza para determinar las concentraciones de gases trazas justificado en la detección de las estructuras de las bandas de absorción dentro de la región espectral del visible y UV (Platt y Perner, 1983; Platt, 1994). El objetivo de esta técnica es identificar las distintas especies y la cuantificación de su concentración o columnas presentes en la atmósfera. Su aplicación está determinada por la propagación de la radiación EM en la atmósfera entre la absorción, dispersión y emisión. En el espectro ultravioleta (UV) se puede despreciar la emisión porque implica una temperatura mayor a los 6000°C que no hay en la atmósfera; mientras que la absorción tiene niveles de energía electrónica descrita con la Ley de Beer-Lambert. La espectroscopia óptica de absorción diferencial apareció a inicios de los años 80's para estudio de los gases de la atmósfera y para los inicios de los años 2000's para estudio de los gases volcánicos (Johansson, 2009; Galle, 2002).

#### **2.3.1. Espectrómetro**

En la espectroscopia se mide la radiación como función de la longitud de onda. La detección de la absorción o emisión de radiaciones electromagnéticas a ciertas longitudes de onda permite identificar especies en una prueba porque los niveles energéticos de las moléculas o átomos son muy característicos.

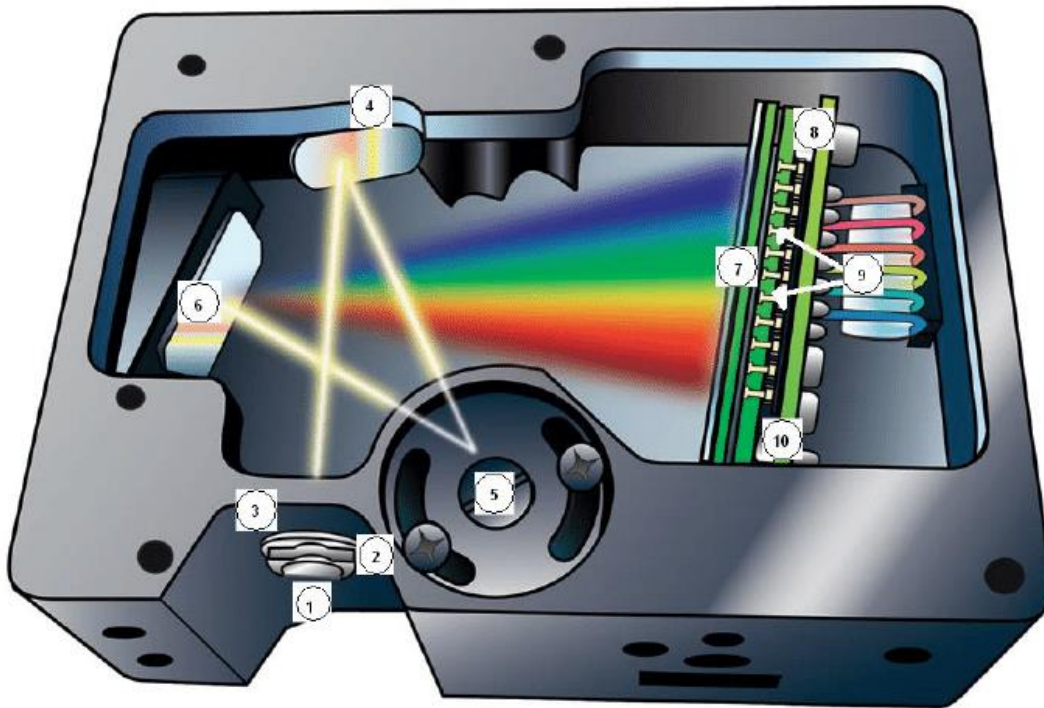
Las diferencias en los niveles energéticos estarían dados por  $E=hc/\lambda$  las energías de fotones que se absorben o emiten.

Típicamente los espectrómetros son instrumentos basados en rejillas de difracción y una matriz de detectores. Estos instrumentos espectroscópicos registran los espectros de absorción, transmitancia y/o reflexión de una muestra de estudio (ver figura 5). Un filtro en la entrada puede determinar el rango de la longitud de onda que desea ser cubierto; el rango de longitud de onda de un espectrómetro se encuentra determinado por la ranura de la rejilla y por el tamaño físico del detector.

El primer espectroscopio consistía en un prisma que separaba la luz blanca en sus diversas longitudes de onda, un teodolito y el ojo humano como sensor; en la actualidad en el espectrómetro el trabajo de dispersar la luz blanca en todos sus componentes se hace a través de una rejilla de difracción, y una cámara CCD (Charge Couple Device, por sus siglas en inglés) lineal que remplaza el ojo humano (Jiménez, 2018).

En esta investigación nos interesa el  $\text{SO}_2$ , que es activo en el rango espectral UV; la resolución óptica por la cual se necesita resolver las estructuras en su espectro de  $\text{SO}_2$ , puede tratar de resolver las líneas individuales con un espectrómetro de resolución suficientemente alta o solo tratar de determinar la absorción por las bandas enteras con una resolución baja.

El espectrómetro utilizado para las mediciones remotas de  $\text{SO}_2$  en el volcán Popocatepetl tiene su funcionamiento mediante espejos que producen una imagen del primer orden de la ranura de entrada al detector de varios pixeles como una cámara en línea. Entre los espejos está colocada una rejilla de difracción así que la primera orden de luz del rango espectral de interés llega al detector; la cual distingue diferentes ondas en diferentes ángulos y por lo tanto las diferentes longitudes de onda que ingresan por la ranura de entrada permiten que se puedan visualizar diferentes posiciones en la matriz del vector.



*Figura 5. Componente óptico del espectrómetro (1) conector SMA 905, (2) Slit, (3) Filtro (opcional). (4) Espejo colimador, (5) Grating, (6) Enfocador, (7) Lente colectora, (8) Detector, (9) Filtro (opcional) y (10) Amplificador del Detector (opcional). Imagen tomada de Chiwo, 2015.*

En la presente tesis se utilizaron dos espectrómetros para las mediciones en el volcán Popocatepetl: USB2000+ e I2P2000S.

Los espectrómetros “USB2000+” modulares son espectrómetros UV-Visible versátiles para absorción, transmisión, reflectancia, emisión, color y otras aplicaciones. Su pequeño tamaño, su robusta optoelectrónica los convierten en una buena opción para las necesidades de aplicaciones de gran volumen. Los espectrómetros USB utilizan poco espacio y se conectan a través de una óptica de espacio libre o fibra óptica a fuentes de luz y accesorios de muestreo para medir líquidos, sólidos y otras muestras. Los espectrómetros pueden instalarse directamente en las líneas de proceso para medir las características de calidad, transportarse al campo para evaluar el crecimiento de los cultivos o desplegarse en aguas superficiales para monitorear los parámetros ambientales. Este tipo de

espectrómetros cuenta con un slit (apertura) de  $50\mu\text{m}$  de tamaño, una resolución de  $0.53\text{nm}$ . Con rango espectral  $273.25 - 432.97\text{ nm}$  (oceaninsight, 2020).

El segundo espectrómetro utilizado llamado "I2P2000S" es similar al USB2000+, este espectrómetro de llama con ranuras intercambiables, indicadores LED y conectores de dispositivos simples proporcionará rendimiento y características que necesita la espectroscopia UV-Vis y Vis-NIR totalmente integrados para medir la absorbancia y la transmitancia. Presenta rango espectral entre  $277.32\text{nm}-435.26\text{ nm}$ , cuenta con un slit de  $50\mu\text{m}$  de tamaño y una resolución de  $0.53\text{nm}$ . Este tipo de espectrómetros (I2P2000S y USB2000+) cuentan con un tiempo de integración de  $1\text{ms} - 65\text{s}$  y una resolución óptica de  $1,33\text{nm}$ . Los espectrómetros de llama "I2P2000S" son instrumentos compactos y de tamaño reducido aunque un poco más robusto que el espectrómetro USB2000+ (oceaninsight.com).

En espectroscopia la resolución espectral describe la capacidad del instrumento de distinguir dos líneas cercanas,  $\delta\lambda$  que es normalmente una medida de la anchura (FWHM) de las líneas monocromáticas registradas por un espectrógrafo. La resolución espectral tiene varias definiciones, frecuentemente se aplica el criterio de Rayleigh para definir la resolución de un espectrómetro.

En la resolución espectral la  $\delta\lambda$  concede la capacidad para resolver líneas de longitud de onda cercana y de observar detalles en las líneas. Por ejemplo para los instrumentos DOAS a medida que la luz viaja a través de la atmósfera, su intensidad se reduce a través de la absorción de un gas traza específico. Esto también puede llevar a la extinción debido a la absorción por otros gases traza o por la dispersión por moléculas de aire y partículas de aerosol.

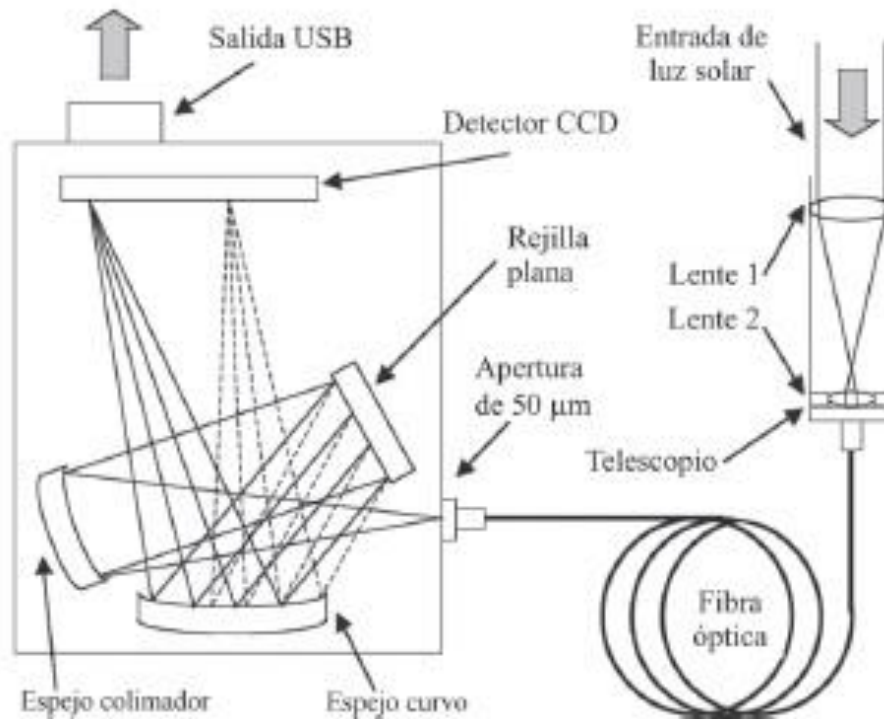
En el espectro ultravioleta lo que más importancia tiene es el proceso de dispersión por partículas o moléculas ya que la dispersión es la redistribución de luz; mientras que la función de fase es la distribución direccional de la intensidad dispersada. La dispersión se presenta de dos maneras; la dispersión de Rayleigh donde el cociente de tamaño entre las heterogeneidades y la longitud de onda determina el cociente de tamaño siendo  $<0.1$ ; por otro lado, la dispersión de Mie presenta un tamaño de  $>0.1$  dependiendo menos de la longitud de onda. La dispersión de Mie describe la interacción entre la luz y las partículas; no solo se

absorbe sino que la radiación está afectada por la dispersión de las partículas. De acuerdo entre la interacción de la luz visible, ultravioleta y las molécula de la atmósfera entre más pequeña es la longitud de onda más fuerte es la dispersión. La dispersión produce radiaciones en base a la longitud de onda. Las líneas de Fraunhofer son el espectro de absorción solo de algunos elementos de la atmósfera, estas líneas son características del espectro solar que se encuentran presentes en la atmósfera fría del sol y de las cuales el  $\text{SO}_2$  juega un papel importante por la penetración atmosférica de la radiación UV.

La penetración atmosférica de la radiación UV depende del ángulo en que incide la radiación del sol sobre la Tierra. De acuerdo a la penetración atmosférica de la radiación UV depende la longitud de onda. Para el presente trabajo de investigación donde el gas de estudio es el  $\text{SO}_2$  se recomienda realizar los análisis a partir de los 300nm ya que el  $\text{SO}_2$  tiene la característica de absorber alrededor de los 300nm y de igual manera es recomendable realizar espectros oscuros durante las mediciones.

### **2.3.2. Procesamiento y análisis**

En el DOAS el espectro que se mide, es también llamado instrumental; éste espectro se concentra en el CCD mediante una señal discreta que resulta de la degradación del espectro real por la óptica del equipo (Galle, 2002); por otro lado, el espectro real o espectro natural es una señal continua que contiene muchas estructuras finas (Ver figura 6).



*Figura 6. Dibujo esquemático de la arquitectura interior de un mini-DOAS. Se muestra la configuración del espectrómetro UV (DOAS), cable de fibra óptica y telescopio. Los rayos representados por líneas continuas y punteadas corresponden a los pasos ópticos de la luz en dos largos de onda, se muestra como el espectrómetro dispersa la luz en el CCD (Galle et al., 2002)*

Los estudios espectroscópicos de la atmósfera terrestre se remontan a más de 100 años entre los que se incluyen aquellos de mayor relevancia desde 1879 donde se establece el decaimiento de intensidad en los rayos ultravioleta, le prosiguieron en los siguientes años investigaciones asociadas a descubrimientos de absorción de la radiación ultravioleta debido al ozono y en 1904 el descubrimiento de la absorción infrarroja de ozono para concluir en 1918 que el ozono atmosférico debe residir en una capa por encima de los 10 km de altitud. El instrumento antecesor del DOAS es el COSPEC (espectrómetro de correlación), es uno de los métodos de percepción remota para mediciones de gases volcánicos en superficie. Éste mide la radiación proveniente de la luz solar dispersada por la atmósfera y se aprovecha de la absorción selectiva de radiación UV que tiene el  $\text{SO}_2$  entre 300 y 330 nm (Stoiber et al., 1983; Jones et al., 2008). Originalmente fue desarrollado para medir la contaminación proveniente de las



chimeneas de las fábricas. Desde una distancia de ~1 km este instrumento realiza recorridos verticales a través de una columna volcánica que está siendo arrastrada horizontalmente por el viento. Al comparar el espectro de la luz natural que brilla a través de la columna, se puede determinar la cantidad de gas en la columna; posteriormente determinar qué tan lejos está de la columna y que tan rápido sopla el viento; se puede calcular el volumen del gas que sale del volcán. El COSPEC está sujeto a varias fuentes de error incluyendo: incertidumbre en los valores de la velocidad del viento que representan la velocidad de la pluma, dispersión y absorción de radiación UV por otros componentes de la pluma como el H<sub>2</sub>O y ceniza y la geometría de la pluma (Millan, 1980; Stoiber *et al.*, 1983)

### **2.3.3. Aplicaciones basadas en DOAS:**

#### **2.4.3.1 MAX-DOAS**

La espectroscopia de absorción óptica diferencial de múltiples ejes (Max-DOAS, por sus siglas en inglés) es una técnica de medición DOAS que realiza mediciones en diferentes ejes para obtener información más completa del gas traza de interés. Usa la variación de las columnas oblicuas en función del ángulo cenital de medición para reconstruir un perfil de concentración del gas (Hönninger *et al.*, 2004).

#### **2.4.3.2 Cámaras SO<sub>2</sub>**

La cámara SO<sub>2</sub> es un equipo que permite obtener mediciones en dos dimensiones de la concentración del dióxido de azufre en la pluma volcánica con una frecuencia elevada. Esta tecnología es relativamente nueva (Mori y Burton, 2006), (e.g. Kern *et al.*, 2010; Kantzas *et al.*, 2010; Lübcke *et al.*, 2013, Kern *et al.*, 2013), y ofrece un verdadero salto cualitativo en el monitoreo remoto en tiempo real de las emisiones de gases volcánicos.



Este método se basa sobre el principio de absorción de la luz ultravioleta por las moléculas de SO<sub>2</sub>. La absorción de luz ultravioleta obedece a la ley de Beer-Lambert:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\varepsilon \int C(s)ds \quad (1.6)$$

Donde  $I_0$  e  $I$  son respectivamente las intensidades de luz antes y después de pasar a través de la pluma,  $\varepsilon$  es la sección eficaz de absorción del gas,  $s$  es la distancia y  $C$  la concentración del gas. La presencia del SO<sub>2</sub> en la pluma volcánica induce una disminución de luz (absorción) que se puede medir con instrumentos adecuados. Esto se ha hecho desde los años setenta con el equipo COSPEC y desde 15 años por espectroscopia DOAS (Galle *et al.*, 2002). Las cámaras SO<sub>2</sub> son construidas a partir de cámaras CCD altamente sensitivas, equipadas con lentes de cuarzo (el vidrio usual no es transparente en la luz ultravioleta) y con una par de filtros pasa-banda (ver figura 7). Uno de los filtros (A) deja pasar el rango de longitudes de onda del ultravioleta donde el SO<sub>2</sub> absorbe (entre 305 y 315 nm), mientras que el otro (B) deja pasar un rango de longitudes más largas (entre 325 y 335 nm) donde el SO<sub>2</sub> no absorbe, pero donde los aerosoles de la pluma absorben de la misma manera que lo hacen para el otro filtro (Campion *et al.*, 2015).



*Figura 7. Mediciones del volcán Popocatepetl desde Paso de Cortés con la cámara SO<sub>2</sub> (lado derecho) y prototipo del instrumento óptico de medición descrito en la presente tesis (lado izquierdo).*

Algunas de las ventajas que presenta este sistema es el que las técnicas espectroscópicas de alta resolución son capaces de identificar diferentes absorbentes por sus características estructurales de absorción y por lo tanto estos instrumentos pueden medir varios componentes simultáneamente, incluyendo las líneas de absorción que se ubican en la misma banda (Kern, 2010). Aunque en este trabajo no hay directamente una relación con la cámara SO<sub>2</sub>, existe la posibilidad de convertir el aparato desarrollado simplemente en una cámara UV, solo se necesita observar la pantalla con dos cámaras y con dos diferentes filtros.

Los resultados obtenidos con el instrumento óptico (telescopio) complementan mediciones que se realizan tanto con MAX-DOAS como con la cámara SO<sub>2</sub>.

## CAPITULO 3

# 3. DESARROLLO INSTRUMENTAL

### 3.1. Arreglo óptico

El instrumento óptico desarrollado en la presente tesis está basado en el mismo principio de funcionamiento de un telescopio o una cámara convencional, lo que significa que se puede apuntar directamente al objetivo que queremos estudiar (para esta tesis es la pluma volcánica). Esta ventaja permite al usuario identificar primeramente las condiciones reales del sitio de medición, entre ellas la más importante es la dirección del viento, que sería perpendicular a la dirección de ubicación del instrumento. Una vez que se escoge el sitio de medición se procede a dirigir el telescopio hacia la pluma apuntando así dos puntos, en los cuales se tomaría los espectros que están colocados en la pluma.

El principio del instrumento óptico combina la idea del camtracker (Gisi *et al.*, 2011), observar un imagen del sol en la apertura de entrada de un espectrómetro y el uso de un telescopio con dos fibras (Johanson *et al.*, 2009), que permite tomar dos espectros con un ángulo bien definido.

Se construyó un telescopio con tubo de PVC y un ajustador de enfoque, que consta de un lente de 20cm de distancia focal, una pantalla al fondo que capta la imagen del campo de visión y mediante la cual están conectados dos espectrómetros UV (espectrómetro: USB2000+ con rango espectral 273.25 nm - 432.97 nm y resolución 0.53 nm; espectrómetro: I2P2000S con rango espectral 277.32 nm 435.26 nm y resolución de 0.53 nm); que miden la intensidad de la luz. Para evitar el desenfoque ocasionado por las mediciones realizadas desde el cráter del volcán Popocatepetl a los puntos de mediciones en Tlamacas a 4.1 km y Paso de Cortes a 7.5 km se consideró adquirir la información a partir de medio cono volcánico específicamente para mediciones de SO<sub>2</sub> por la dispersión de la

pluma volcánica y su concentración de acuerdo a la velocidad y dirección de la pluma. Por lo que para la imagen que se desea enfocar con nitidez (medio cono volcánico) así como para la distancia factible para fijación de las fibras se realizaron los cálculos de estas adecuaciones con los datos de  $\varnothing$ -Cráter=850m, h-Popocatepetl=5420m, r-conoCratérico=3500m, f-distancia focal=20cm,  $\varnothing$ lente=20cm.

Como primer punto se tiene que calcular la distancia en que la lente enfocara la imagen del objeto en la pantalla en función de la distancia focal del lente objetivo.

Dada la ecuación:

$$\frac{1}{z'} = \frac{1}{z} + \frac{1}{f} \quad (1.7)$$

Podemos obtener en el plano horizontal (observador de la pluma volcánica) la distancia a la que se va a observar y cuanto se va a observar conocida como campo de visión (field of view). Usando la relación anterior tenemos que  $f = 20\text{cm}$  y  $z$  es la distancia del objeto al telescopio que es 4100 m (Tlamacas) y 7500 m (Paso de Cortés) respectivamente.

Por lo tanto la imagen se va a formar a una distancia de 19.999 cm ó 20 cm que es equivalente a la distancia focal del objetivo del telescopio.

Como segundo punto calcularemos el campo de visión que se proyectara en la pantalla trasera del telescopio, es decir la relación que existe entre tamaño de la imagen (pantalla) y tamaño del objeto (pluma volcánica).

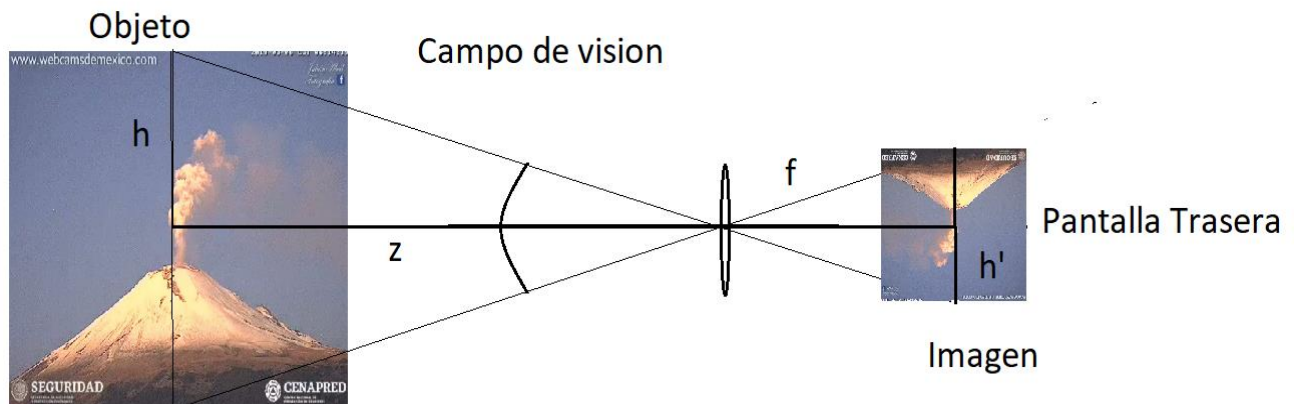


Figura 8. Representación de la distancia focal y campo de visión en relación objeto-imagen que se proyecta en la pantalla trasera del instrumento óptico.

El campo de visión observado y proyectado en el telescopio depende de la distancia a la que se está observando. De la Figura 8 tenemos que  $h$  y  $h'$  son la altura del objeto e imagen respectivamente respecto al eje óptico,  $z$  es la distancia del objeto a la lente (Tlamacas = 4100 m y paso de Cortes 7500 m), mientras que  $f$  es la distancia focal de la lente  $f = 200$  mm

El instrumento tiene un tubo con diámetro interno de 20 cm y una pantalla trasera del mismo diámetro que el tubo externo que es donde estará enfocada la imagen. Se presentan algunas consideraciones como el que existe una limitante para que se forme la imagen completamente en la parte trasera del telescopio y esto es, de acuerdo con la figura 10, la lente objetivo esta puesta dentro de un tubo y esta a su vez de otro que hace la función de enfocar, el diámetro interno de la cremallera o enfocador es de 9.44 cm.

De esta forma, el diámetro útil de proyección en la pantalla trasera evitando el efecto de viñeteo (obturación) es de 9.44 cm (ver figura 9. (A)).

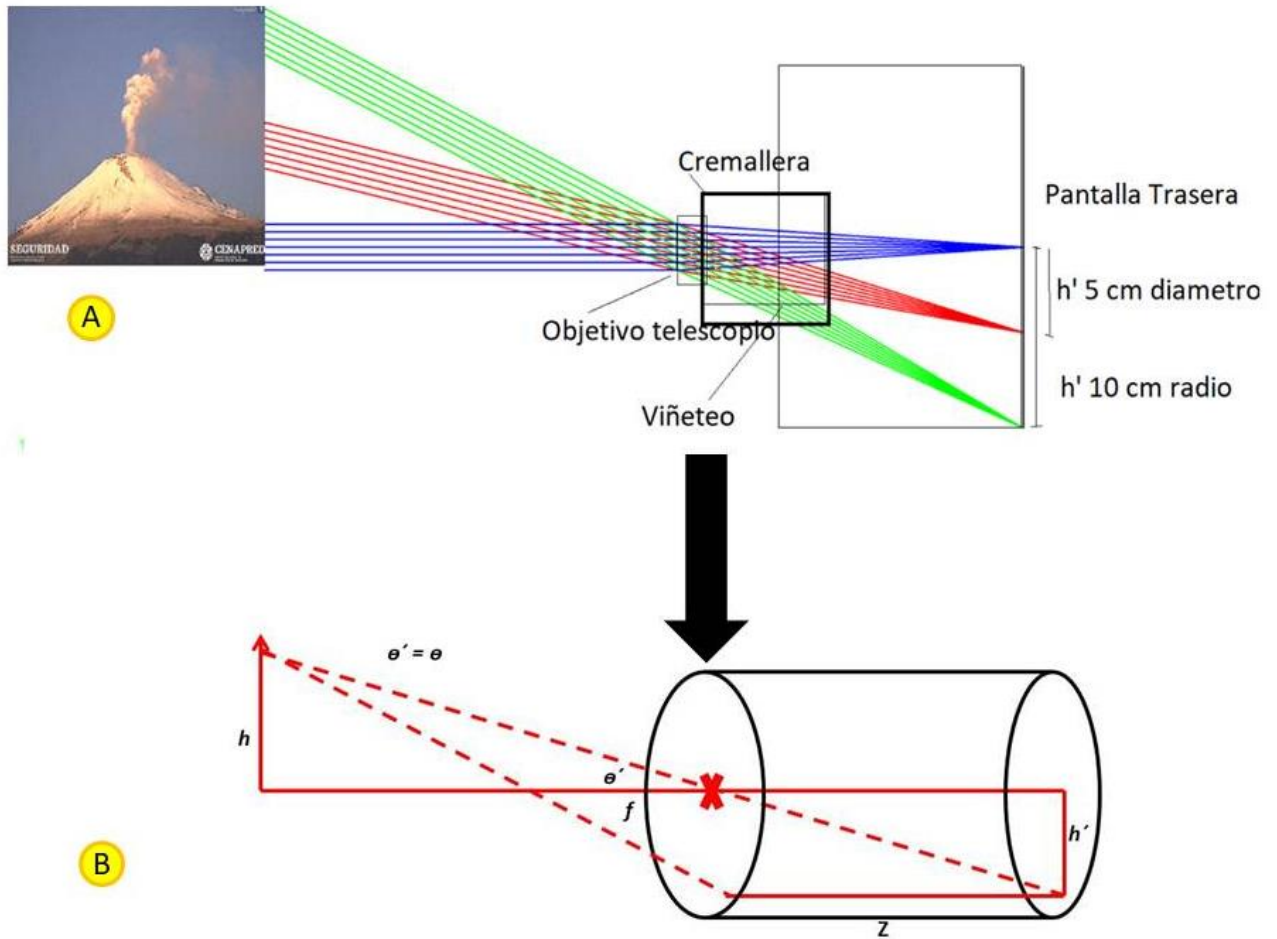


Figura 9. (A) Viñeteo de la imagen por la cremallera. (B) Representación angular de la observación en telescopio (instrumento óptico) donde  $h$  es la altura del objeto a observar, y  $h'$  representa la formación de la imagen en la pantalla de fondo del telescopio,  $f$  representa la distancia focal del instrumento,  $\theta$  y  $\theta'$  representan los ángulos de incidencia de rayos en la lente y  $z$  es la distancia del instrumento de medición al objeto a observar.

Para evitar que el viñeteo afecte la imagen se consideró que la imagen se formara a través del tubo y cremallera por lo cual se tomó como diámetro útil de 9.44 mm. Con esta consideración usando relaciones trigonométricas tenemos que:

$$h' = 9.44 \text{ cm}/2$$

$$f = 200 \text{ mm}$$

$$z = 4100 \text{ m y } 7500 \text{ m respectivamente.}$$

Por lo tanto, la semi altura h en relación con la semi altura h' será para Tlamacas:

focal lente	Radio Pantalla h'		Ángulo	
200	47.21		0.232	13.28
mm	mm		Radianes	Grados

z		h
4100		967.805
m		m

$h = 967.805 \text{ m}$  (FOV de 1935 m) 26.56 grados totales.

Para paso de Cortés tendremos:

focal lente	Radio Pantalla h'		Ángulo	
200	47.21		0.232	13.28
mm	mm		Radianes	Grados

z		h
7500		1770.375
m		m

$h = 1770 \text{ m}$  (FOV de 3540 m) 26.56 grados totales.

Otro de los parámetros estimados es el diámetro aparente de medición por cada fibra óptica. Esto es, la fibra óptica tiene un diámetro interno de  $600 \mu\text{m}$ , por lo tanto, haciendo la proyección del diámetro de la fibra en el espacio-imagen y proyectado en el espacio-objeto tendremos la siguiente relación:

Diámetro aparente =  $z$  (distancia pluma al telescopio) \* diámetro fibra / focal telescopio.

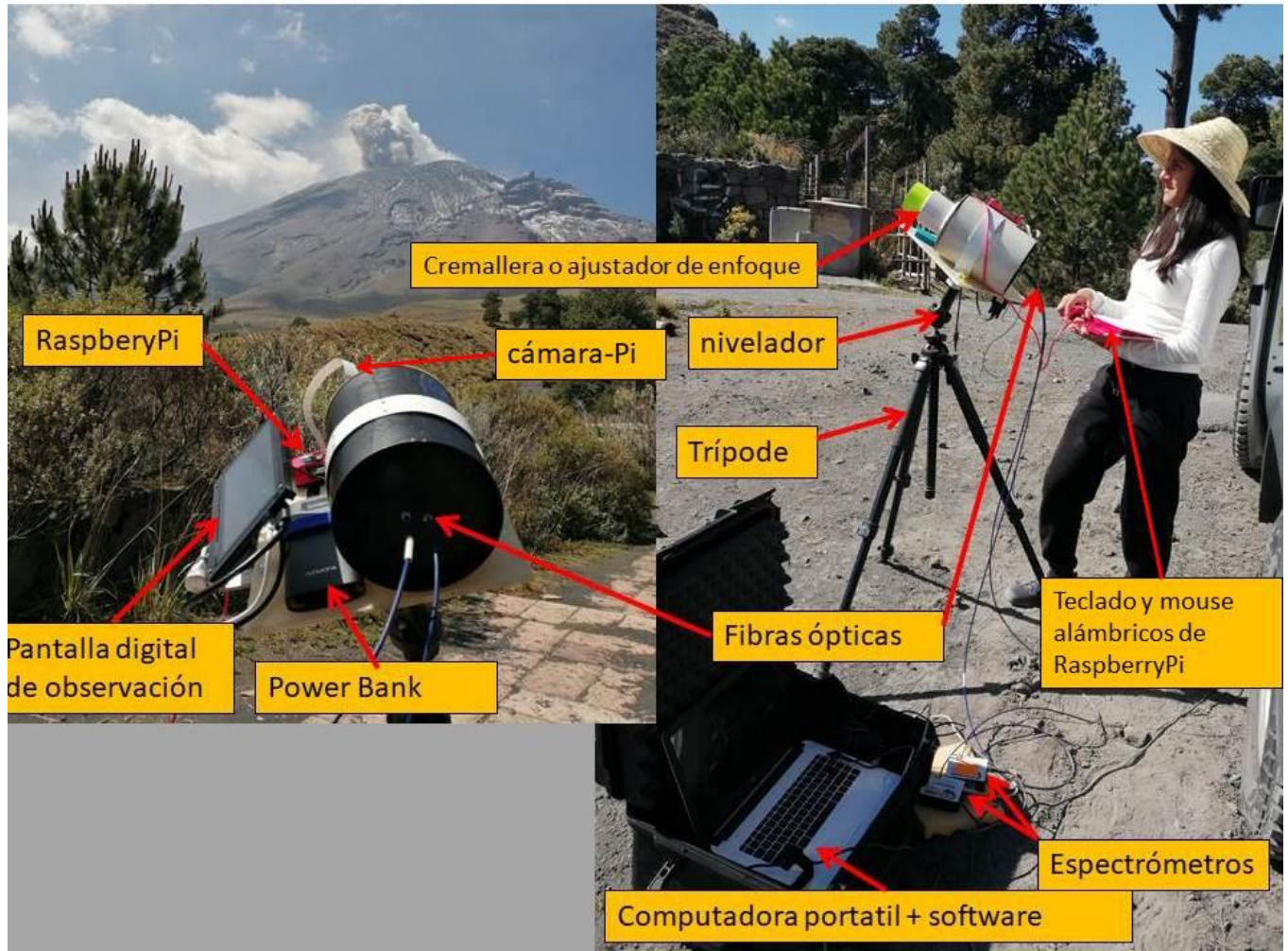
Para la zona de Tlamacas:

Diámetro aparente =  $4100\text{mm} * 0.6\text{mm} / 20 \text{ mm} = 12.3 \text{ m}$ .



Para la zona de paso de Cortes:

Diámetro aparente =  $7500\text{mm} \times 0.6\text{mm} / 20\text{ mm} = 22.5\text{ m}$ .



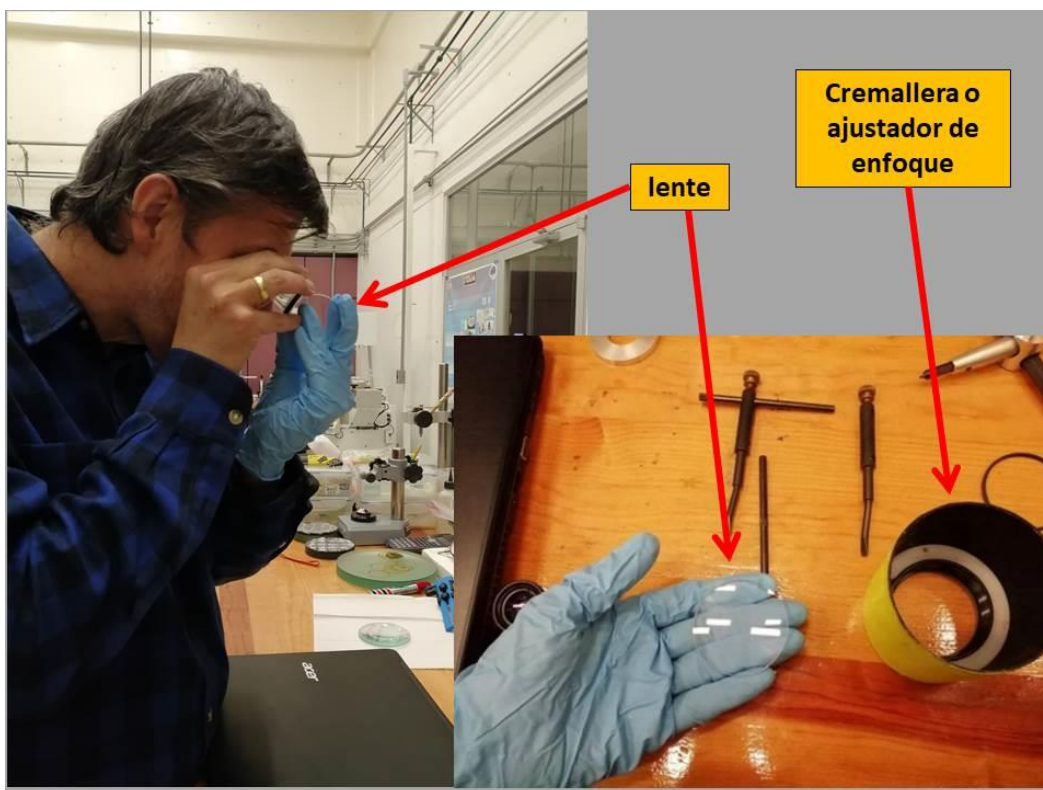
*Figura 10. Estructura externa del equipo de medición. Se observa los componentes del instrumento óptico que permiten las mediciones del volcán (izquierda al fondo el volcán Popocatepetl).*

La estructura externa del equipo de medición (figura 10) consta del instrumento óptico (telescopio) con inserción de fibras ópticas conectadas a los dos espectrómetros, los cuales a su vez se conectan a la computadora, una pantalla de visualización de la imagen captada al interior de la pantalla de fondo (tapa trasera) del telescopio con una cámara de grabación y captura de imágenes, una RaspberryPi que almacena la información y la power bank que permite el suministro de energía continuo para todo el equipo.

### 3.2. Características del lente

La lente utilizada en la presente tesis es un vidrio de Boro silicato “BK7 Shott-glass” (rango de 310 nm) de una lente esférica biconvexa, sin recubrimientos, con un diámetro de 2” = 50.8 mm y de una distancia focal de 200 mm (ver figura 11).

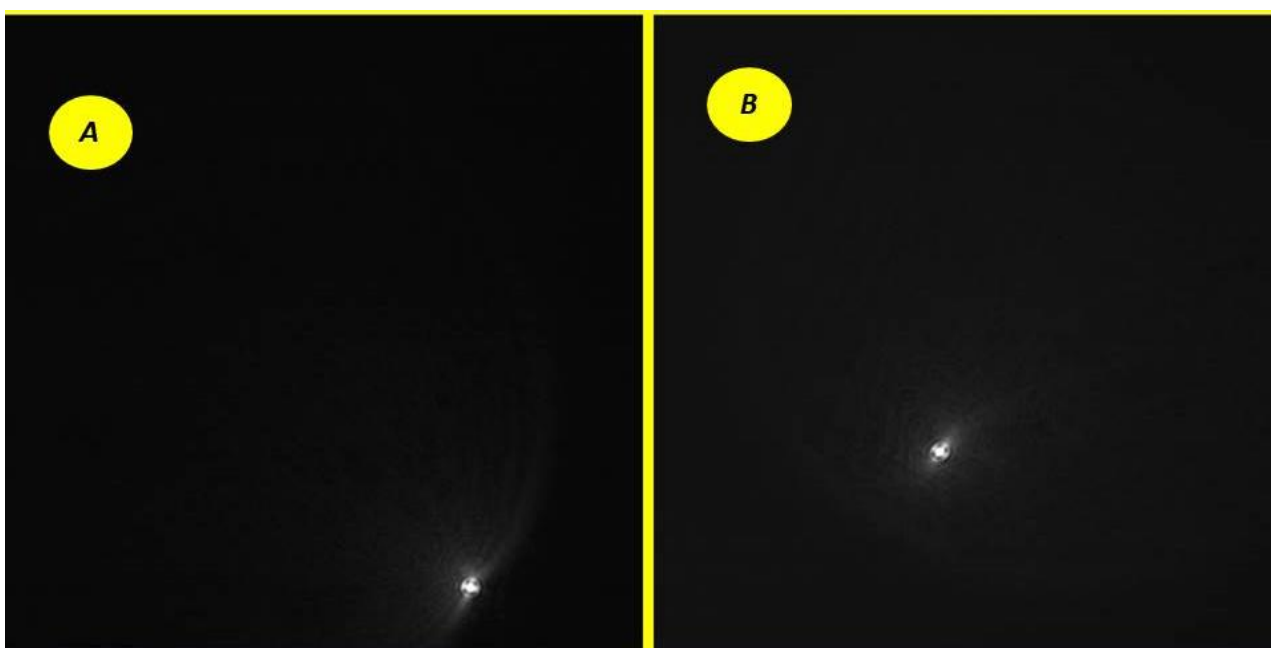
Se realizaron las pruebas de laboratorio para corroborar la adecuada dirección del lente insertada en el instrumento óptico; así como las características ópticas del mismo, por lo cual se puede afirmar que la lente utilizada en el instrumento cumple con las características necesarias para realizar mediciones en la pluma del Volcán Popocatépetl, aunque presenta la aberración esférica y aberración coma, es posible trabajar con ellas, aun si el área de observación fuese más grande que 12.5 m y 22.3 m como es estimada en la sección 3.1.



*Figura 11. Desensamble de lente para caracterización. Se puede observar en la mano solo el lente mientras de lado derecho de la imagen figura el soporte y cremallera por donde capta la energía el instrumento de medición. Uso de guantes para evitar ralladuras al lente.*

### 3.3. Aberración de lente

Para conocer la aberración exacta y la degradación que presentaba el lente del instrumento óptico, se realizó una prueba en laboratorio utilizando una lámpara de tungsteno en el que se hace atravesar un rayo por el lente y posterior a la imagen de aberración detectada se correlacionó con la evaluación en el programa especializado en aberraciones en lentes “ZeMax”(ODZ-2012), programa de diseño óptico en cual se encontró la aberración “coma” y “esférica” en el lente plano convexa tal como puede observarse en las siguientes imágenes (Figura 12 A y B).



*Figura 12. A) Ubicación de aberración tipo “coma” y “esférica” en la lente. B) La aberración “coma” es identificada por la forma de una coma, como un punto jalado. Sin aberración la imagen debería de verse un punto perfecto.*

Las medidas de calidad de imagen se hicieron con el sistema óptico conocido como Point Source Microscope (PSM por sus siglas en inglés), el cual es muy usado para la alineación y verificación de calidad de imagen usando el principio óptico de confocalidad.

Existen equipos de prueba principalmente para aplicaciones de alineación óptica como es el caso del sistema “PSM: Point Source Microscope”. Este tipo de equipo

de alineación también se le conoce como microscopio de autocolimación o microscopio autostigmático.

Un pinhole iluminado con una fuente de luz, monocromática, está conjugado en el mismo plano del detector CCD; de igual manera que en el plano focal de objetivo de microscopio, así entonces tenemos un sistema conjugado de pinhole, cámara y objetivo de microscopio, de esta forma en el plano focal del objetivo de microscopio tendremos una fuente puntual (Suiter, 2009).

El PSM usa el objetivo de microscopio 5X (con razón de Strehl arriba de 0.95) y un pinhole de 8  $\mu\text{m}$  conjugados en el plano del detector de la cámara. El tamaño aparente de la imagen puntual es de aproximadamente 1.6  $\mu\text{m}$ , y la calibración del pixel es de 0.844  $\mu\text{m}/\text{px}$ .

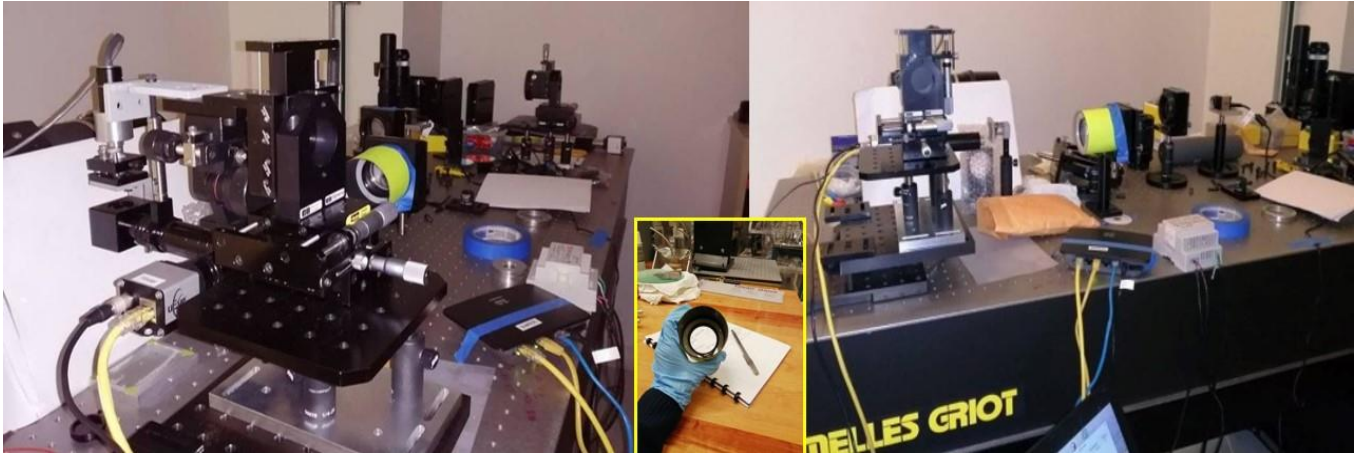
El procedimiento de análisis para este microscopio de fuente puntual (PSM) es el siguiente:

Se coloca el PSM en el plano focal de la lente para colimar la luz, de esta forma la imagen se va a formar en el infinito (ver imagen 13). Enfrente de la lente de prueba se coloca un espejo plano para regresar la imagen que está en el infinito de nuevo al sistema de pruebas (auto colimación).

Si la lente o sistema óptico que se está analizando está libre de aberraciones se obtendrá una imagen al límite de difracción con el disco de Airy bien definido, caso contrario, la imagen o PSF se verá distorsionada producto de las aberraciones, a esta prueba se le conoce como prueba de la estrella (Suiter, 2009).

De este análisis se encontró que la lente sufre de aberraciones clásicas principalmente esférica, coma y cromática que degradan la imagen cerca del 80% de acuerdo al análisis en el programa "ZeMax".

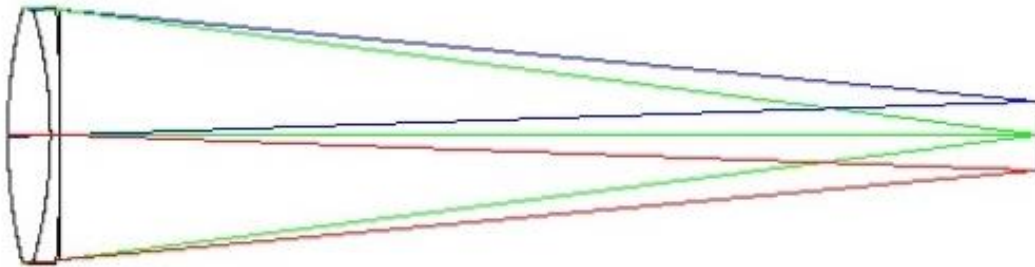




*Figura 13. Prueba de laboratorio con el sistema óptico PSM realizada al lente para ubicar aberraciones.*

Para determinar la distancia focal adecuada del instrumento se analizó la óptica geométrica que es el trazo de rayos para inferir una imagen, así como también el análisis de la óptica física que representa la propagación de haces para las aberraciones con que cuenta el lente.

Mientras que la óptica paraxial que se presentan en óptica geométrica con la particularidad de que los ángulos con los que se trabaja son pequeños, se tiende a llevar a cabo la aproximación del seno o la tangente del ángulo por su arco es válida  $\sin(\epsilon) \approx \epsilon$  ,  $\tan(\epsilon) \approx \epsilon$  siendo que en estas condiciones la ley de la refracción se describe como  $n\epsilon = n'\epsilon'$ . En la siguiente figura 14, se muestra el diseño paraxial con las características del instrumento óptico descritas previamente y donde puede observarse los rayos incidentes en los tres puntos de perforación previstos para medición a las distancias establecidas.



L.

3D LAYOUT	
WED OCT 23 2019	
EFFL: 200.26	DISE O_PARAXIAL.ZM CONFIGURATION 1 OF
	WFNO: 3.9400

Figura 14. Diseño paraxial realizado en programa ZeMax configurado para las inserciones de fibra óptica de medición  $SO_2$ .

Las aberraciones que presenta el lente mediante el programa de ZeMax, y haciendo uso del principio de Fermat de que cada punto de la imagen representa un rayo; indica que cuando existen aberraciones no caen en el mismo punto en el plano por lo que la eficiencia de éste sistema óptico es del 80% debido a que la degradación de la imagen es propia de las aberraciones (ver figura 15. A).

De acuerdo a la ecuación 1.7 lo que va a estar captando la pantalla de fondo dentro del telescopio son 0.46 radianes que equivalen  $26.26^\circ$ , donde también se puede observar el Disco de Airy que no logra llegar al límite de difracción (ver figura 15-B).

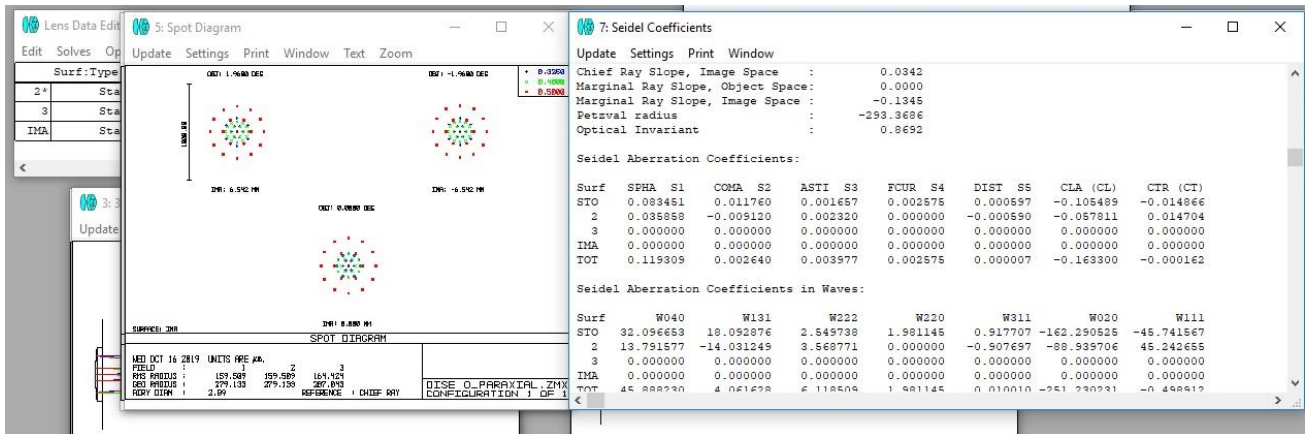


Figura 15. A) Identificación de aberraciones en lente

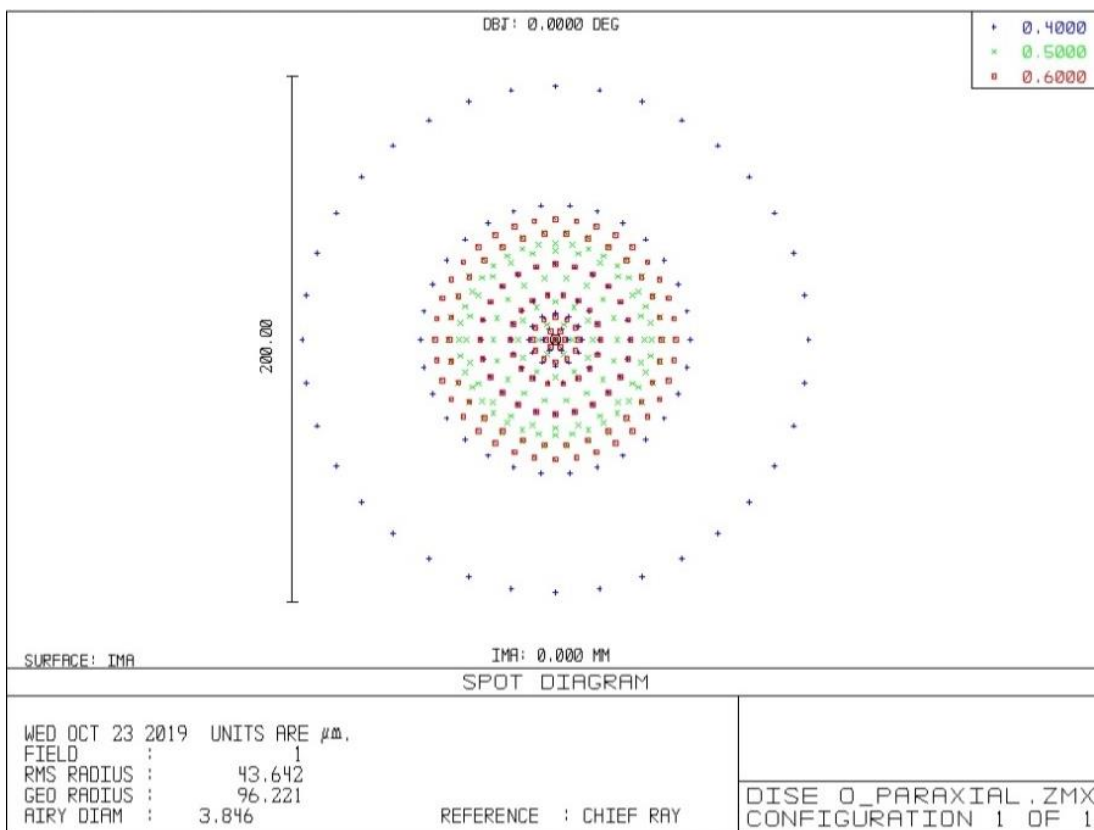


Figura 15. B) Disco de Airy, valores superiores determinan que no se llega al límite de difracción. Puntos azules externos indican la pérdida de energía.

A pesar que la lente no trabaja al límite de difracción su función principal es la de coleccionar fotones; sin embargo, en un futuro se pretende adquirir o bien, diseñar un lente que maximice la colección de fotones y minimizando sus aberraciones.

Por otro lado el principio de Fermat (Mihás, 2005) refiere a que el centro de la imagen forma el centro del objeto, mediante la descripción de la refracción por el

camino óptico que atraviesa la luz y por lo cual en el programa de ZeMax se ha utilizado con las condiciones para diseño óptico; aquí el diámetro de la lente en el llamado “stop” limita los rayos, seguido de la definición de la onda de trabajo y el tamaño del objeto terrestre; en este caso el volcán Popocatépetl (tamaño físico), por lo que se obtuvo que la imagen a formar se encuentra en foco como se puede visualizar con la prueba del programa ZeMax a continuación (Ver figura 16).

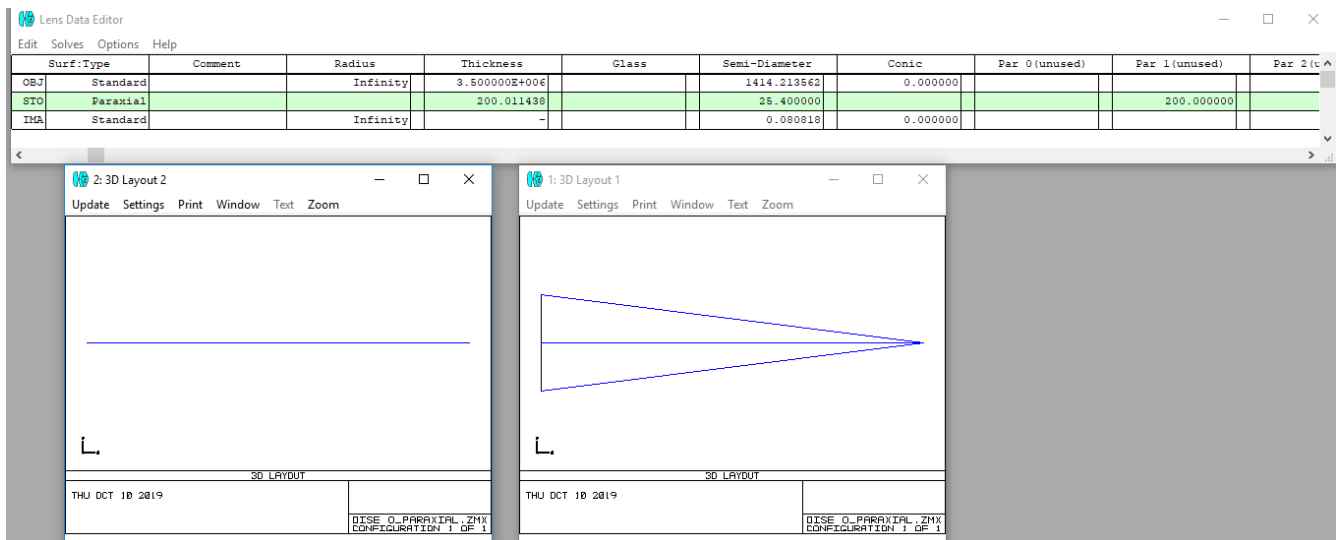
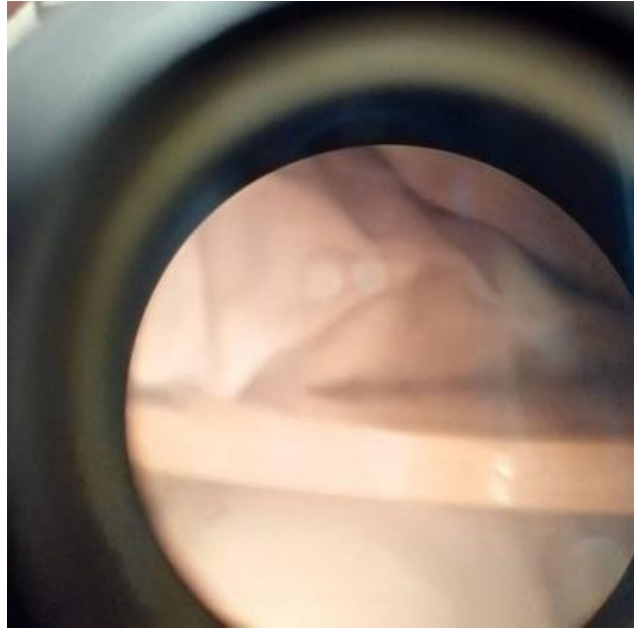


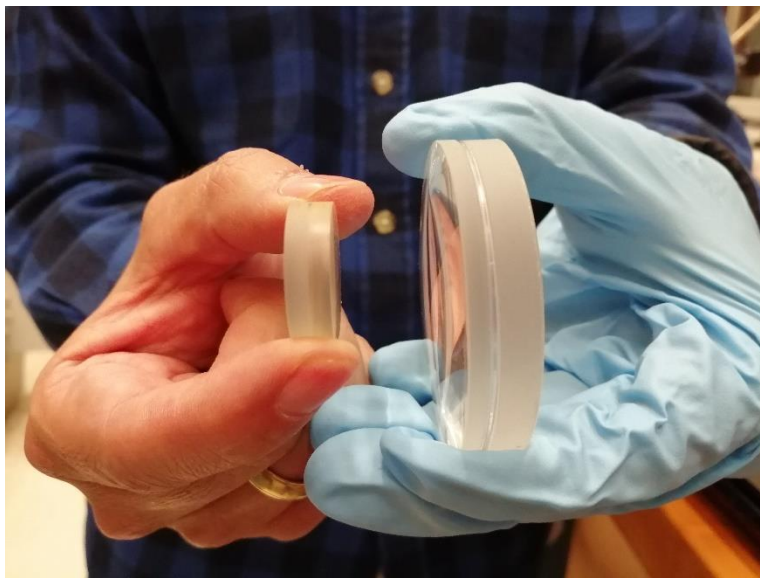
Figura 16. Caracterización de prueba de foco a 200 mm.

De acuerdo a las aberraciones encontradas en el instrumento, se observa que a campos muy grandes de visión, tal como lo es para la pluma del volcán Popocatépetl, se presentará mucho más aberraciones en continuidad. Comenzando con el lente se identificó que es un “singlete” (ver figura 17 y figura 18) es decir, un solo lente que presenta también una aberración tipo “coma y esférica”, lo cual son aberraciones que pareciera apreciarse como desenfoque. Se considera que el uso de un solo lente (singlete) que contiene aberraciones contribuirá a que la función de dispersión de punto PSF sea menor, por lo tanto tendremos menos energía concentrada.





*Figura 17. Observación en microscopio para corroborar que esta constituido de un solo lente (singlete).*



*Figura 18. Diferencia entre lentes de tipo doblete y singlete. De lado derecho se observa el lente que pertenece al instrumento de medición, lo que pudiese confundirse con una división de lente es el recubrimiento del pegamento, siendo así determinado como un solo lente (singlete). Lado izquierdo se observa un lente tipo doblete de menor tamaño en el que se visualiza la unión de dos lentes, incluso con una pequeña variación de color entre ellos.*

Cuando la imagen se encuentra en el plano “focal” o foco, la imagen que se forma en la pantalla interna del instrumento óptico va a ser nítida y no distorsionada. En el mismo programa de ZeMax se realizó esta evaluación y se obtuvo un resultado

favorable para el instrumento (ver figura 19), es decir que la imagen formada en la pantalla de fondo del instrumento se encuentra en foco.

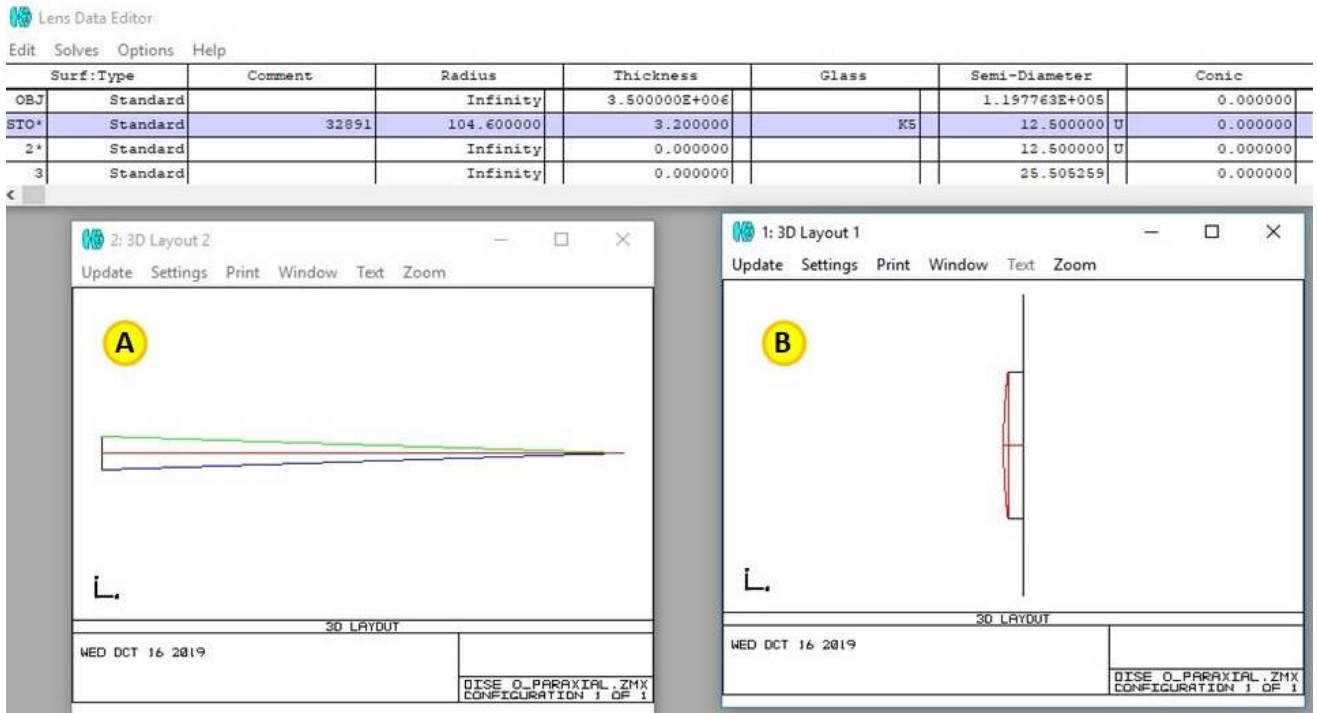
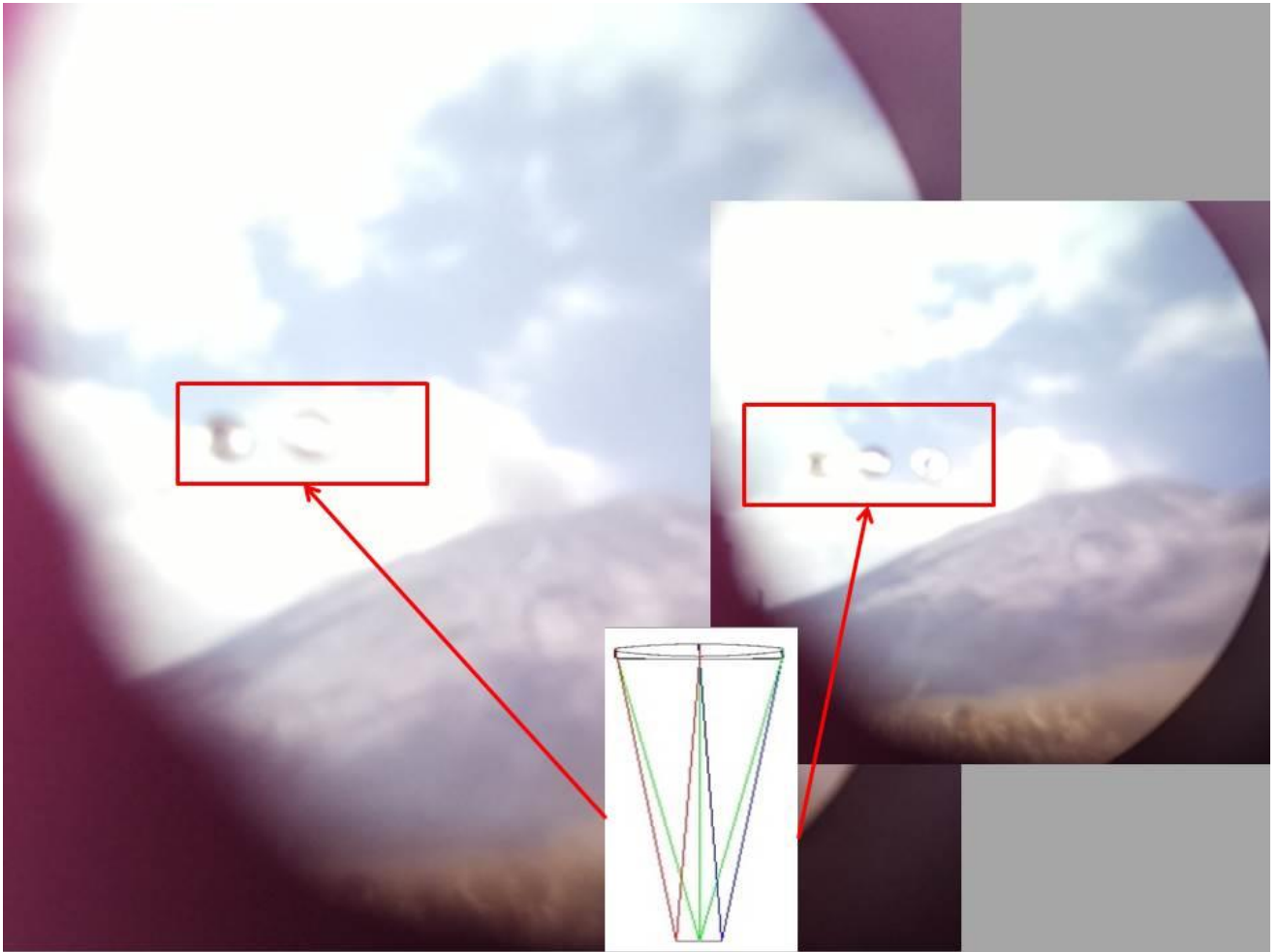


Figura 19. Determinación de imagen en foco desarrollado en programa “ZEMAX” utilizando herramienta de editor de lente. Donde A) Muestra los rayos caen en un mismo punto. B) se visualiza la lente con que cuenta el instrumento de medición.

### 3.4. Adquisición de datos

Durante la campaña de medición se realizan tomas de videos e imágenes cada 20 segundos en los que se tomaron continuamente dos espectros, lo que permitió visualizar durante el análisis de los datos obtenidos la actividad del volcán mientras las fibras están apuntando a la pluma volcánica para la adquisición de datos tal como se puede visualizar en la siguiente figura 20.



*Figura 20. Imágenes grabadas durante las mediciones del volcán Popocatepetl. Muestra de cómo se proyecta la imagen en la pantalla de fondo del instrumento óptico de 20 cm de diámetro. Se indica con un rectángulo rojo los tres orificios donde se conectan dos fibras ópticas para los dos puntos de medición con una separación entre ellas de 1.5 cm.*

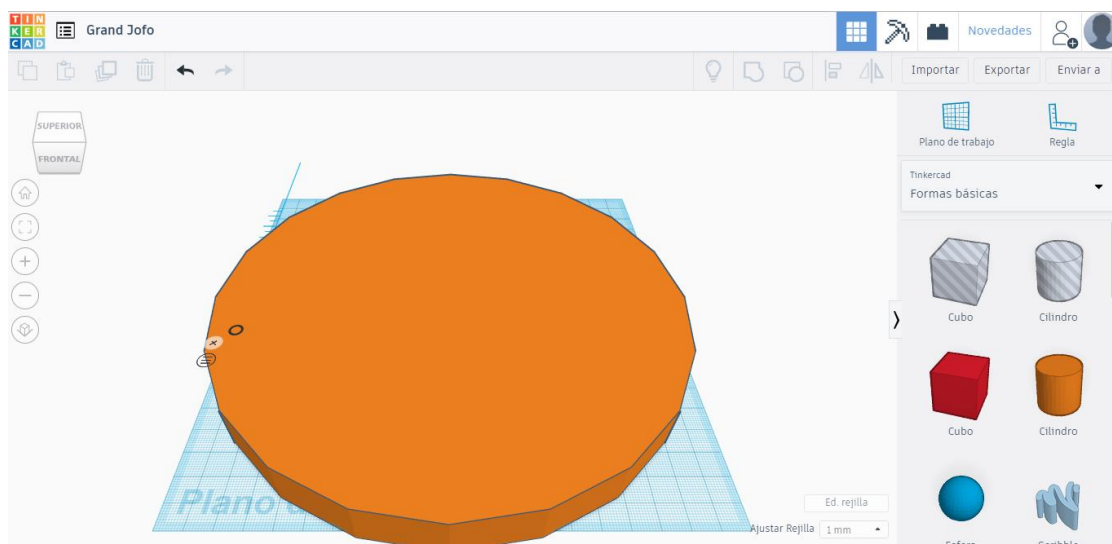
Con el prototipo armado se procedió a realizar mediciones de la pluma para el volcán Popocatepetl y obteniendo dos series de espectros de medición con apoyo del programa Ocean View (obtenido de la página oficial de ocean Insight: <https://www.oceaninsight.com/products/software/acquisition-and-analysis/oceanview/>).

Se adquirieron dos series de espectros (uno para cada espectrómetro) con una frecuencia de 1 Hz-. Los espectros en el rango de 315 nm – 325 nm corresponden al SO<sub>2</sub>, siendo el SO<sub>2</sub> uno de los gases que representa mayor facilidad de medir

desde una fuente puntual de emisión como es el cráter del volcán y debido a que no se encuentra inicialmente en la atmósfera en grandes cantidades.

Inicialmente a cada medición se realizan diez mediciones de espectros oscuros que sirven para analizar las correctas mediciones en el lapso de tiempo mediante una corrección del ruido electrónico (señal que el espectrómetro arroja sin la presencia de fotones llegando al detector).

Se comenzó una modelación previa del instrumento óptico con la construcción de las pantallas (tapas traseras donde se visualiza la imagen de medición al fondo del telescopio) en modelo de 3D desarrollado mediante el programa de Tinkercad (tinkercad.com) El cual es un software en línea para diseños de 3D. Con los cálculos previos se diseñaron las perforaciones a distancia óptima a donde correspondían las fibras ópticas para medir el  $\text{SO}_2$  de la pluma volcánica (Ver figura 21), con la finalidad de obtener la información de lo que las fibras conectadas están apuntando para medir; si se debía perforar muy cerca o más alejadas del cráter ya que por contar únicamente con dos espectrómetros solo se pueden fijar dos puntos de medición. Punto No.1 que apuntara al centro de la pluma y punto No.2 que apuntara al centro del cráter; por lo que las perforaciones ideales de separación entre fibras son de 1.5 cm en un diámetro de 20 cm de superficie de la pantalla interna.



*Figura 21. Diseño 3D de superficie interna de pantalla en instrumento óptico de medición configurado a las distancias reales de medición de la pluma volcánica.*

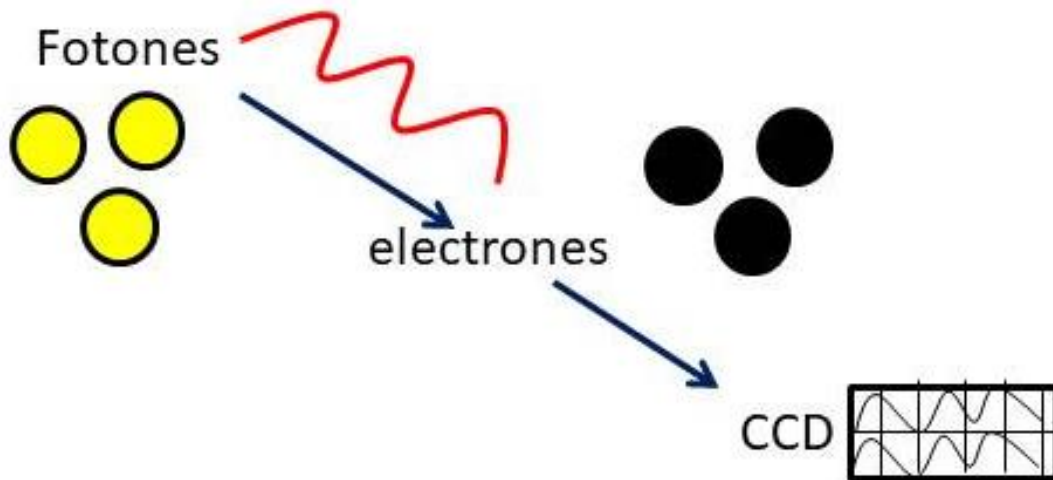
### 3.4.1. Adquisición de imágenes y Adquisición de espectros

Para la adquisición de imágenes y videos se utilizó una Raspberry Pi B+, que es un pequeño ordenador de placa única aproximadamente de 10 cm de tamaño con software de código abierto conectado a una pantalla y teclado móviles mediante suministro de energía por parte de una power bank, coordinado con la adquisición de dos espectrómetros (ver figura 10). La cámara acoplada al Raspberry Pi es la Camera PiCam con 5.4 Megapíxeles; ésta cámara es colocada a lado de la lente del arreglo óptico y su pequeña lente es ajustada para ver la imagen en la pantalla de fondo del cilindro.

Los espectros fueron adquiridos por el programa “OceanView” que es un software que permite gestionar varios espectrómetros de USB con una adquisición diferente de parámetros, ya se ha mencionado anteriormente que el espectrómetro I2P2000S es similar al espectrómetro USB200+. El tiempo de adquisición fue de 100 escaneos cada 60 segundos y el tiempo de integración se cambia según la condición de la luz; para la campaña de medición se utilizó un tiempo de integración de 100 ms (mili segundos) con un promedio de 10 scan (escaneos) para cada espectro.

Mientras que el programa de “Q-DOAS” se utiliza en el presente trabajo con la finalidad de ajustar parámetros de las mediciones reales correspondientes al rango espectral que nos interesa trabajar, que va de los 315 nm a los 325 nm correspondiente al SO<sub>2</sub>. El espectro medido se trabaja en conjunto con el espectro simulado para poder desarrollar la correlación cruzada entre las dos series de tiempo de las columnas de SO<sub>2</sub>.

El espectro oscuro detecta una señal (corriente) no generada por fotones colectados por el telescopio, considerando que mientras exista mayor cantidad de fotones se generará mayor corriente. El espectro oscuro ayuda a eliminar el fondo tanto del detector como de la medición (figura 22).



## Mientras más fotones cae más corriente genera

*Figura 22. Fotones se convierten en electrones para ingresar en CCD. El principio indica que mientras exista una mayor cantidad de fotones va a permitir que se genere más corriente. El espectro medido se concentra en el CCD. Los CCD son dispositivos de carga acoplada y este tipo de sensor es sensible a la luz y trabaja a manera de líneas de pixeles con una cobertura de los colores primarios (RGB).*

El espectro oscuro se tomó para luego sustraerlo a todos los espectros de la serie. La manera de adquirir este espectro oscuro en las mediciones es al inicio de cada medición, primero se tapa el frente del instrumento óptico (telescopio) que es a donde están apuntando las fibras ya conectadas a ambos espectrómetros. Se obtienen entre 10 a 20 escaneos al inicio, otros 10 escaneos a mitad de la medición y al final de la medición nuevamente 10 escaneos.

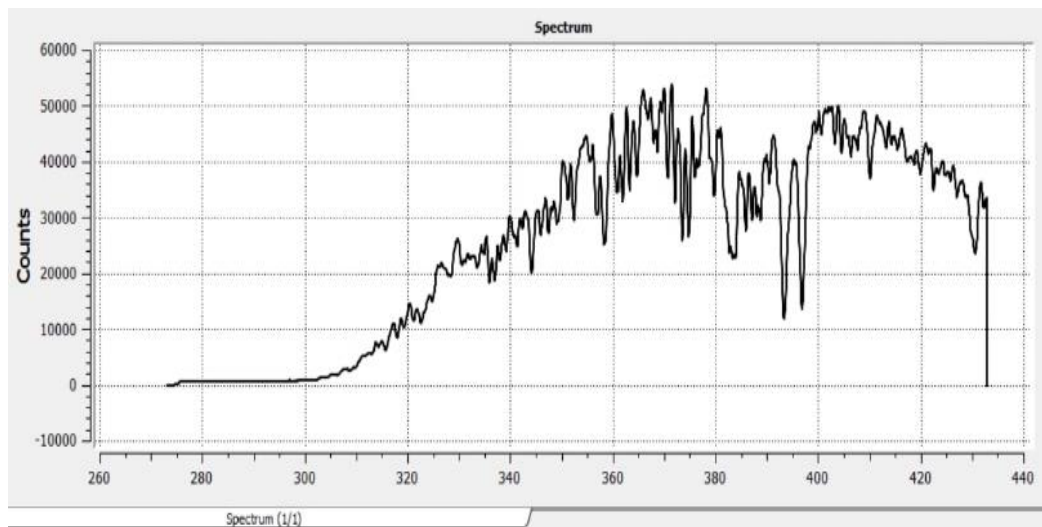
### 3.5. Calibración de los espectrómetros

Se define a la calibración como el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que “debería de indicar” de acuerdo con un patrón de referencia con valor conocido. En los espectrómetros la calibración se realiza al identificar la relación entre los canales del detector del espectrómetro y la longitud de onda mediante el proceso de moléculas ajustadas con el método Q-Doas. Para esto se utiliza como calibración inicial la medición de un espectro utilizando una

lámpara de mercurio, mediante este espectro se identifican varias líneas de absorción de mercurio, en longitudes de onda conocidas y de ésta forma se pueden relacionar las longitudes de onda medidas con líneas de absorción de la lámpara de mercurio que son conocidas. Para medir los espectros de la lámpara de mercurio se utiliza el software OceanView. Ésta investigación se hizo mediante el software DOASIS (Kraus, 2006) utilizando la herramienta de “asistente de calibración” para obtener la correspondencia entre los pixeles del detector DOAS y las longitudes de onda; es en este proceso donde se obtiene el conocimiento de la resolución que presenta el espectro y el saber a cuál longitud de onda corresponde cada elemento del detector; mediante ella se determina la dispersión y la forma de la línea del espectro con la finalidad de producir las secciones de absorción de referencia (correlación cruzada) de los gases traza incluidos en la medición. Estas secciones transversales de absorción de referencia deben medirse en la misma longitud de onda y con la misma resolución del espectrómetro por ello se considera que antes de realizar cualquier medición el espectrómetro debe ser calibrado (Johansson,2009). La figura 23 muestra un espectro obtenido correspondiente al espectrómetro USB2000+. En este caso el archivo de salida en el programa DOASIS representará como se vería un espectro si la fuente de luz fuera perfecta. El SO<sub>2</sub> se recuperó en un intervalo de recuperación de 310 nm a 326 nm. Para gases estables como el SO<sub>2</sub> que se pueden almacenar en una celda durante largos periodos de tiempo, es posible hacer la calibración por medición directa para una concentración conocida previamente del gas y en una configuración donde la longitud de la trayectoria óptica a través del gas es también conocida. A partir del espectro de mercurio también se determina la forma de la línea del espectrómetro y dada que la forma de la línea del instrumento varía con la longitud de onda se debe seleccionar la línea de emisión única más cercana a la región de la longitud de onda para posteriormente ser utilizada en la recuperación (Johansson, 2009). Un ejemplo de esta calibración es la que se realizó para ambos espectrómetros con los que se trabajó en esta investigación; ambos utilizaron una línea de 302 nm para las mediciones de SO<sub>2</sub>. Considerando que en el presente trabajo de investigación la



longitud de onda que nos interesa va de los 315 nm a los 325 nm ya que es el rango al que corresponde el  $\text{SO}_2$  el cual es el gas de interés de ésta investigación. La siguiente imagen (figura 23), muestra el espectro medido en la campaña de medición del 16 de mayo del 2020 para el sitio Tlamacas a 4.1 km del volcán Popocatepetl.



*Figura 23. Espectro obtenido durante el procesamiento de datos de la campaña de medición con espectrómetro USB2000+ correspondiente al 16 de mayo del 2020.*

Una vez obtenido el espectro medido se utiliza un espectro de referencia (ver figura 24) del  $\text{SO}_2$ , para poder realizar la correlación cruzada. La correlación cruzada se basa en la aplicación y uso del coeficiente de Pearson para determinar qué tan correlacionado se encuentran dos series con un retraso de tiempo en cada espectro, la cual se utiliza posteriormente para calcular la abundancia de  $\text{SO}_2$ . Éste retraso de tiempo es el que se calcula con ambos espectrómetros indicando el tiempo que tarda en recorrer la pluma de  $\text{SO}_2$  del punto uno (espectrómetro 1) al punto dos (espectrómetro 2), tal como se puede ver en la figura 24.



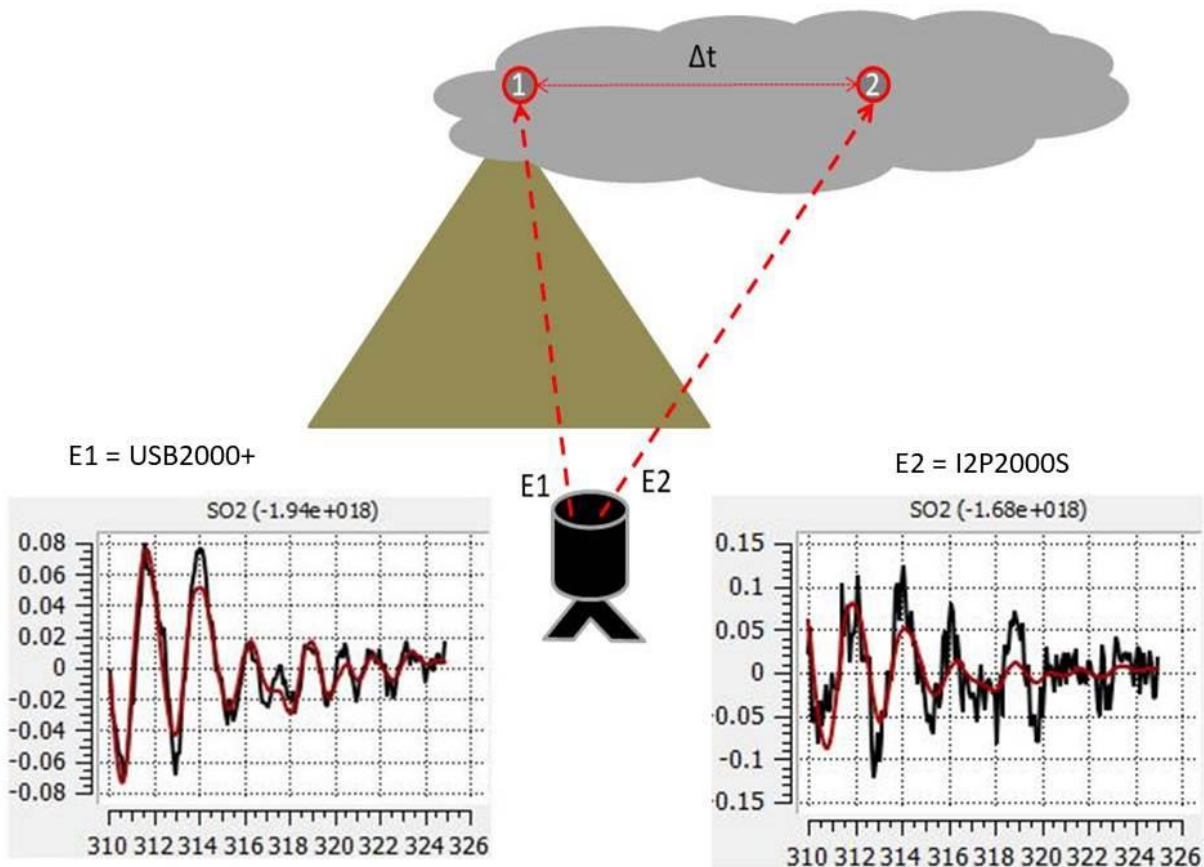


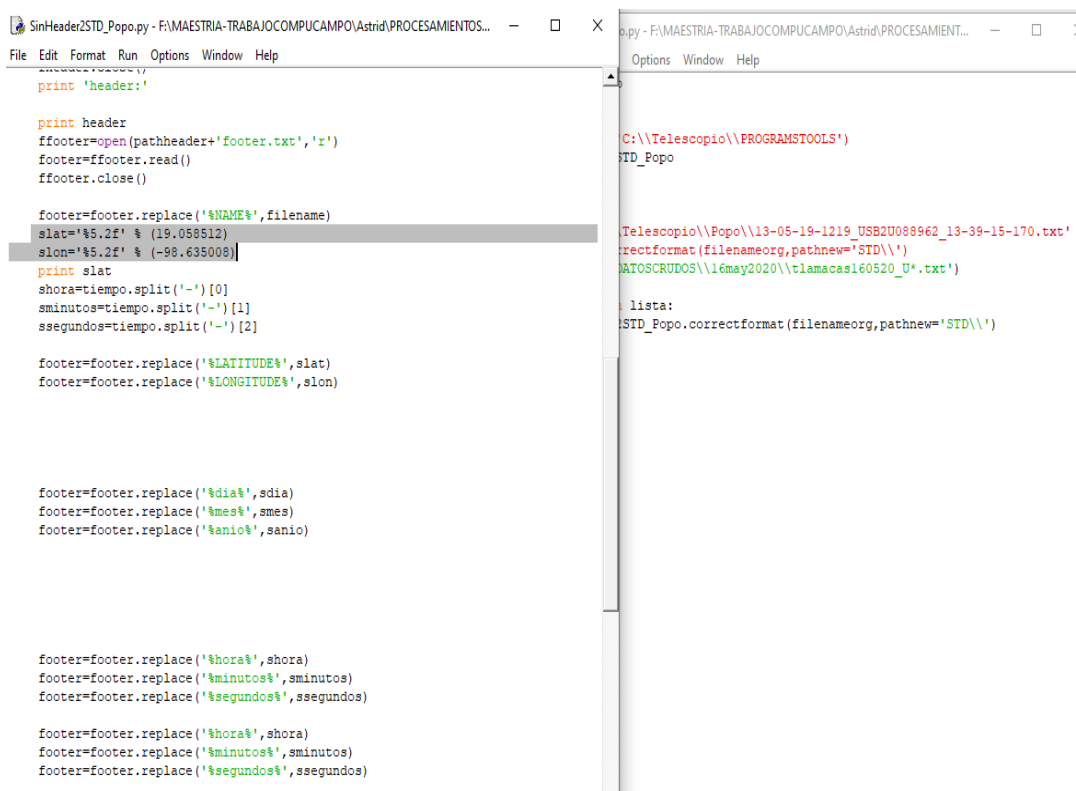
Figura 24. Representación gráfica de mediciones en campo de la pluma volcánica con el instrumento óptico. E1 y E2 representan los espectrómetros USB2000+ e I2P2000S respectivamente. En la pluma volcánica se representa el punto 1 y el punto 2 de la ubicación donde los espectrómetros están captando la información.  $\Delta t$  representa el tiempo transcurrido que tarda en recorrer la pluma del punto 1 al punto 2. Graficas inferiores muestran el espectro real medido contra el espectro de referencia de  $\text{SO}_2$  para cada espectrómetro.

### 3.6. Procesamiento

Con un programa en Python se convierten los archivos de texto simple (.txt) obtenidos directamente en campo a formato STD que pudieran ser leídos en DOAS para medir la abundancia de  $\text{SO}_2$  presente en la pluma volcánica.

Dentro del programa se modifican las coordenadas del sitio donde se lleva a cabo la medición. Considerando ya sea Tlamacas o Paso de Cortés, lo que es una opción útil para que los datos cuenten con la información correcta del lugar donde

se trabaja. Nuestro sitio de medición establecido fue Tlamacas a 4100 m de distancia en línea recta del volcán (Ver figura 25 y figura 28).



```
SinHeader2STD_Popo.py - F:\MAESTRIA-TRABAJO COMPUTACIONAL\Astrid\PROCESAMIENTOS...
File Edit Format Run Options Window Help
print 'header:'

print header
ffooter=open(pathheader+'footer.txt','r')
ffooter=ffooter.read()
ffooter.close()

ffooter=ffooter.replace('%$NAME$',filename)
slat='%5.2F' % (19.058512)
slon='%5.2F' % (-98.635008)
print slat
shora=tiempo.split('-')[0]
sminutos=tiempo.split('-')[1]
ssegundos=tiempo.split('-')[2]

ffooter=ffooter.replace('%$LATITUDE$',slat)
ffooter=ffooter.replace('%$LONGITUDE$',slon)

ffooter=ffooter.replace('%$dia$',sdia)
ffooter=ffooter.replace('%$mes$',smes)
ffooter=ffooter.replace('%$anio$',sanio)

ffooter=ffooter.replace('%$hora$',shora)
ffooter=ffooter.replace('%$minutos$',sminutos)
ffooter=ffooter.replace('%$segundos$',ssegundos)

ffooter=ffooter.replace('%$hora$',shora)
ffooter=ffooter.replace('%$minutos$',sminutos)
ffooter=ffooter.replace('%$segundos$',ssegundos)

C:\Telescopio\PROGRAMSTOOLS\
STD_Popo

Telescopio\Popo\13-05-19-1219_USB2U088962_13-39-15-170.txt'
correctformat(filenameorg,pathnew='STD\')
MATOSCRUDOS\16may2020\tlamacas160520_U*.txt')

lista:
STD_Popo.correctformat(filenameorg,pathnew='STD\')
```

Figura 25. Programa de conversión de archivos txt a STD para leer en Q-Doas con las coordenadas correspondientes al sitio de medición.

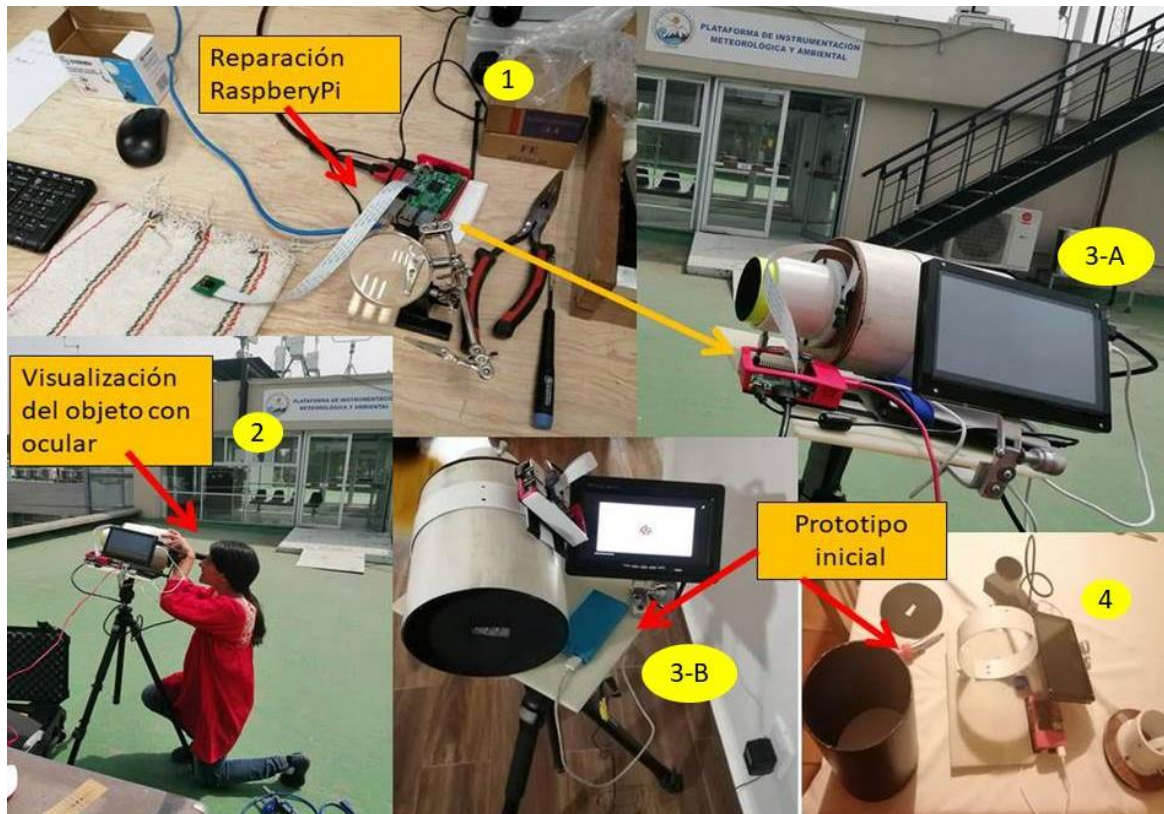
Se utilizó el programa de Q-DOAS que es una aplicación multiplataforma que realiza recuperaciones con técnicas DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) de gases traza de mediciones espectrales con instrumentos satelitales, terrestres, móviles o aeronáuticos. Los principales parámetros de entrada que el Q-DOAS requiere son: los archivos de calibración y de función de línea, un espectro solar y el rango donde recuperar la concentración de SO<sub>2</sub>.

### 3.7. Dificultades en las mediciones

Durante la construcción del instrumento óptico se presentaron problemas que complicaban el buen funcionamiento del equipo por lo que se realizaron los ajustes correspondientes en el taller instrumental. Lo primero que se realizó fue el pintar de color negro mate las paredes internas del instrumento (telescopio) para evitar el reflejar la luz incidente, posteriormente se procedió a la colocación de un soporte para manipular el equipo completo incluyendo el telescopio, Raspberry Pi y la pantalla digital, también se determinó por eficiencia añadir una power bank para facilitar el trabajo en campo; misma que fue colocada en el soporte general. Con este equipo se realizaron cinco campañas de medición pero debido a deficiencias, ajustes y reparaciones del equipo que requerían ser corregidos para su buen funcionamiento; solo una campaña de medición fue la que permitió realizar el trabajo de campo correctamente y obtener datos. Los ajustes y reparaciones al equipo se realizaron en el taller del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

En la primera campaña al volcán Popocatepetl destinada a realizarse desde “Paso de Cortés” el día 13/05/2019 no se pudo obtener información por problemas que presentaba el equipo y no se adquirieron datos que permitiera su análisis, por lo que fue necesario realizar ajustes al instrumento en general en el taller. Posteriormente se realizó una segunda campaña el día 20/05/2019 para tratar de obtener datos desde “Tlamacas” un sitio más cercano al volcán debido a que las condiciones climáticas eran buenas para ello, pero el equipo aun requería de ajustes generales y una reparación a la RaspberryPi por daño ocasionado durante la instalación y no se pudieron obtener buenos datos (Ver figura 26 y figura 27). Una tercera campaña fue realizada el 9/12/2019 desde “Tlamacas” la cual tampoco fue exitosa debido a problemas técnicos del equipo y falta de suministro de energía al equipo; durante esta campaña se decidió adquirir y agregar una power bank para el equipo. Para la cuarta campaña a “Paso de Cortés” programada el 17/03/2020 no fue posible realizar mediciones de la pluma volcánica ya que se encontraba en su totalidad nublado el volcán debido a las

malas condiciones climáticas. La quinta y última campaña realizada el día 16/05/2020 fue durante la cual se logró obtener datos y las condiciones climáticas del día eran favorables con el volcán despejado y visibilidad de la pluma volcánica para realizar mediciones.



*Figura 26. Superior (1) Reparación de Raspberry Pi y cámara interna del mismo sistema. De izquierda a derecha inferior (2) Adaptación de ocular móvil-provisional para apuntar a través de las ranuras de conexión de fibras ópticas el lugar de medición. (3-A) Power Bank y pantalla añadida al prototipo para trabajar en condiciones reales de campo sin energía eléctrica de zona. (3-B; 4) Prototipo de instrumento óptico, PVC pintado a negro y tapa de fondo provisional añadida de negro para captura de luz.*





*Figura 27. Fotografía de la segunda campaña de medición realizada desde Tlamacas. Se observa al fondo el volcán Popocatepetl y más próximo el equipo completo con arreglos improvisados durante la campaña.*

## CAPITULO 4

# 4. MEDICIONES Y RESULTADOS

### 4.1. Volcán Popocatépetl

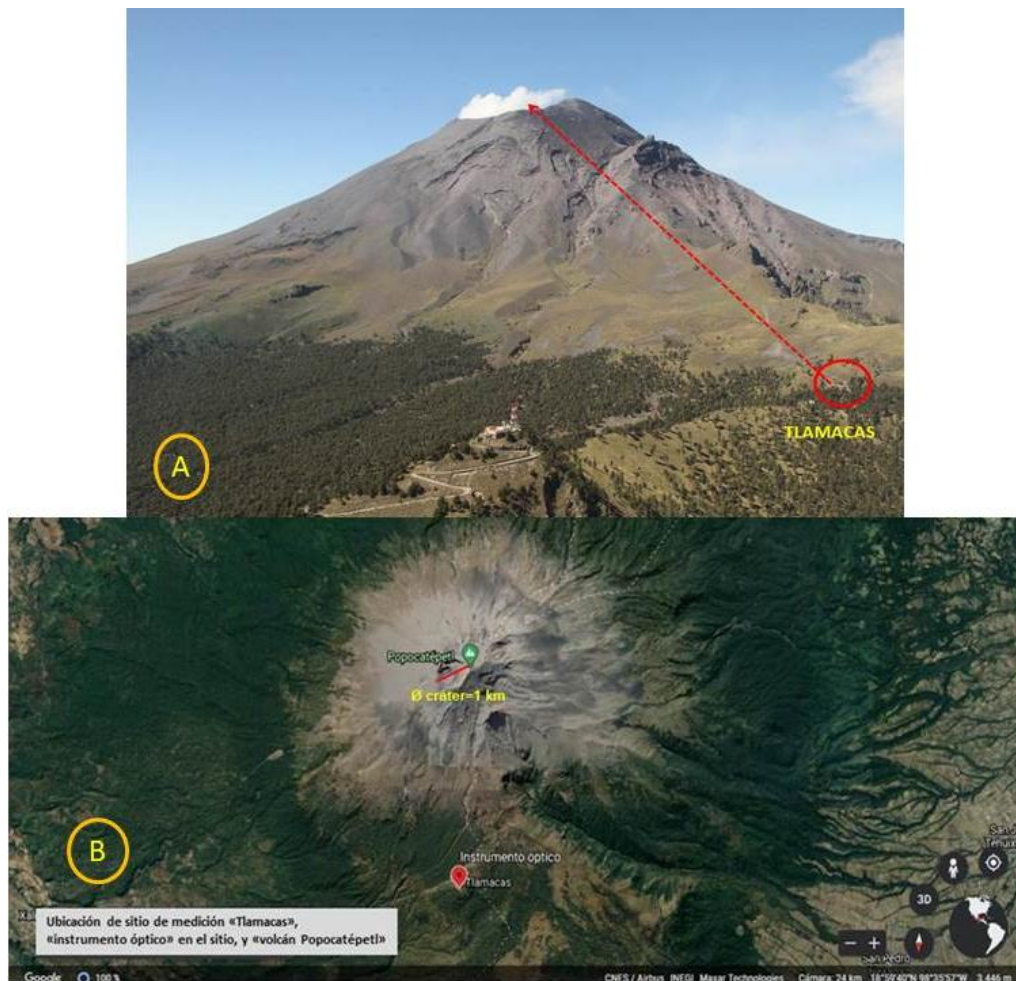
El volcán Popocatépetl de 5426 m de elevación es un estratovolcán activo que se ubica en los límites territoriales de Estado de México, Puebla y Morelos, se localiza aproximadamente a 72 km al suroeste de la ciudad de México, a 43 km de Puebla, a 63 km de Cuernavaca y a 53 km de Tlaxcala.

El volcán debe su nombre “Popocatépetl”, que en Náhuatl significa “montaña que humea” a la constante actividad que ha presentado desde épocas prehispánicas. En diciembre del año 1994 el volcán Popocatépetl comenzó a mostrar actividad continua y hasta el presente (abril 2021), ha mostrado fases activas con un continuo crecimiento y destrucción de domos; emisiones masivas de ceniza y sus erupciones de estilo vulcanianas son fuentes naturales de SO<sub>2</sub> consideradas de las más importantes en el mundo (ver figura 28). Por ejemplo, para el año 2006 Grutter *et al.*, 2008 reportaron un valor de  $2.45 \pm 1.39 \text{ Gg/día}$  de SO<sub>2</sub> promedio diario.

En 1994 el volcán Popocatépetl se activó mediante la limpieza de conducto volcánico que sería el inicio de preparación para el ascenso de magma observado el 21 de diciembre de 1996; las investigaciones realizadas por Siebe *et al.*, (1995) indican que el volcán Popocatépetl había estado emitiendo ceniza y expulsado material residual para liberar el conducto y prepararlo así para el ascenso del magma. A partir de 1996 la actividad magmática ha proseguido hasta la actualidad con una continua formación y destrucción de domos durante los últimos veinticinco años, siendo un total de 85 domos formados a la fecha de 23 de diciembre del 2019 (CENAPRED, 2019).

El volcán Popocatépetl es uno de los volcanes más emblemáticos a nivel mundial y muy representativo del territorio mexicano (ver figura 28). El Popocatépetl por ser un volcán con actividad permanente y con inmediaciones pobladas, es uno de

los volcanes con mayor y continuo monitoreo volcánico. Instituciones como el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED), el Instituto de Geofísica de la UNAM y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM continuamente monitorean las actividades, cambios y emisiones de gases del volcán. Debido al monitoreo y estudios anteriores en el Popocatepetl sobre las emisiones de  $\text{SO}_2$  podemos inferir y comparar datos que se obtengan con el instrumento óptico de medición remota desarrollado en el presente trabajo de investigación.



*Figura 28. A) Fotografía aérea del volcán Popocatepetl donde se observa poca desgasificación. Se indica el sitio de Tlamacas (a 4.1 km distancia del volcán en línea recta) con círculo rojo para su fácil identificación. Línea punteada indica la ubicación del instrumento óptico y la dirección hacia donde se apunta el telescopio para medir la pluma volcánica (Fotografía R. Campion). B) Ubicación en GoogleEarth del sitio de medición y estimación de cráter del volcán de 1 km de diámetro.*

Para poder determinar la velocidad de la pluma de emisión del volcán Popocatepetl fue necesario en primer lugar obtener los datos de medición del día 16 de mayo del 2020 desde el punto en la estación “Tlamacas” a 4.1 km del volcán (figura 28 y figura 29), y determinar las condiciones atmosféricas durante la campaña de medición en el volcán Popocatepetl en las cuales se presentó una continua emisión de gas, sin explosiones durante el tiempo de medición, poco viento y presencia de nubes cerca del volcán con dirección del viento y pluma volcánica al noroeste.

Para realizar la determinación de la velocidad de la pluma volcánica referente al volcán Popocatepetl se realizó una pequeña programación en Python con el siguiente proceso:

Inicialmente los datos obtenidos con los espectrómetros I2P2000S y USB2000+ se encuentran en archivos de texto simple (.txt) y son obtenidos cada segundo en cuanto a tiempo se refiere. Estos archivos .txt deben ser convertidos a formato STD con una previa programación en python para posteriormente poder correrlos en el programa de Q-Doas. La importancia aquí radica en las correctas mediciones con fecha y hora de toma de espectros  $\text{SO}_2$ , para lo cual la recuperación (obtención de la concentración del gas) del  $\text{SO}_2$  se utiliza a partir del espectro de absorción solar calculando el espectro de referencia y compararlo con el espectro medido para posteriormente ajustarlo interactivamente.





*Figura 29. Primeras mediciones efectivas con el instrumento óptico en el volcán Popocatepetl realizadas desde el sitio de Tlamacas a una distancia de 4.1 km en línea recta al volcán. Condiciones meteorológicas óptimas para la medición.*

La velocidad de la pluma volcánica se mide calculando la distancia entre los puntos de medición que equivale para el punto Tlamacas dividido entre el tiempo que se obtuvo de los cálculos (el punto más alto como se indica en la figura 31) con un valor de  $x = -26.61$  segundos correspondiente al tiempo (en el programa Python); por lo tanto, se confirma que el cálculo de la velocidad de la pluma a 10 m/s es un valor típico para la altitud de medición en Tlamacas a 4100 m de altitud.

Dado:

$X = -26.61$  s       $y = 0.423950$       Distancia Tlamacas = 2050 m

Separación de fibras/ distancia focal =  $1.5 \text{ cm} / 20 \text{ cm} = 0.075 * 4100 \text{ m} = 307.5 \text{ m}$

Sabiendo que  $V = d/t$

$307.5 \text{ m} / 26.62 \text{ s}$  (pico de medición) = 11.6 m/s

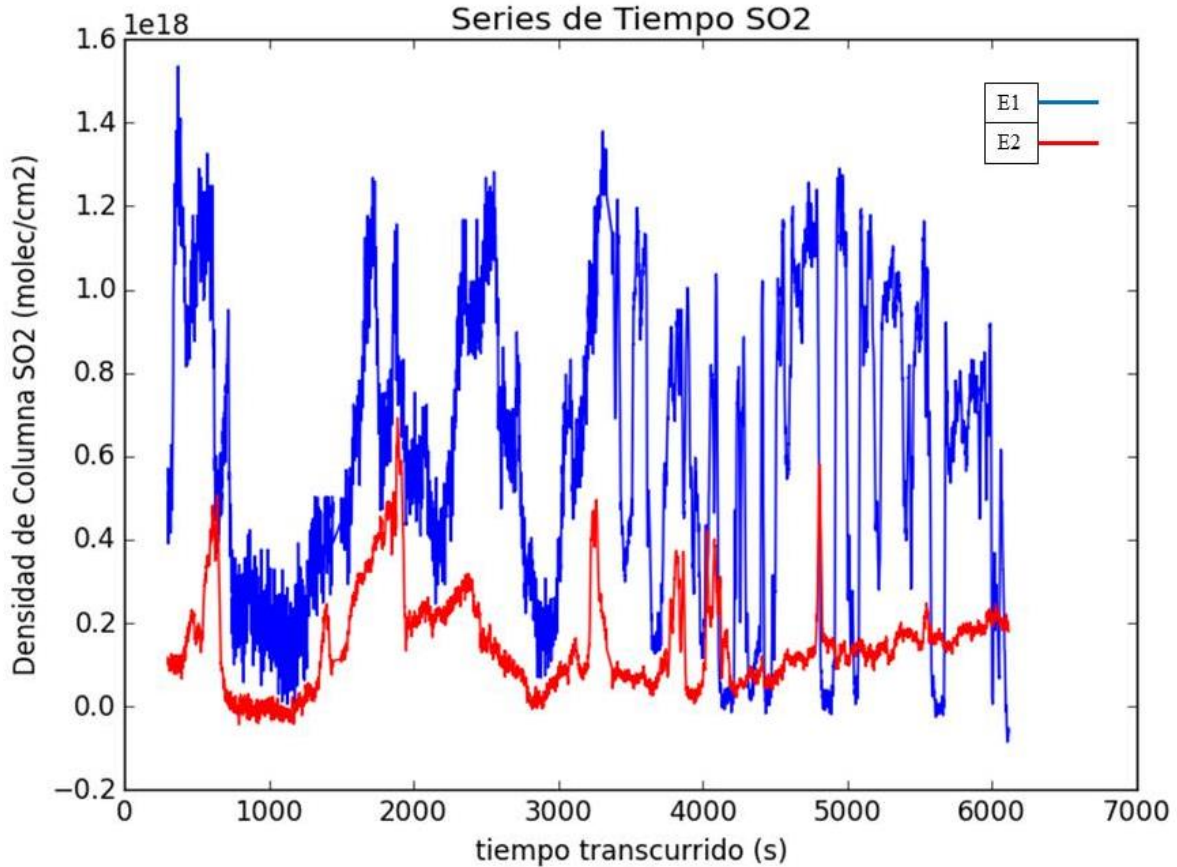
Se obtiene:

**Velocidad (Pluma volcánica) = 11.6 m/s**

Con una estimación visualmente de altitud de la pluma sobre el cráter volcánico entre los 6000 m y 6500 m (Fig. 34).

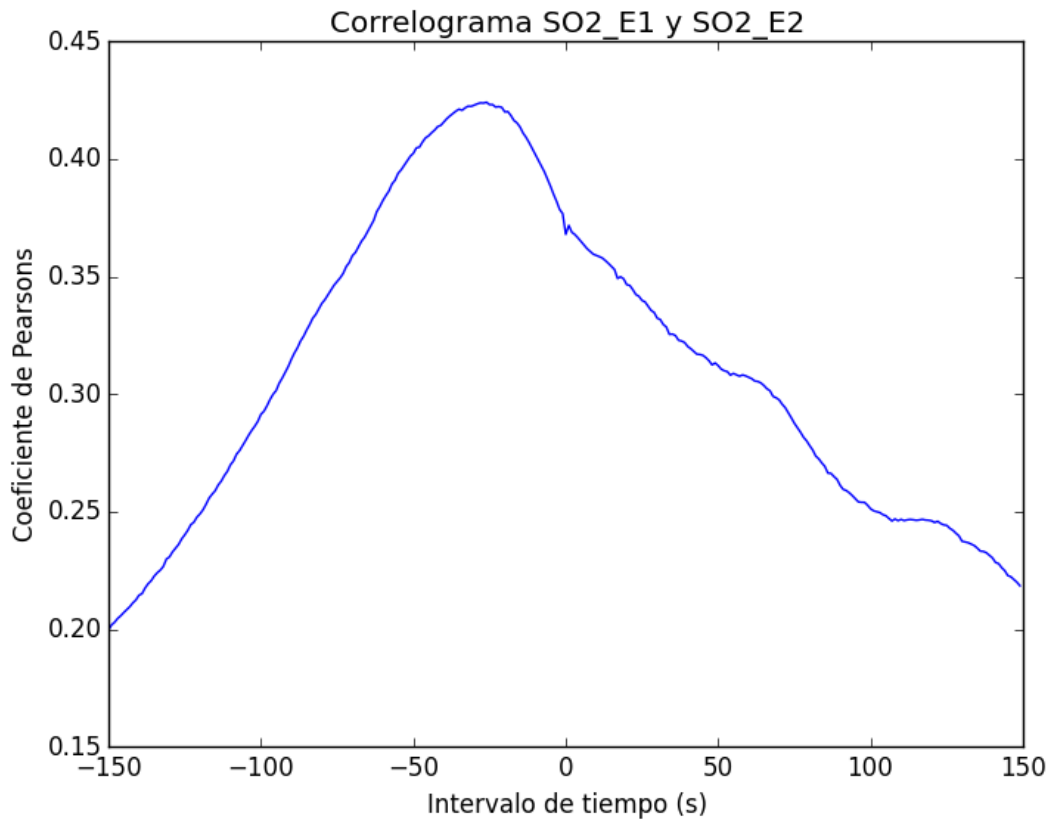
Por lo tanto, se obtiene que la velocidad de la pluma volcánica del Popocatepetl con fecha 16 de mayo de 2020 es 11.6 m/s medida desde el sitio Tlamacas (4.1 km) con horario local 10:00 hrs a 12:00 hrs.

El siguiente gráfico (figura 30) muestra la variación que existe en la pluma volcánica donde la señal azul indica las mediciones del espectrómetro I2P2000S, mientras que el espectrómetro USB2000+ está representado por la señal rojo. Se puede observar en el gráfico que la señal del espectrómetro I2P2000S (E1) llega primero y con una mayor intensidad que la señal del espectrómetro USB2000+ (E2), esto se debe a la ubicación asignada a los espectrómetros en el instrumento óptico durante las mediciones, por lo tanto; el E1 se encontraba apuntando a la pluma volcánica con un punto más cercano al cráter (más próximo de la fuente de emisión); mientras que el E2 presenta una serie más baja debido a que se encuentran influyendo factores como la turbulencia atmosférica ocasionada por el viento a nivel de la pluma volcánica y por el punto más alejado (distancia) al que se encuentra midiendo; por ello es más probable que el SO<sub>2</sub> se encuentre más disperso a esta distancia.



*Figura 30. Espectrómetros I2P2000S (E1) y USB2000+ (E2). Posibles pérdidas con el espectrómetro USB (E2) por los cambios de viento. Cuando existe dispersión no se presenta tan grandes variaciones. Espectrómetro 1 conectado a observación más cerca del cráter en horizontal, espectrómetro 2 conectado a observación horizontal en el centro de la pluma (dirección más alejado del cráter).*

El correlograma de SO<sub>2</sub> de la figura 31. Describe una correlación cruzada entre las dos series de tiempo de las columnas de SO<sub>2</sub> medidas simultáneamente con dos espectrómetros, tal como se muestra en la figura 30 y figura 24.



*Figura 31. El punto máximo de Correlación de SO<sub>2</sub> para los dos espectrómetros I2P2000S y USB2000+ indica cuanto tiempo se tarda la pluma en propagarse de un punto 1 al punto 2 de medición.*

En cuanto a la estimación del error para la velocidad de la propagación de la pluma se llevaron a cabo dos etapas:

a) Se recupera la distancia temporal con la correlación cruzada y b) se estima la distancia espacial. El retraso calculado con correlación es un promedio, sobre un periodo. Más que calcular un error en el valor promediado del retraso entre una masa de aire que se propaga de la línea de vista del espectrómetro 1 a la línea de vista de espectrómetro 2, podemos discutir la utilidad de este parámetro promediado, que es la misma discusión si es válido recuperar una velocidad promediada. Si la variación de la velocidad sería bastante grande en comparación al promedio la curvatura en el máxima de la figura 31 sería pequeña (muy suave) y la locación del máximo no sería muy clara, en el ejemplo vemos un máximo único y concluimos que la velocidad era constante en la periodo de medición del 16 de Mayo del 2020.

Por lo cual la geometría y estimación de la distancia espacial es la fuente de error más grande.

Hay dos diferentes fuentes 1) por un error instrumental y 2) en la estimación, por a) la propagación de la pluma no es perpendicular, o b) la estimación de la distancia del instrumento a la pluma tiene un error.

- 1) Los errores instrumentales están dados por la distancia Pantalla-lente y la separación de las dos fibras ópticas. La distancia focal es ajustada, para ver un objeto lejano de forma nítida, como la distancias objeto (5 km-10 km) a la lente son muy grandes en comparación a la distancia focal 20 cm. Observando una masa de aire con un telescopio no ajustado perfectamente, la imagen de la masa de aire es más grande y no está nítida en la pantalla.

Un error en el ajuste va a degradar el contraste y la figura 34, pero no es seguro que producirá un error en la estimación de la distancia.

Una incertidumbre en la separación de las fibras es una fuente instrumental sistemática. Se estima la incertidumbre de la separación en +/- 0.5 mm así, que el equipo sería capaz de definir el ángulo entre los dos direcciones de observación con una precisión de +/-0.5 mm/200mm= +/- 0.0025 rad, que es 3.33% del ángulo estimado de 0.075+/-0.0025 rad

- 2) Para observaciones desde más grandes distancias como observaciones desde Alzomoni a 12.5 km descrito por Krüger *et al.*, (2013) y Schiavo *et al.*, (2019), el más grande error en la geometría estimada origina probablemente del error en la dirección de propagación estimada. Para observaciones con un equipo móvil y a una distancia más cerca al cráter, se busca durante la observación realizar una observación perpendicular a la pluma y la fuente más grande sería la estimación de la distancia a la pluma, especialmente si hay un cráter con un diámetro comparable a la distancia, habrá incertidumbre dada por la grande área del cráter.

Considerando la estimación del diámetro del cráter de 1 km del volcán Popocatépetl (figura 28(B)), podemos estimar la incertidumbre usando el medio del diámetro +/-1km/ 4.1 km dividido con la distancia del Instrumento Cráter. La

incertidumbre resultante tiene un valor de  $\pm 12\%$  en distancia y de  $\pm 1.4$  m/s en la velocidad.

El error total de 12.41% sería la suma gaussiana de los dos errores independientes; instrumental y estimación de la distancia, actualmente dominado por la estimación de la distancia, sitio de observación-pluma.

#### **4.2. Comparación de la medición de viento con modelos.**

La latitud y longitud a la que se encuentra la zona del cráter de Popocatépetl es: 19.02 -98.62 y con cual se busca la información de modelos meteorológicos sobre el viento en diferentes altitudes.

Para el 16 de mayo del 2020 en la página de Air Resources Laboratory of NOAA se visualiza los datos de 16:00 hrs a 18:00 hrs GMT que corresponden a una velocidad de 7.9 m/s a una altitud de 5874 m y a una velocidad de 13.3 m/s correspondiente a 6696 msnm de altitud tal como se muestra en la imagen siguiente de la figura 32. Esto indica que la velocidad de la pluma de 11.6 m/s calculada en el presente trabajo de investigación, se encuentran entre los rangos de velocidad del viento simulado por NOAA y por lo tanto se puede considerar que para la fecha de medición los valores son comparables de velocidad de viento a las altitudes de referencia.

De igual manera se debe considerar para la página Air Resources Laboratory que la hora se obtiene en GMT por lo que se sugiere hacer para la ubicación del volcán Popocatépetl el cálculo restante del tiempo a la hora local. Para este caso, el día 16 de mayo del 2020 las mediciones con el instrumento óptico iniciaron a las 10:00 hrs (hora local) y finalizaron a las 12:00 hrs.



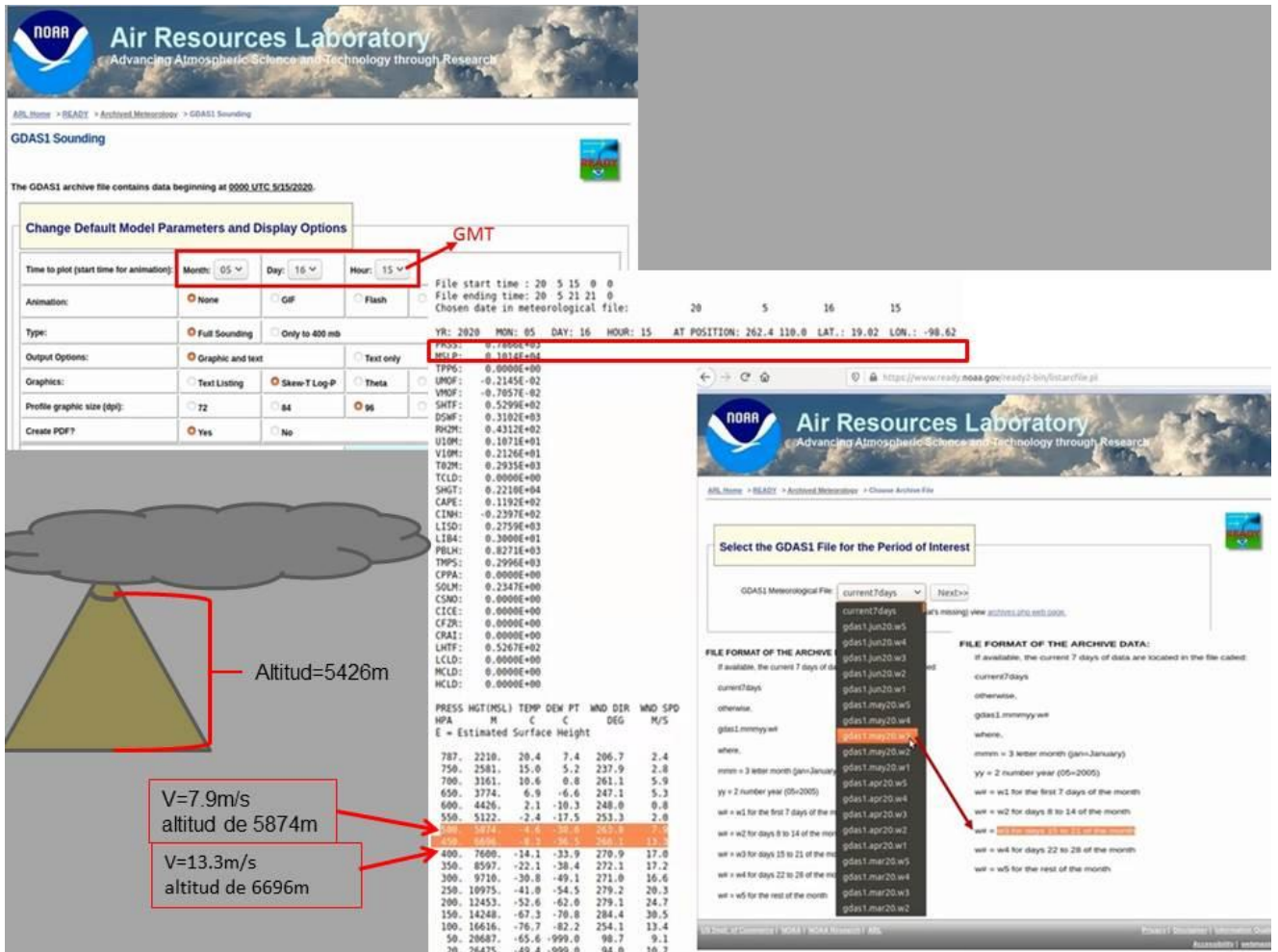


Figura 32. Proceso de obtención de datos de velocidades del viento a altitudes superiores al cráter del volcán Popocatépetl (Air Resources Laboratory of NOAA, 2020)

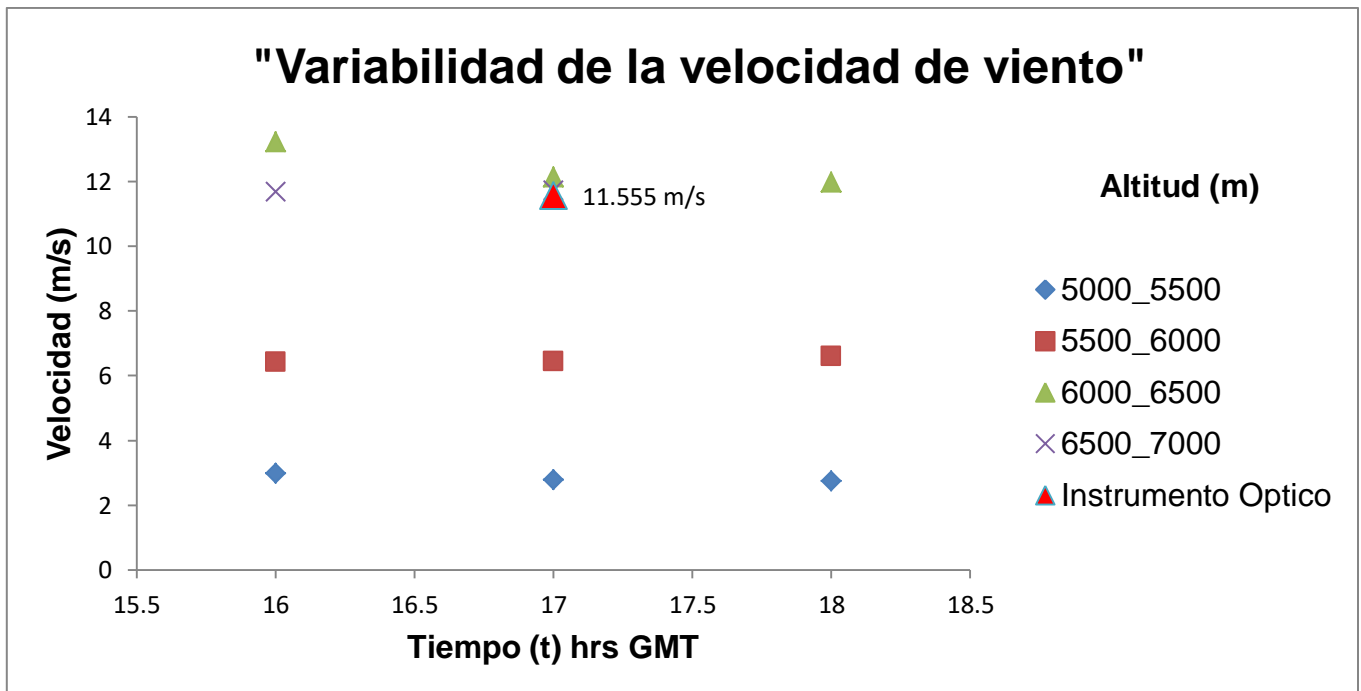
Los datos obtenidos desde la página Air Resources Laboratory (NOAA, 2020) se encuentran de libre acceso, lo que permitió obtener información adicional para comparar los resultados obtenidos de los cálculos realizados en esta tesis con los descargados de esta página. Considerando que la altitud del volcán Popocatépetl es de 5426 m (hasta la cima) y el área de interés para mediciones de velocidad es la pluma volcánica, es necesario obtener información de una altitud superior a la cima del volcán, para éste día de medición (fecha: 16/05/2020) se estimó con el instrumento óptico y observaciones visuales la altura de la pluma volcánica entre los 6000 m – 6500 m sobre el cráter (ver figura 34). Debido a que los datos obtenidos de la página (NOAA, 2020) cuenta con dos valores superiores a la

altitud del Popocatepetl que son 5874 m – 6696 m en lo que se podría encontrar situada la pluma; se concluye por lo tanto que nuestro cálculo de velocidad de la pluma correspondiente a 11.6 ms se encuentra entre los valores 7.9 ms – 13.3 ms de velocidad obtenidos en Air Resources Laboratory entre las altitudes de referencia para la pluma del Popocatepetl y se confirma así que son consistentes con la velocidad de la pluma volcánica con método de programación en Python desarrollado para tratamiento de los datos para uso del instrumento óptico que es la finalidad de esta tesis.

Otro modelo meteorológico con el cual se compara es un modelo para pronóstico de la dispersión de ceniza, el modelo usa Weather Research and Forecasting Model (WRF) el cual es optimizado para el centro de México y se encuentra operado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Los datos de viento de diferentes sitios, alturas y horas se obtuvieron directamente de García-Reynoso Agustín (comunicación personal, 2020).

Al comparar mis resultados con los modelos se puede redefinir la altura de la pluma que estamos midiendo. Para obtener la gráfica de variabilidad de la velocidad de viento de la figura 33 se promediaron los datos de dos estaciones: estación cráter y estación Tlamacas entre altitudes de 5000 m – 7000 m infiriendo la altitud de la pluma, los datos proporcionados de pronóstico en un horario de 16:00 a 18:00 hrs GMT corresponden al tiempo de medición de este día entre 10:00 a 12:00 hrs (hora local).

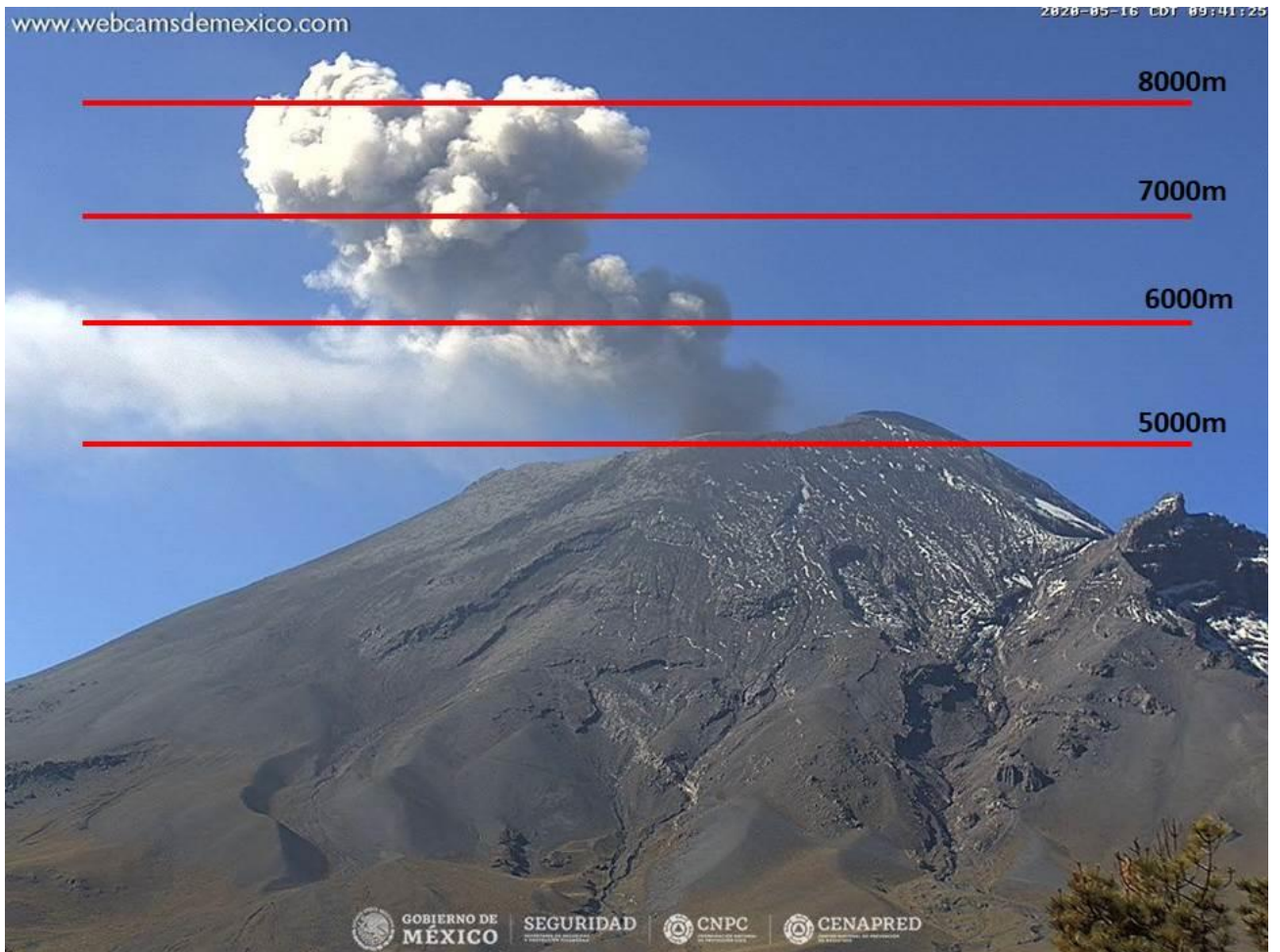




Gráfica 33. Velocidad del viento del modelo WRF para el volcán Popocatépetl a altitudes que van de entre los 5000 m a 7000 m. Obsérvese que el instrumento óptico de medición se ubica a una velocidad de 11.6 m/s correspondiente a las 11:00 hrs (hora local) cercana a los 6500 m de altitud.

El poder estimar la altitud de la pluma volcánica con el ajuste del instrumento óptico para las campañas de mediciones es un parámetro muy importante y principalmente para los vulcanólogos que en la actualidad realizan esta estimación únicamente de manera visual, un ejemplo de esto se representa en la figura 34.

El instrumento óptico desarrollado en esta tesis puede medir la velocidad de la pluma volcánica y se puede estimar la altura de ésta combinando los modelos del pronóstico o análisis del tiempo, representando así un aporte al estudio y monitoreo volcánico. La siguiente imagen (figura 34) muestra la representación visual de las altitudes en la pluma volcánica para el 16 de mayo 2020 desde Tlamacas para la hora local 09:41:25 hrs. El reporte del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) indicó para esta fecha visibilidad por la mañana con emisiones de gases volcánicos y ligeras cantidades de ceniza que se dispersaron al Este Noreste (ENE).



*Figura 34. Estimación visual de altitud en m de la pluma volcánica para el día 16 de mayo del 2020 con hora local 09:41:25 hrs (imagen tomada y modificada de CENAPRED, 2020).*

Considerando que la obtención de los datos para este día (hacia donde apuntaban las fibras) se encuentra a una mayor altitud de la cima del volcán debido a que el interés es la pluma de emisión y no el cono volcánico, se podría suponer que los valores a la altitud de 6502.1 m es la proximidad en correlación.

Finalmente se obtuvieron un conjunto de imágenes y videos durante el tiempo de medición para poder correlacionar los datos obtenidos con los espectrómetros y con la Raspberrypi, lo que permitió observar a donde apuntan exactamente las fibras del instrumento óptico. Se sugiere que cuando se observa en las mediciones un pico de incremento de gas  $SO_2$  se proceda a observar las imágenes o videos captados por la Raspberrypi y corroborar el posible cambio de actividad

(explosiones) en los videos que grabaron en tiempo real sobre el cráter del volcán, de esta manera se podría identificar si corresponde a una exhalación en el mismo tiempo en que se indica un aumento en las mediciones.

## 5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un instrumento portátil de bajo costo que brinda información espectral de la pluma volcánica de  $\text{SO}_2$  en dos puntos y de la cual se pudo calcular la velocidad de la pluma volcánica para el día de medición. El instrumento óptico construido tiene como finalidad el principio de trabajo de un telescopio y una cámara; puede conocer a qué punto de la pluma volcánica se toma uno o dos espectros y documentarlo con una imagen.

Se dirige la medición al campo de visión en que queremos obtener espectros, observando las posiciones de las fibras ópticas acoplados a los dos espectros y la imagen de la pluma volcánica en el fondo del telescopio. Esto permite observar la pluma volcánica de emisión aún si el día es parcialmente nublado.

Dada una lente con distancia focal de 200 mm la imagen de un objeto a 4.1 km se va a formar a 200.011 mm de la lente (plano focal).

Se calculó la posición de las fibras ópticas en el plano focal dependiendo del lugar de medición, para esta tesis se determinó únicamente para dos puntos “Tlamacas” a 4100 m y “Paso de Cortés” a 7500 m aunque solo fue utilizada para Tlamacas.

Se realizaron varias campañas y finalmente el 16 de Mayo 2020 una campaña con éxito, en la cual el instrumento funcionó correctamente y las condiciones climáticas permitieron realizar mediciones. Desde Tlamacas se pudo realizar mediciones entre 10:00 hrs hasta 12:00 hrs y se determinó la velocidad de la propagación de  $11.55 \pm 1.4$  m/s para la pluma volcánica correspondiente a esta fecha.

Actualmente la incertidumbre es limitada de la estimación de la distancia entre el equipo de medición y la pluma volcánica.

En la comparación con dos modelos de pronosticó se encontró similares valores para las alturas entre 6000 m y 6500 m.

A partir de los resultados obtenidos con el instrumento y de acuerdo a los resultados que arrojan los modelos, sugieren que la pluma volcánica se encuentra a X Y Z m de altura.

Además se caracterizaron los elementos ópticos y se estimó una eficiencia en términos de energía (número de fotones) del orden del 80% por la lente usada en

la presente tesis; para los fines de la determinación de la velocidad de viento es posible trabajar con las aberraciones presentes.

Para usar el instrumento y optimizar el análisis espectral para la reconstrucción de columnas de  $\text{SO}_2$  u otros gases volcánicos, se recomienda usar una lente “doblete” para minimizar las aberraciones.

Para mejorar la calidad de imagen y obtener más flexibilidad con las distancias de las fibras ópticas que definen el ángulo entre las direcciones en cuales se miden los dos espectros, se recomendó construir un pantalla (fondo del Telescopio) con una impresión 3D, conectar varias fibras y usando un multiplexeo que permite cambiar entre diferentes fibras.

## 6. RECOMENDACIONES

Se considera diseñar a futuro el sistema óptico con las características adecuadas para mayor eficiencia y aplicabilidad a trabajo de campo. Añadir fibras externas o una mayor cantidad de fibras para poder hacer un mapeo de multiplexado. Cambiar el lente por un lente más completo; un doble lente (doblete) o agregar otro singlete al lente existente que permitirá disminuir las aberraciones existentes. También se podría considerar el añadir espejos en el instrumento óptico en lugar de lentes y para obtener una mejor calidad de imagen de nuestro campo de visión en videos e imágenes usar una impresora 3D para la adaptación de tres pantallas de fondo removibles con la inserción de fibras ópticas estimadas para diferentes sitios de medición del volcán (Tlamacas a 4.1 km, Paso de Cortés a 7.5 km, Alzomoni a 12.5 km).

De igual manera se sugiere adaptar un ocular al instrumento que se encuentre ensamblado y que permita la manipulación completa del equipo para de esta manera ubicar el punto de observación sin necesidad de uso de pantalla digital externa; que tiene como finalidad de adquirir imágenes de la actividad volcánica durante las mediciones en una campaña.

Finalmente se recomienda usar los perfiles de viento de los modelos para estimar la altura de la pluma volcánica en cada campaña de medición.

# BIBLIOGRAFÍA

Barringer, A.R., Davies, J.H., Moffat, A.J.. (1970). The problems and potential in monitoring pollution from satellites. AIAA earth resources observations and information systems meeting, A1AA 70-305, 62-75.

Carreño, F., Antón, M.A.. (2001). Óptica Física. Universidad Complutense de Madrid: Prentice Hall.

Campion, R., Delgado Granados, H., Mori, T.. (2015) Image-based correction of the light dilution effect for SO<sub>2</sub> camera measurements. Journal of Volcanology and Geothermal Research 300, 48-57.

Chiwo, F.. (2015). Diseño y construcción de un sistema portátil de espectroscopia. THES, 2, 24-27.

Dichburn.R.W.. (1982). Teoría ondulatoria. En ÓPTICA (313-317). Inglaterra: REVERTÉ.

Fuerza Aérea Mexicana-FAM... (2010). Percepción remota. 24-01-2018, de Secretaría de Marina-SEMAR Sitio web: <http://2006-2012.semarmex.gob.mx/informacion-sector/ciencia/ermexs/temas-de-interes/384-percepcion-remota.htm>

Galle, B., Openheimer, C., Geyer A., McGonigle A.J.S., Edmonds, M., Horrock L.. (2002). A miniaturized ultraviolet spectrometer for remote sensing of SO<sub>2</sub> fluxes: A new tool for volcano surveillance.J..Volcanol: Geoth.Res.119:241-254)..

García-Reynoso, A.. (2020). Velocidad de viento alrededor del volcán Popocatepetl, Comunicación privada.

García-Pla J., Slavan-Menor, C.. (2017) La Composición Química de la Atmósfera Primitiva del Planeta Tierra. Investigación Química. Anales de Química. 113 (1),2017, 16-26.

George Biddell Airy.. (1868; digitalizado-2010). Popular Astronomy: A Series of Lectures Delivered at Ipswich Macmillan's school class books. Princeton University: Macmillan, 1868.

George Biddell Airy. (1835). On the Diffraction of an Object-glass with Circular Aperture: From the Transactions of the Cambridge Philosophical Society. Diffraction, V, 9.

Gisi, M., Hase, F., Dohe, S., and Blumenstock, T.. (2011): Camtracker: a new camera controlled high precision solar tracker system for FTIR-spectrometers, Atmos. Meas. Tech., 4, 47–54, <https://doi.org/10.5194/amt-4-47-2011>.

Grupo IOA atmósfera UNAM.. (2017). Pronóstico meteorológico WRF. 26 noviembre 2020, de Grupo Interacción Atmosférica-UNAM Sitio web: <http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia/inf-wrf>

Grutter, M., Basaldud,R., Rivera, C., Haring, R., Junkerman, W., Caetano, E., and Delgado-Granados,H.. (2008). SO<sub>2</sub> emissions from Popocatépetl volcano: emission rates and plume imaging using optical remote sensing techniques. Atmospheric Chemistry and Physics, 8, 6655-6663

Google-earth (s.f).Ubicación Parque nacional iztaccíhuatl-popocatépetl. Volcán Popocatepetl. Recuperado el 10 de diciembre, 2020, de: <https://earth.google.com/web/@19.03346918,-98.63892935,4500.85401519a,19207.76387529d,35y,177.77430717h,0t,0r>



Halmer, M.M ., Schmincke, H. -U., Graf, H. –F.. (2002). The annual volcanic gas input into the atmosphere, in particular into the stratosphere: a global data set for the past 100 years. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, 528-511.

Hönninger, G., Von Friedeburg, Christoph., Platt, Ulrich.. (2004). Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS). *Atmospheric Chemistry and Physics*. 4. 10.5194/acp-4-231-2004.

Hecht E.. (2001). La propagación de la Luz. Óptica. En *Bases físicas de la luz*(86-150). Madrid: Pearson-Addison Wesley. Tercera edición.

Innovations Foresight .. (2015). Why Wavefront Analysis Is Better Than the Star Test for Astronomers. 14-10-2019, de Innovations Foresight Sitio web: <https://www.innovationsforesight.com/education/wavefront-analyzer-star-waves>.

Irene Sendiña Nadal, Vicente Pérez Muñuzuri.. (2006). Fundamentos de meteorología. Enciclopedia. II. España: Universidad de Santiago de Compostela.

Janet Melo Betancourt.. (2014). Propuesta Didáctica encaminada a la descripción de algunos fenómenos de la óptica atmosférica. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Bogotá Colombia.

Jeff W. Atkins... (2006). Beer-Lambert . En *physical*(146-148). university of Oxford: medical Panamericana

Jimenez E.. (2018). prototipo de espectrómetro compacto. *THES*, 1, 65.

José Luis Pérez., Rogelio Murillo y Raúl Gómez .. (2015). Espectroscopia infrarroja y RAM. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, 24p.

José Rodríguez García., José M. Virgós.. (2002). Fundamentos de óptica ondulatoria. España: Universidad de Oviedo.

John M. Brown.. (2007). Molecular Spectroscopy. OXFORD UNIVERSITY PRESS: Zeneca.

Johansson, M.. (2009) Application of Passive DOAS for studies of Megacity Air Pollution and Volcánic Gas Emissions. Departament of Radio and Space Science. CHALMERS University Of Technology. Göteborg, Swden 2009. AVANCEZ.

Johansson, M., Galle, B., Zhang, Y., Rivera, C., Chen, D. & Wyser, K., (2009): The dual-beam mini-DOAS technique: Measurements of volcanic gas emission, plume height and plume speed with a single instrument.- Bul. Volcanol. 71: 747-751.

Joseph W.Kane., Morton, M. Sternheim.. (2007). PHYSICS. Departament of physics and astronomy. University of Massachusetts: REVERTÉ.

Kantzas, E.P., A.J.S. McGonigle, G. Tamburello, A. Aiuppa, R. G. Bryant (2010). Protocols for UV camera volcanic SO<sub>2</sub> measurements, 2010, J. Volcanol. Geotherm. Res. 194, 55–60.

Kern, C., Patada, F., Lübcke, P., Leif Vogel., Wöhrbach, M., Platt, U.. (2010). Theoretical description of functionality, applications, and limitations of SO<sub>2</sub> cameras for the remote sensing of volcanic plumes. Atmospheric Measurement Techniques, 3, 531-578.

Kruger, A., Stremme, W., Haring, R., Grutter, M.. (2013). Volcanic SO<sub>2</sub> and SiF<sub>4</sub> visualization using 2-D thermal emission spectroscopy – Part 2: Wind propagation and emission rates, Atmos. Meas. Tech., 6, 47 – 61. <https://doi.org/10.5194/amt-6-47-2013>, 2013.

Lindenlaub, J. C.. (1976), Remote Sensing: What is it?, Fundamentals of Remote Sensing, Purdue Research Foundation.

Manuel Gutiérrez Claverol. (1993). Compendio de teledetección geológica. Universidad de OVIEDO: OVIEDO-SP; 1993-SP.

Millán, M.M.. (1980). Remote sensing of air pollutants. En a study of some atmospheric scattering effects( 1241–1253). Atmospheric Environment, 14(11): scienceDirect-ELSEVIER.

Mori, T. and Burton, M.. (2006): The SO<sub>2</sub> camera: A simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO<sub>2</sub> in volcanic plumes, Geophys. Res. Lett., 33.

Kern, Christoph., Werner C., Elias T., Sutton, A. J., Lübcke, P.. (2013), 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

Kern, C., Kick, F., Lubcke, P., Vogel, L., Wohrbach, M., and Platt, U.. (2010): Theoretical description of functionality, applications, and limitations of SO<sub>2</sub> cameras for the remote sensing of volcanic plumes, Atmos. Meas. Tech., 3, 733–749.

Kraus, S.. (2006). DOASIS un diseño de marco para DOAS. THES, Technische Informatik, Univ. Mannheim, 1.

Lübcke, P., N. Bobrowski, S., Illing, C., Kern, J.M. Alvarez Nieves., L, Vogel., J, Zielcke., H. Delgado Granados., and U. Platt.. (2013), On the absolute calibration of SO<sub>2</sub> cameras, Atmosph. Meas. Techn., 6, 677–696.

Mahoney Michael Sean.. (1994). The Mathematical Career of Pierre de Fermat,1601-1665. Princeton University Press: History of Science & Knowledge.2nd edition.

Malacara Daniel.. (2015). Óptica Básica. Ediciones científicas universitarias, México: Fondo de cultura económica.

Mihos Pavlos.. (2005). Use of History in Developing ideas of refraction, lenses and rainbow, Demokritus University, Thrace, Greece.

Muhammad Iqbal.. (1983). An Introduction to Solar Radiation. Academic Press. ELSEVIER.408p.

M.Vountas.,V.V.Rozanov.,J.P.Burrows.. (1998). Ring effect: impact of rotational Raman scattering on radiative transfer in earth's atmosphere. Elsevier Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 60, 943-961

Pierre Delmelle and John Stix.. 2000. Volcanic gases. En: Encyclopedia of volcanoes (1, 803-8014) Université´ de Montre´al: McGill university.

Pedro Villamiel González.. (2015). Fundamentos de los telescopios. En Agrupación astronómica de Madrid (1, 201) Grupo del cielo profundo: Agrupación Astronómica de Madrid (aam).

Ramos López Ernesto. (1993). Geología General y de México. México, Capitulo 4. 8ª.edición: Trillas.

Raymond, A., Serway, J., Faughn, S.. (2001). Física 723-725p. Universidad Nacional Autónoma de México: Pearson Educación.

Rossi Bruno.. (2003). Principio de Huygens. Fundamentos de óptica. En Fundamentos de óptica. Un estudio sistemático de los fenómenos de la óptica física, electromagnética y cuántica(7-56). Massachusetts Institute of Technology: REVERTÉ.

Schiavo, B., Stremme, W., Grutter, M., Campion, R., Guarin, C.A., Rivera, C., Inguaggiato, S.. (2019). Characterization of a UV camera system for SO<sub>2</sub> measurements from Popocatepetl Volcano. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Volume 370, 2019. 82-94 p. ISSN; 0377 – 0273. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.09.001>

Schrader, B.. (1995) Espectroscopía infrarroja y Raman ; Schrader, B. ed., VCH Publishers Inc .: Nueva York, 1995; Capítulo 4

Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.. (2019). CNPC, Guardia Nacional y expertos de la UNAM realizan sobrevuelo al Popocatepetl. 23 de diciembre 2019, de Gobierno de México. Categoría: comunicado. Boletín 1044/19 Sitio web: <https://www.gob.mx/sspc/prensa/cnpc-guardia-nacional-y-expertos-de-la-unam-realizan-sobrevuelo-al-popocatepetl>

Siebe, C., Abrams, M., Macías, J.L.. (1995) Derrumbes Gigantes, Depósitos de Avalancha de Escombros y Edad del Actual Cono del Volcán Popocatepetl, en, Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados durante la crisis de 1994-1995, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 26 p.

Stoiber, R.E., Malinconico, L.L. And Williams, S.N.. (1983). Use of the correlation spectrometer at volcanoes.- En: TAZIEFF, H. & SABROUX, J.C. (eds): Forecasting volcanic events. Amsterdam: 425-444:Elsevier.

Suiter Harold Richard.. (2009). "Star Testing Astronomical Telescopes: A Manual for Optical Evaluation and Adjustment". 413 p, 2a edición,: Willmann-Bell, Inc.

Tazieff H. and Sabroux J.C.. (1983) Forecasting volcanic events. Elsevier, Amsterdam, 635. Eds:1983.

Tipler Paul A.. (2006). Óptica Geométrica. En Física Preuniversitaria, Tomo II(766-782). Michigan: REVERTÉ.

U. Platt., D. Perner.. (1983). Measurements of Atmospheric Trace Gases by Long Path Differential UV/Visible Absorption Spectroscopy. En Optical and Laser Remote Sensing(97-105). Springer Series in Optical Sciences : Springer.

U. Platt., D. Perner.. (1994). Differential optical absorption spectroscopy (DOAS). Sigrist, M.W. (ed.) Air Monitoring by Spectroscopic Techniques. Chemical Analysis Series, Vol. 127, 27-84.

Villamiel González Pedro.. ( 2015). Fundamentos de los telescopios. En Agrupación astronómica de Madrid (1, 201) Grupo del cielo profundo: Agrupación Astronómica de Madrid (aam).

Williams-Jones, G., Stix, J. and Nadeau, P.A.. (2008). Using the COSPEC in the Field. En The COSPEC Cookbook: Making SO<sub>2</sub> Measurements at Active Volcanoes.(63-119.): IAVCEI.

ZEMAX-ODZ.. (2012). Getting Started Using ZEMAX. Getting Started with ZEMAX.version 2.1, 74.