

# Métodos de análisis de imágenes aplicados al procesamiento de datos de una cámara SO<sub>2</sub>

Salvador Pedraza Espitia

Facultad de Ciencias  
Universidad Nacional Autónoma de México

Tutor: Dr. Robin Campion

Marzo 2017

## Introducción

Planteamiento del problema  
Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa  
Ley Beer Lambert  
Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades  
Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



## 1. Introducción

### Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## 2. Marco teórico

### Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## 3. Metodología

### Metodología

Diagrama de flujo

## 4. Resultados

### Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## 5. Conclusiones y recomendaciones

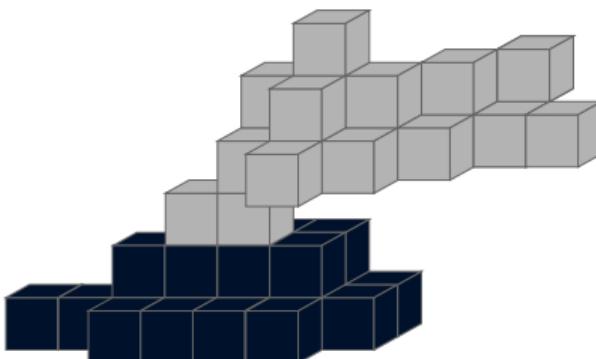
### Conclusiones y recomendaciones

### Apéndice A



# Introducción

- ▶ Los procesos de desgasificación controlan la intensidad de las erupciones.
- ▶ Mediciones remotas permiten estudiar gases volcánicos.
- ▶ Una cámara SO<sub>2</sub> adquiere arreglos bidimensionales con frecuencia de hasta 1 Hz.



S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

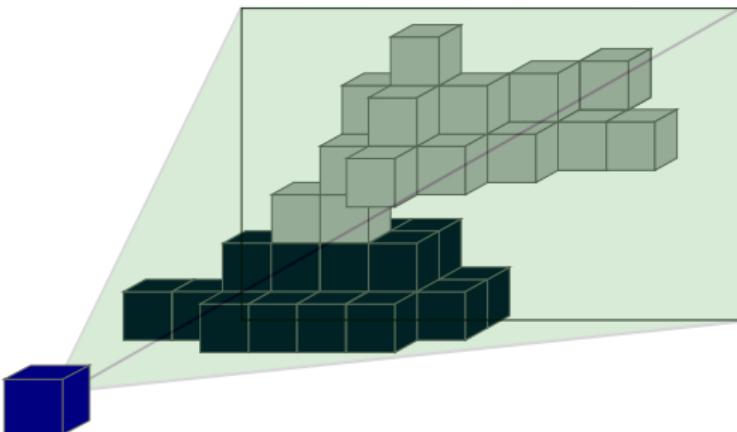
## Apéndice A



# Introducción

S. Pedraza Espitia

- ▶ Los procesos de desgasificación controlan la intensidad de las erupciones.
- ▶ Mediciones remotas permiten estudiar gases volcánicos.
- ▶ Una cámara SO<sub>2</sub> adquiere arreglos bidimensionales con frecuencia de hasta 1 Hz.



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades  
Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

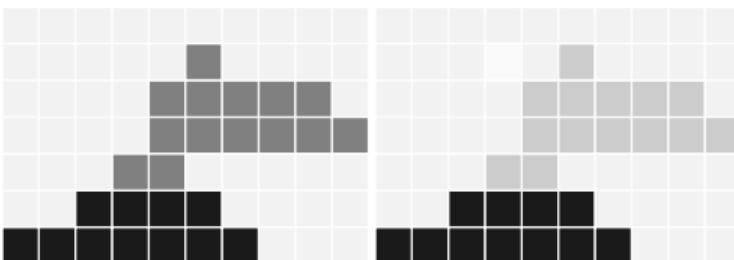
## Apéndice A



# Introducción

S. Pedraza Espitia

- ▶ Los procesos de desgasificación controlan la intensidad de las erupciones.
- ▶ Mediciones remotas permiten estudiar gases volcánicos.
- ▶ Una cámara SO<sub>2</sub> adquiere arreglos bidimensionales con frecuencia de hasta 1 Hz.



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Planteamiento del problema

S. Pedraza Espitia

► El procesamiento de imágenes para obtener concentraciones de SO<sub>2</sub>

1. depende de la selección manual de regiones de pixeles.



► El cálculo del flujo de masa de SO<sub>2</sub>

1. depende de las velocidades,
2. las velocidades son heterogéneas.

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



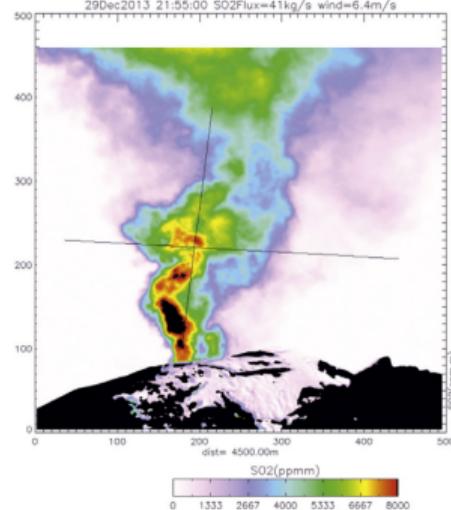
# Planteamiento del problema

S. Pedraza Espitia

- ▶ El procesamiento de imágenes para obtener concentraciones de  $\text{SO}_2$ 
  1. depende de la selección manual de regiones de pixeles.



- ▶ El cálculo del flujo de masa de  $\text{SO}_2$ 
  1. depende de las velocidades,
  2. las velocidades son heterogéneas.



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición cámara  $\text{SO}_2$

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de  $\text{SO}_2$

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

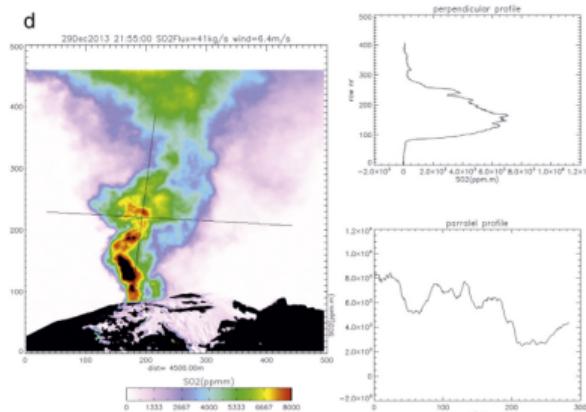


# Planteamiento del problema

- ▶ El procesamiento de imágenes para obtener concentraciones de  $\text{SO}_2$ 
  1. depende de la selección manual de regiones de pixeles.



- ▶ El cálculo del flujo de masa de  $\text{SO}_2$ 
  1. depende de las velocidades,
  2. las velocidades son heterogéneas.



S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición cámara  $\text{SO}_2$

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de  $\text{SO}_2$

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Hipótesis

S. Pedraza Espitia

- ▶ Las imágenes de la cámara SO<sub>2</sub> pueden usarse para extraer información que permite automatizar los algoritmos de procesamiento.

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



## ► Programar en lenguaje PYTHON:

1. correcciones de efectos causados por hardware
2. detección automática de regiones del cielo y pluma
3. correcciones de efectos de dilución de la radiación en la atmósfera.
4. el cálculo de concentraciones de SO<sub>2</sub>
5. el cálculo de campos de velocidades y flujo de masa de SO<sub>2</sub>

### Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

### Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

### Metodología

Diagrama de flujo

### Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

### Conclusiones y recomendaciones

### Apéndice A



► Programar en lenguaje PYTHON:

1. correcciones de efectos causados por hardware
2. detección automática de regiones del cielo y pluma
3. correcciones de efectos de dilución de la radiación en la atmósfera.
4. el cálculo de concentraciones de SO<sub>2</sub>
5. el cálculo de campos de velocidades y flujo de masa de SO<sub>2</sub>

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



► Programar en lenguaje PYTHON:

1. correcciones de efectos causados por hardware
2. detección automática de regiones del cielo y pluma
3. correcciones de efectos de dilución de la radiación en la atmósfera.
4. el cálculo de concentraciones de SO<sub>2</sub>
5. el cálculo de campos de velocidades y flujo de masa de SO<sub>2</sub>

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



► Programar en lenguaje PYTHON:

1. correcciones de efectos causados por hardware
2. detección automática de regiones del cielo y pluma
3. correcciones de efectos de dilución de la radiación en la atmósfera.
4. el cálculo de concentraciones de SO<sub>2</sub>
5. el cálculo de campos de velocidades y flujo de masa de SO<sub>2</sub>

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



► Programar en lenguaje PYTHON:

1. correcciones de efectos causados por hardware
2. detección automática de regiones del cielo y pluma
3. correcciones de efectos de dilución de la radiación en la atmósfera.
4. el cálculo de concentraciones de SO<sub>2</sub>
5. el cálculo de campos de velocidades y flujo de masa de SO<sub>2</sub>

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



► Programar en lenguaje PYTHON:

1. correcciones de efectos causados por hardware
2. detección automática de regiones del cielo y pluma
3. correcciones de efectos de dilución de la radiación en la atmósfera.
4. el cálculo de concentraciones de SO<sub>2</sub>
5. el cálculo de campos de velocidades y flujo de masa de SO<sub>2</sub>

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



► Programar en lenguaje PYTHON:

1. correcciones de efectos causados por hardware
2. detección automática de regiones del cielo y pluma
3. correcciones de efectos de dilución de la radiación en la atmósfera.
4. el cálculo de concentraciones de SO<sub>2</sub>
5. el cálculo de campos de velocidades y flujo de masa de SO<sub>2</sub>

Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

Metodología

Diagrama de flujo

Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

Conclusiones y  
recomendaciones

Apéndice A



# Transferencia de radiación electromagnética en la atmósfera

S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

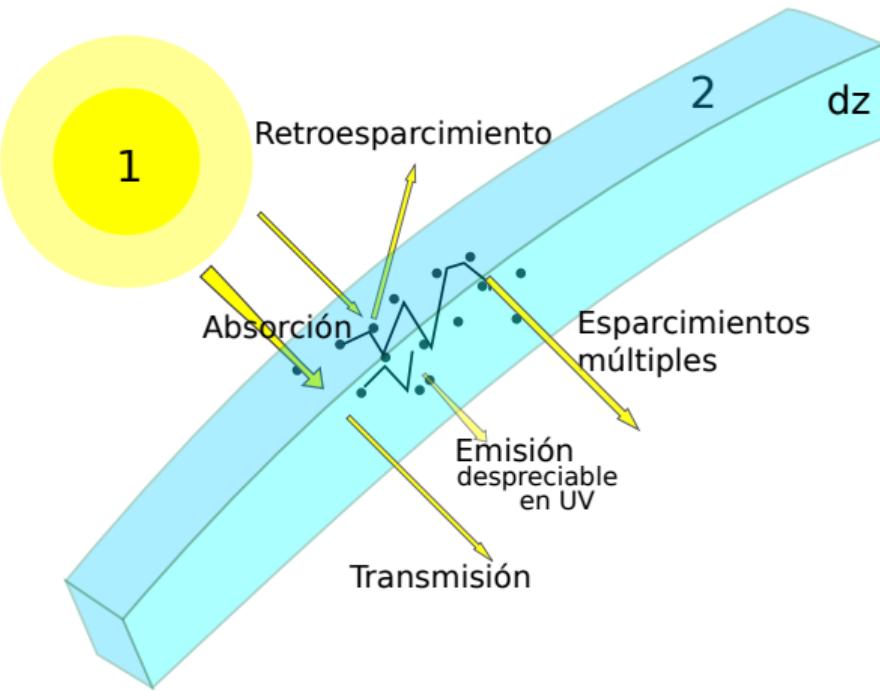
Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

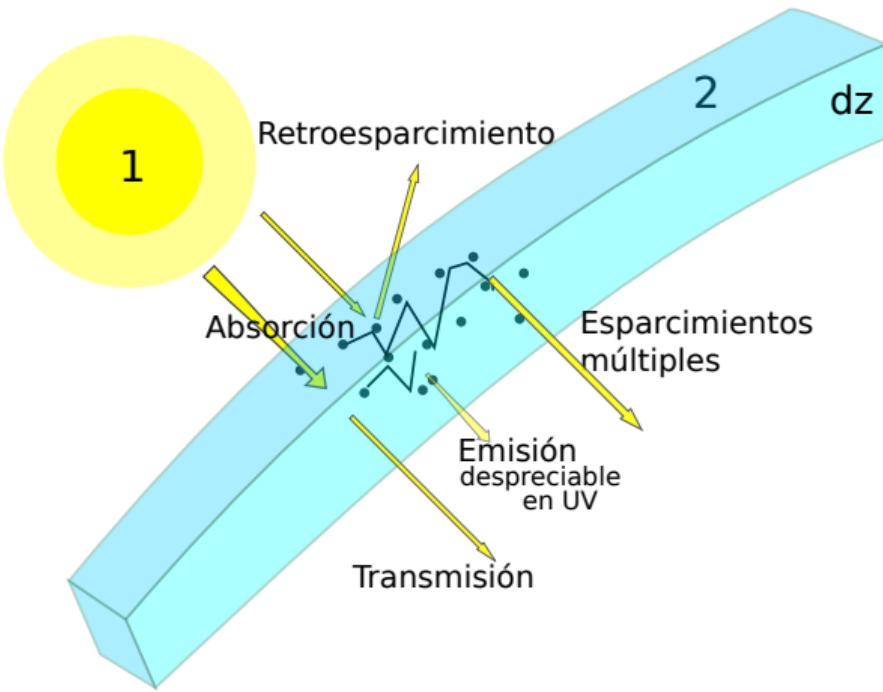
- ▶ absorción  $\alpha$ ,
- ▶ esparcimiento  $\sigma$
- ▶ emisión



# Transferencia de radiación electromagnética en la atmósfera

S. Pedraza Espitia

- ▶ absorción  $\alpha$ ,
- ▶ esparcimiento  $\sigma$
- ▶ emisión



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

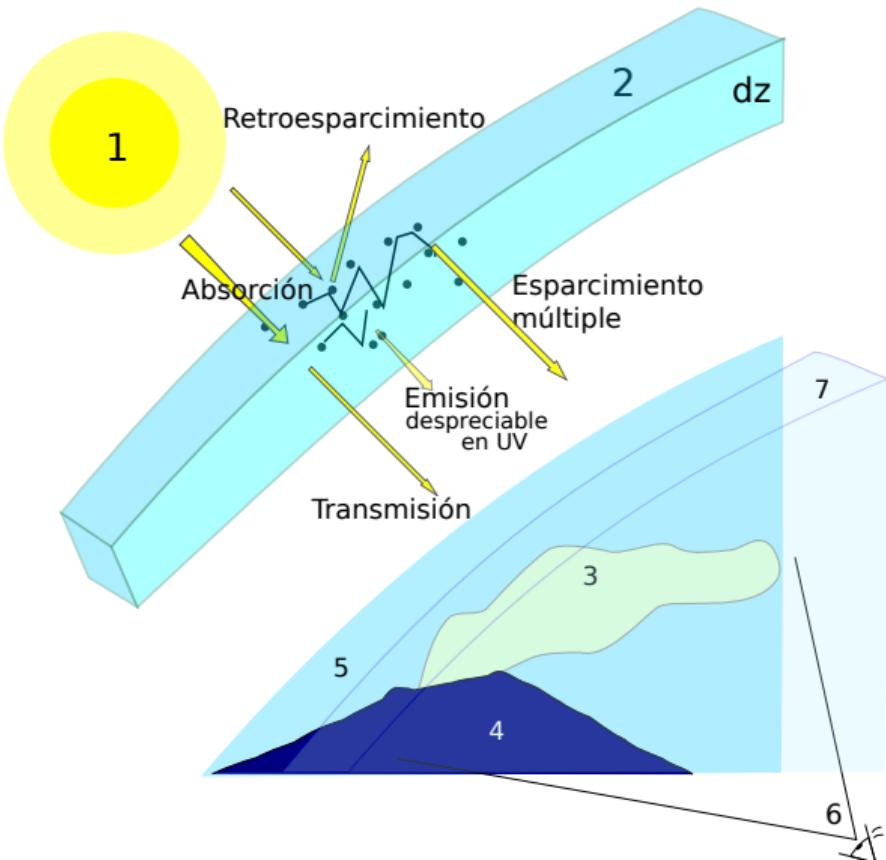
## Apéndice A



# Transferencia de radiación electromagnética en la atmósfera

S. Pedraza Espitia

- ▶ absorción  $\alpha$ ,
- ▶ esparcimiento  $\sigma$
- ▶ emisión



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Ecuación de la transferencia radiativa

S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

$$\frac{dI_\lambda}{Nk_\lambda ds} = -I_\lambda + J_\lambda \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_\lambda}{ds} &= -I_0 \left( \sum_i k_{\alpha,i} N_i + \beta_\alpha \right) \\ &\quad + (1 - \omega_\lambda) B_\lambda(T) \left( \sum_i k_{\alpha,i} N_i + \beta_\alpha \right) \\ &\quad + \left( \sum_i k_{\sigma,i} N_i + \beta_\sigma \right) \frac{\omega_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{\Omega}') P_\lambda(\hat{\Omega}, \hat{\Omega}') d\Omega' \end{aligned} \quad (2)$$



# Ecuación de la transferencia radiativa

S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

$$\frac{dI_\lambda}{Nk_\lambda ds} = -I_\lambda + J_\lambda \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_\lambda}{ds} &= -I_0 \left( \sum_i k_{\alpha,i} N_i + \beta_\alpha \right) \\ &\quad + \left( \sum_i k_{\sigma,i} N_i + \beta_\sigma \right) \frac{\omega_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{\Omega}') P_\lambda(\hat{\Omega}, \hat{\Omega}') d\Omega' \end{aligned} \quad (4)$$



# Extinción

S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

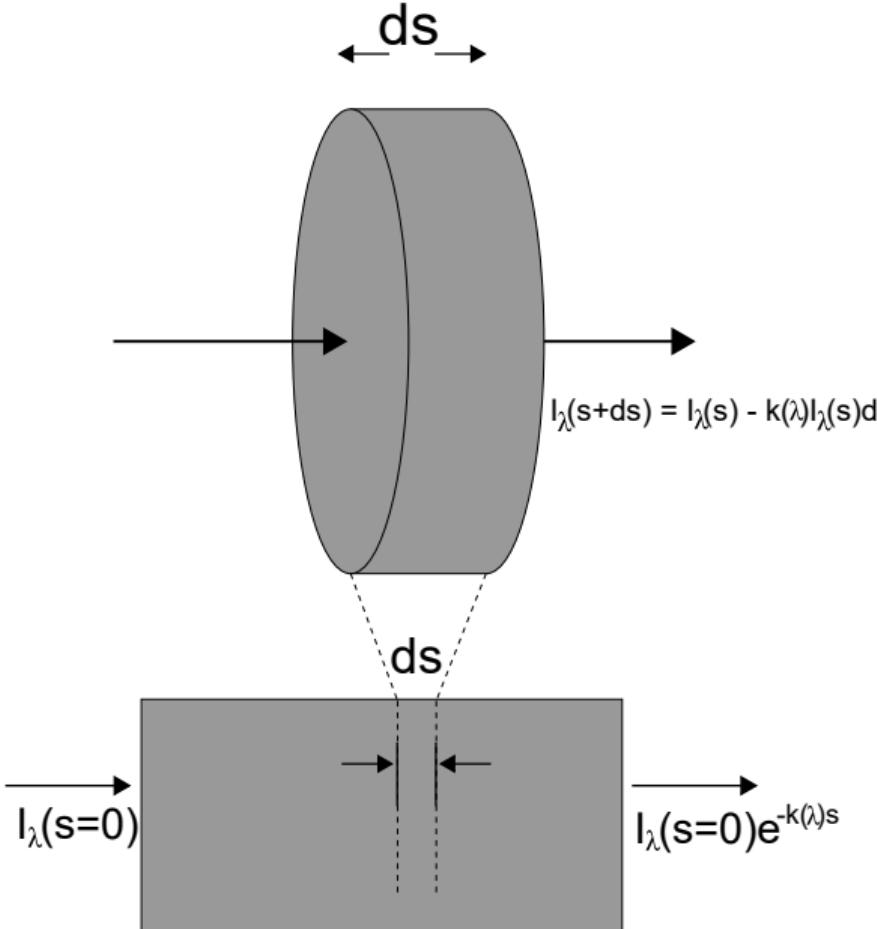
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

$$\blacktriangleright dI_\lambda \propto -I_\lambda ds$$

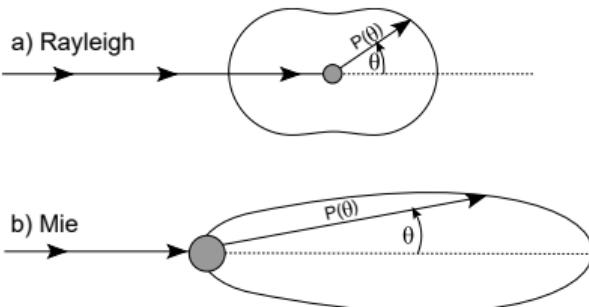
$\blacktriangleright$  Ley de Beer Lambert  
Bouguer

$$I_\lambda(s, \hat{\Omega}) = I_\lambda(0, \hat{\Omega}) e^{-\int_0^s ds' N k(\lambda)}$$



## ► Rayleigh

$$I = I_0 \frac{9\pi^2}{2} \left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) \frac{nV^2}{\lambda^4 r^2} \quad (5)$$



## ► Mie

### Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

### Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

### Metodología

Diagrama de flujo

### Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

### Conclusiones y recomendaciones

### Apéndice A



# Química atmosférica y gases volcánicos

S. Pedraza Espitia

Tabla: Principales gases que componen una atmósfera seca, libre de contaminantes. Platt y Stutz (2008)

Gas	Formula química	Proporción por Vol [%]
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	78.08
Oxígeno	O <sub>2</sub>	20.95
Argón	Ar	0.93
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.037
Neón	Ne	0.0018
Helio	He	0.00052
Metano	CH <sub>4</sub>	0.00017
Kriptón	Kr	0.00011
Xenón	Xe	0.00009
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0.00005
Dinitrógeno óxido	N <sub>2</sub> O	0.00003

Tabla: Principales gases característicos del gas magmático a su salida por el cráter. Textor et al. (2004)

Componente	Fórmula química	%/vol
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	50-90
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1-40
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	1-25
Ácido sulfídrico	H <sub>2</sub> S	1-10

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

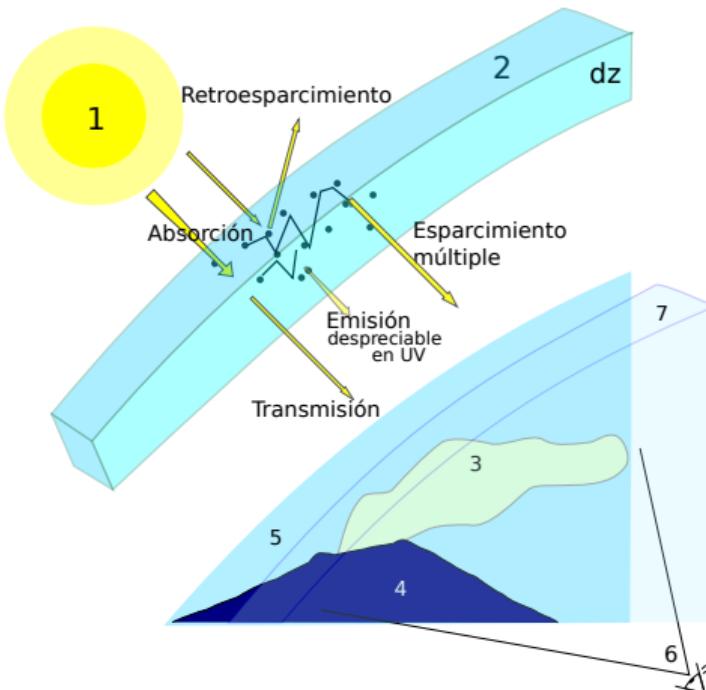
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



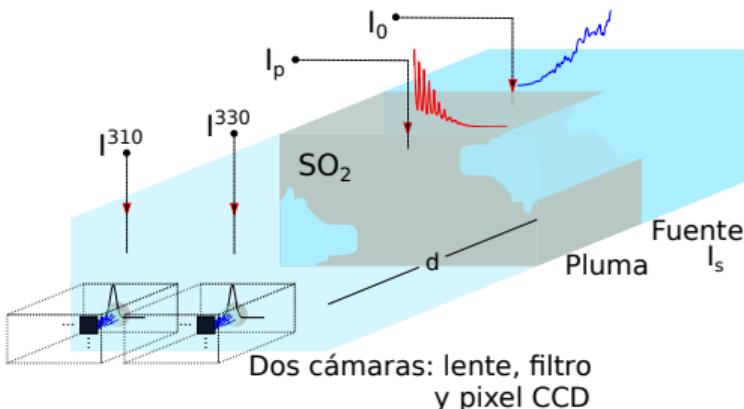
# Principio de medición de la cámara SO<sub>2</sub>

- ▶ La fuente de radiación es la radiación difusa en la atmósfera.
- ▶ Con frecuencias de hasta 1 Hz, se obtiene un par de imágenes simultáneas, una donde la absorción por moléculas de SO<sub>2</sub> es fuerte y la otra donde no.



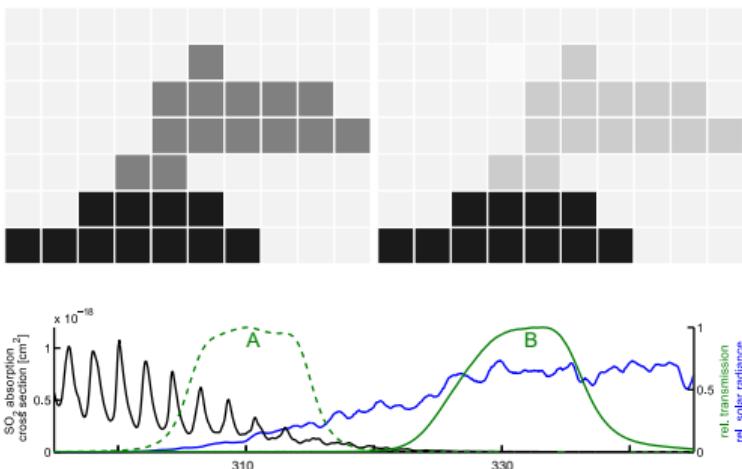
# Principio de medición de la cámara SO<sub>2</sub>

- ▶ La fuente de radiación es la radiación difusa en la atmósfera.
- ▶ Con frecuencias de hasta 1 Hz, se obtiene un par de imágenes simultáneas, una donde la absorción por moléculas de SO<sub>2</sub> es fuerte y la otra donde no.



# Principio de medición de la cámara SO<sub>2</sub>

- ▶ La fuente de radiación es la radiación difusa en la atmósfera.
- ▶ Con frecuencias de hasta 1 Hz, se obtiene un par de imágenes simultáneas, una donde la absorción por moléculas de SO<sub>2</sub> es fuerte y la otra donde no.



Adaptada de Kuhn *et al.* (2014)



# Principio de medición

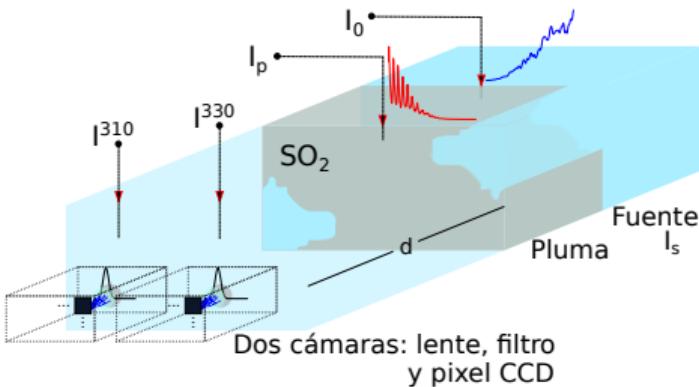
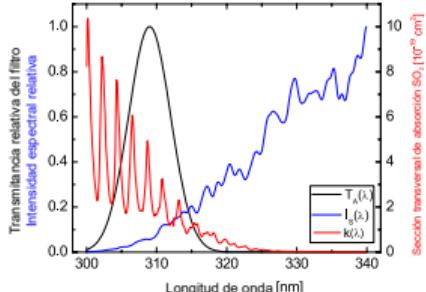
Radiación solar difusa libre de pluma  $I_0(\lambda) = I_S(\lambda)$

Beer Lambert Bouguer  $I_p(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-k_\alpha(\lambda) \cdot S(\lambda)}$

Densidad de columna SO<sub>2</sub>  $S(\lambda) = \int_L N(x)dx$

Densidad óptica

$$\tau(\lambda) = -\ln \left( \frac{I_p(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right) = k_\alpha(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (6)$$



# Principio de medición de la cámara SO<sub>2</sub>

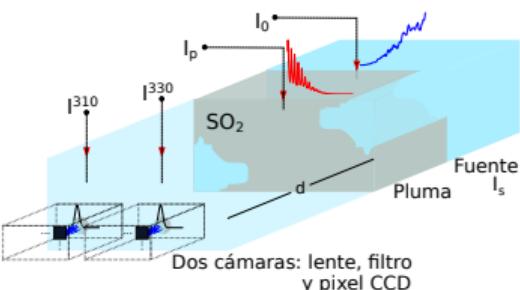
S. Pedraza Espitia

Radiación solar difusa, libre de pluma, medida por la cámara

$$I_0^{310} = \int_{\lambda} I_S(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Radiación solar difusa que atraviesa la pluma, medida por la cámara

$$I_p^{310} = \int_{\lambda} I_S(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot Q(\lambda) \cdot e^{-k_{\alpha}(\lambda) \cdot S(\lambda)} d\lambda \quad (8)$$



Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

Metodología

Diagrama de flujo

Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

Conclusiones y  
recomendaciones

Apéndice A



# Principio de medición

S. Pedraza Espitia

No hay información espectral

$$\Rightarrow \hat{\tau} = -\ln \left( \frac{I_p(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right) \quad (9)$$

$$\hat{\tau} = -\ln \left( \frac{I_0 \cdot \exp(-k_\alpha \cdot S)}{I_0} \right) = k_\alpha \cdot S \quad (10)$$

$$\Rightarrow \tau \approx k_\alpha \cdot S \quad (11)$$

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Principio de medición

S. Pedraza Espitia

No hay información espectral

$$\Rightarrow \hat{\tau} = -\ln \left( \frac{I_p(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right) \quad (9)$$

$$\hat{\tau} = -\ln \left( \frac{I_0 \cdot \exp(-k_\alpha \cdot S)}{I_0} \right) = k_\alpha \cdot S \quad (10)$$

$$\Rightarrow \tau \approx k_\alpha \cdot S \quad (11)$$

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

Conclusiones y  
recomendaciones

Apéndice A



$$\hat{\tau}^{310} = -\ln \left( \frac{I_p^{310}}{I_0^{310}} \right); \quad \hat{\tau}^{330} = -\ln \left( \frac{I_p^{330}}{I_0^{330}} \right)$$

## Absorbancia Aparente

$$AA = \ln \left( \frac{I_0^{310}}{I_p^{310}} \Big/ \frac{I_0^{330}}{I_p^{330}} \right) = \hat{\tau}^{310} - \hat{\tau}^{330} \quad (12)$$

### Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

### Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

### Metodología

Diagrama de flujo

### Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

### Conclusiones y recomendaciones

### Apéndice A



## Absorbancia Aparente

$$AA = \ln \left( \frac{I_p^{330}}{I_p^{310}} \right) - \ln \left( \frac{I_0^{330}}{I_0^{310}} \right) \quad (13)$$

Para un arreglo 2D  $\Rightarrow \mathbf{I} = (I_{ij})$

$$\mathbf{AA} = \ln \left( \frac{\mathbf{I}_p^{330}}{\mathbf{I}_p^{310}} \right) - \ln \mathbf{B} \quad (14)$$

### Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

### Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

### Metodología

Diagrama de flujo

### Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

### Conclusiones y recomendaciones

### Apéndice A





## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Características de las imágenes de la cámara

S. Pedraza Espitia

- ▶ 512×512 pixeles con valores de 0 a  $2^{16} - 1$

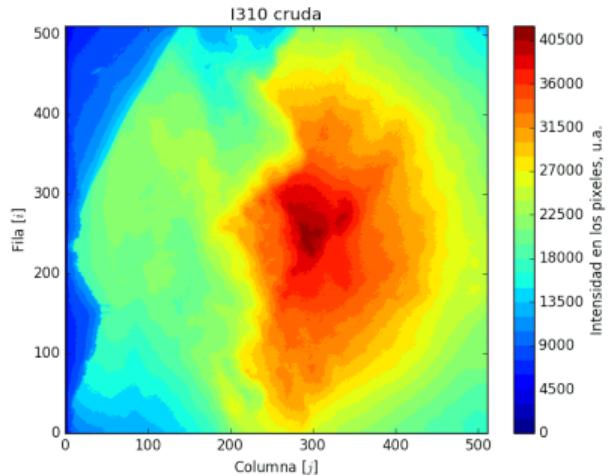


Imagen I310 cruda.

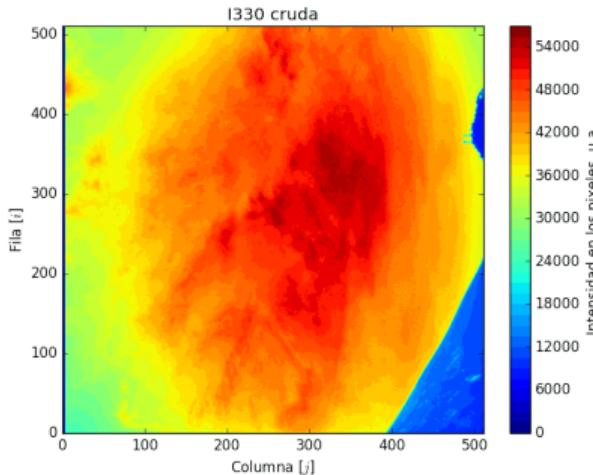


Imagen I330 cruda.

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades  
Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

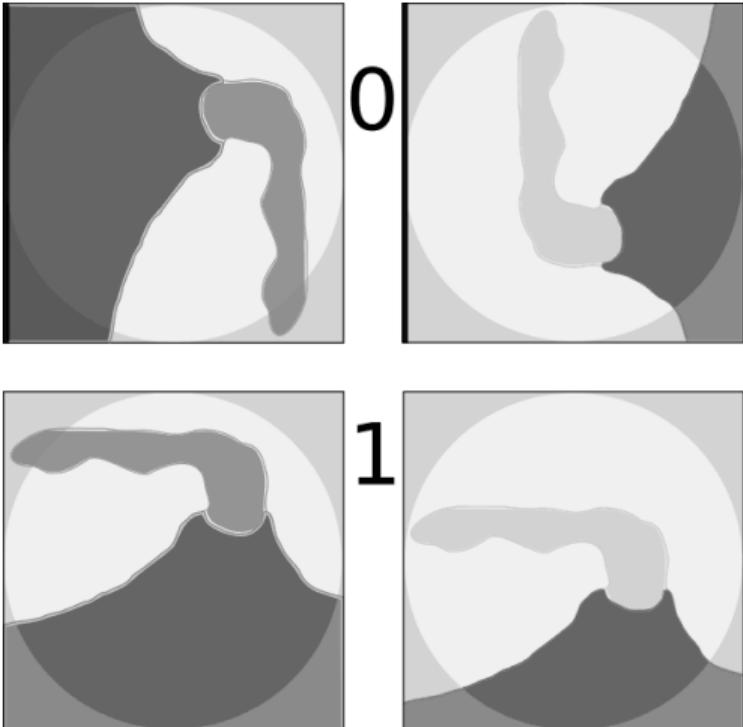
## Apéndice A



# Preparación de imágenes

S. Pedraza Espitia

- ▶ Eliminar columnas de pixeles defectuosos y bias.
- ▶ Orientar las imágenes en el mismo sentido.
- ▶ Vignetting.
- ▶ Desplazamiento por desalineación de cámaras.



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

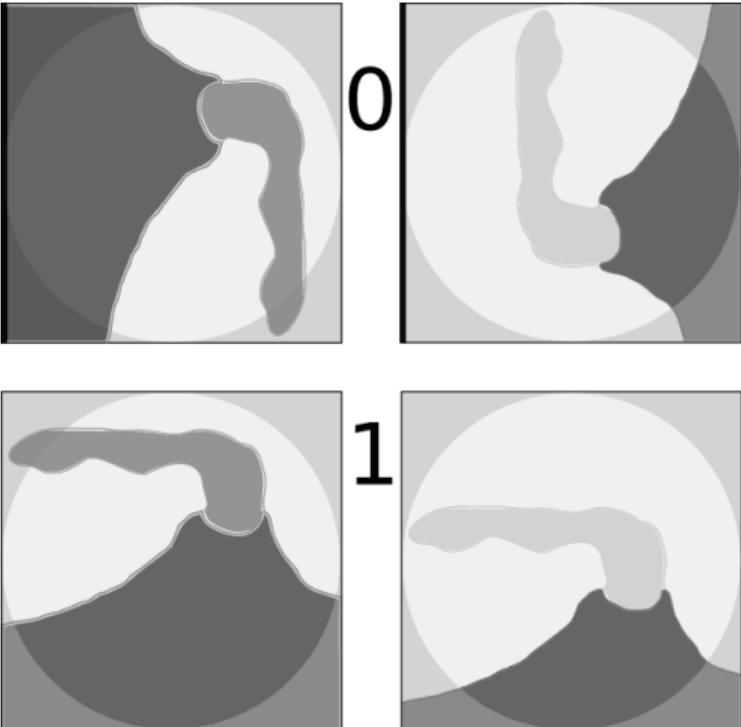
## Apéndice A



# Preparación de imágenes

S. Pedraza Espitia

- ▶ Eliminar columnas de pixeles defectuosos y bias.
- ▶ Orientar las imágenes en el mismo sentido.
- ▶ Vignetting.
- ▶ Desplazamiento por desalineación de cámaras.



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

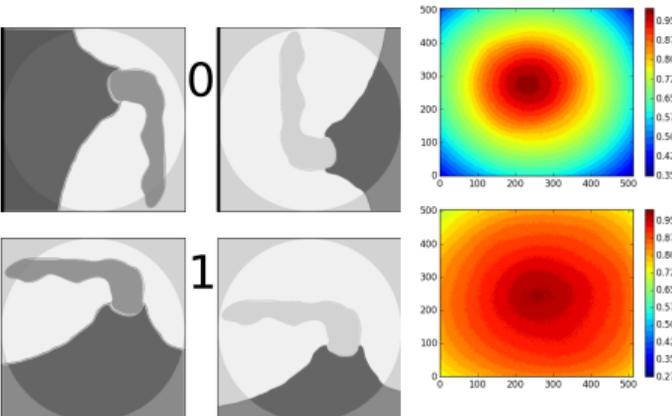
## Apéndice A



# Preparación de imágenes

- ▶ Eliminar columnas de píxeles defectuosos y bias.
- ▶ Orientar las imágenes en el mismo sentido.
- ▶ **Vignetting.**
- ▶ Desplazamiento por desalineación de cámaras.

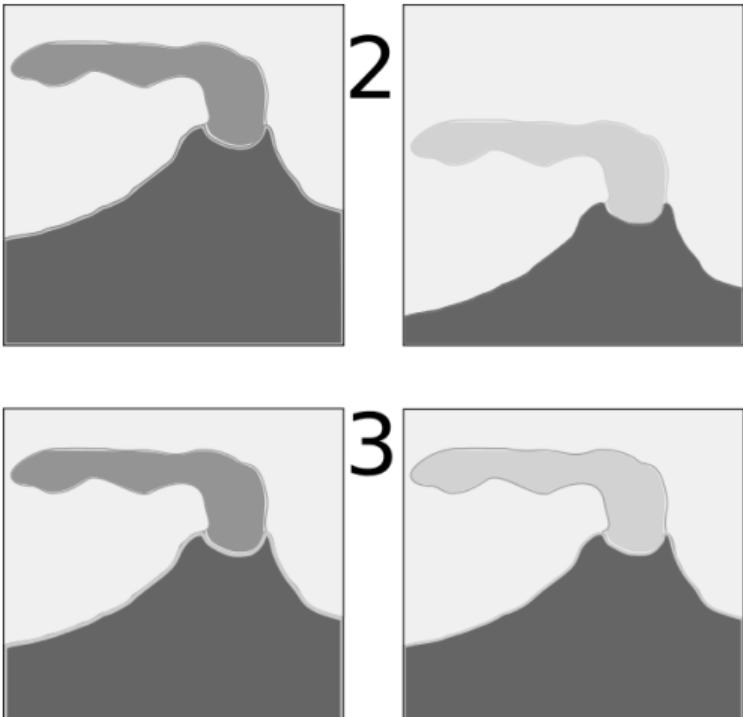
$$M = \frac{M_{vignett} \cdot \max(M_{avg})}{M_{avg}} = \frac{M_{vignett}}{\hat{M}_{avg}}$$



# Preparación de imágenes

S. Pedraza Espitia

- ▶ Eliminar columnas de pixeles defectuosos y bias.
- ▶ Orientar las imágenes en el mismo sentido.
- ▶ Vignetting.
- ▶ Desplazamiento por desalineación de cámaras.



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

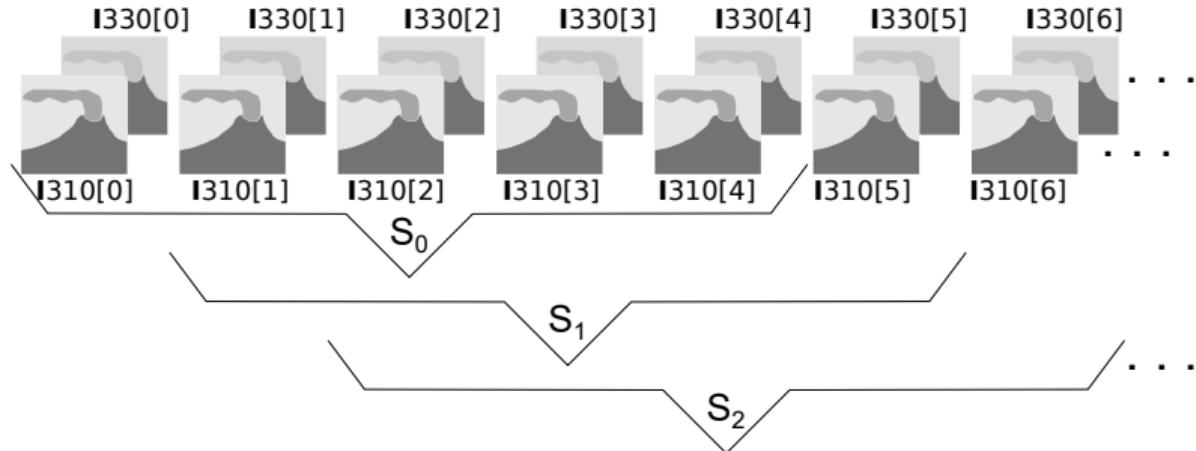
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Secuencias

S. Pedraza Espitia



- ▶  $I^{310} = \{I^{310}[k] | k = 0, 1, 2, 3, 4\}$
- ▶  $I^{330} = \{I^{330}[k] | k = 0, 1, 2, 3, 4\}$

$$\mathbf{A} = \left\{ \mathbf{A}[k] = \log_{10} \frac{\mathbf{I}^{330}[k]}{\mathbf{I}^{310}[k]} \mid k=0,1,2,3,4 \right\} \quad (15)$$

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

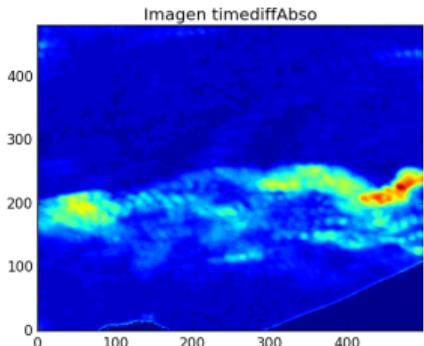


# Imágenes artificiales

S. Pedraza Espitia

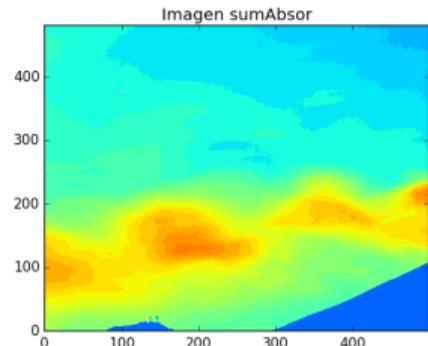
Detección de movimiento

$$\sum_{i=0}^3 |\mathbf{A}[i] - \mathbf{A}[i + 1]|$$



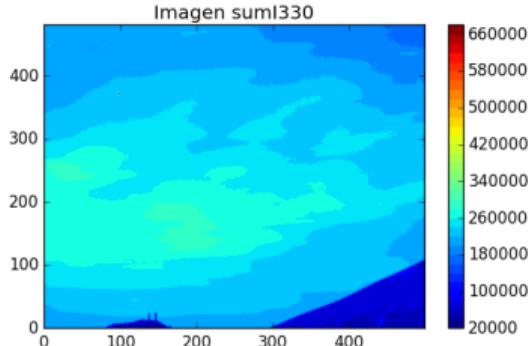
Remarca absorbancia

$$\sum_{i=0}^4 \mathbf{A}[i]$$



Cielo y volcán diferenciables

$$\sum_{i=0}^4 \mathbf{I}^{330}[i]$$



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

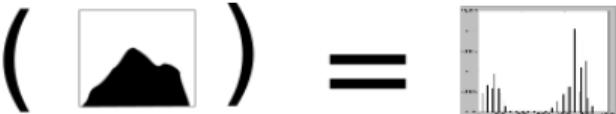
## Apéndice A



# Región de cielo recuperado

S. Pedraza Espitia

Histograma



Histograma



Histograma



1 1 1	0 0 0	0 0 0	1*0*0 1*0*0 1*0*0	0 0 0
1 0 0	1 1 1	1 1 1	1*1*1 0*1*1 0*1*1	1 0 0
0 0 0	1 1 1	1 1 1	0*1*1 0*1*1 0*1*1	0 0 0



sumaimgs330 \* sumaAbso \* timedifAbso

=

regionCielo

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

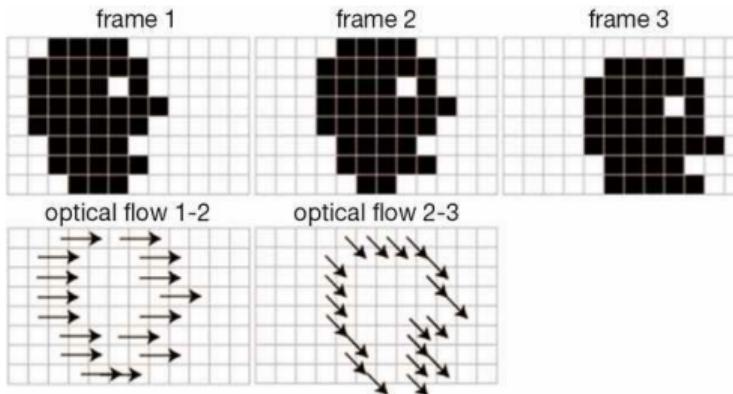


# Flujo óptico

S. Pedraza Espitia

- Dado un conjunto de puntos en una imagen, encuentra esos mismos puntos en otra imagen.

$$I_1(x, y) - I_2(x + \delta_x, y + \delta_y) \quad (16)$$



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

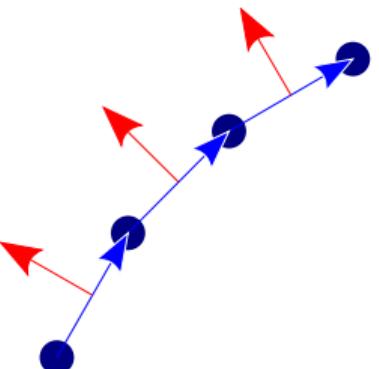


# Flujo de Masa SO<sub>2</sub>

S. Pedraza Espitia

$$\mathbf{AA} = \ln \left( \frac{\mathbf{I}_p^{330}}{\mathbf{I}_p^{310}} \right) - \ln \mathbf{B}$$

$$\int_{\Gamma} \vec{\mu} \cdot \vec{n} d\Gamma = \int \int_W \nabla \vec{\mu} dV \quad (17)$$



```
perp_vel = numpy.dot(velocities, int_norms.T)
fluxes = pix_vals * perp_vel * length_of_segments
```

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

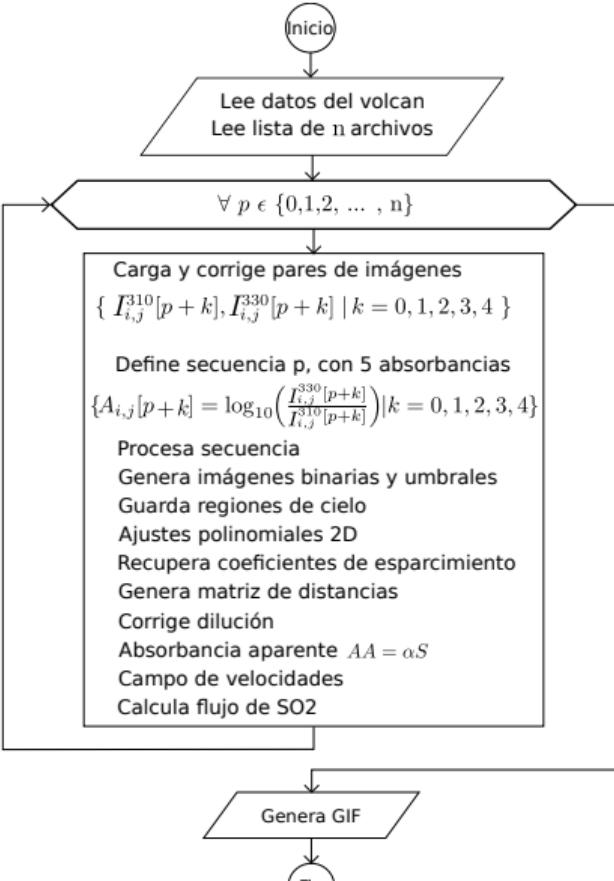
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Diagrama de flujo general

S. Pedraza Espitia



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

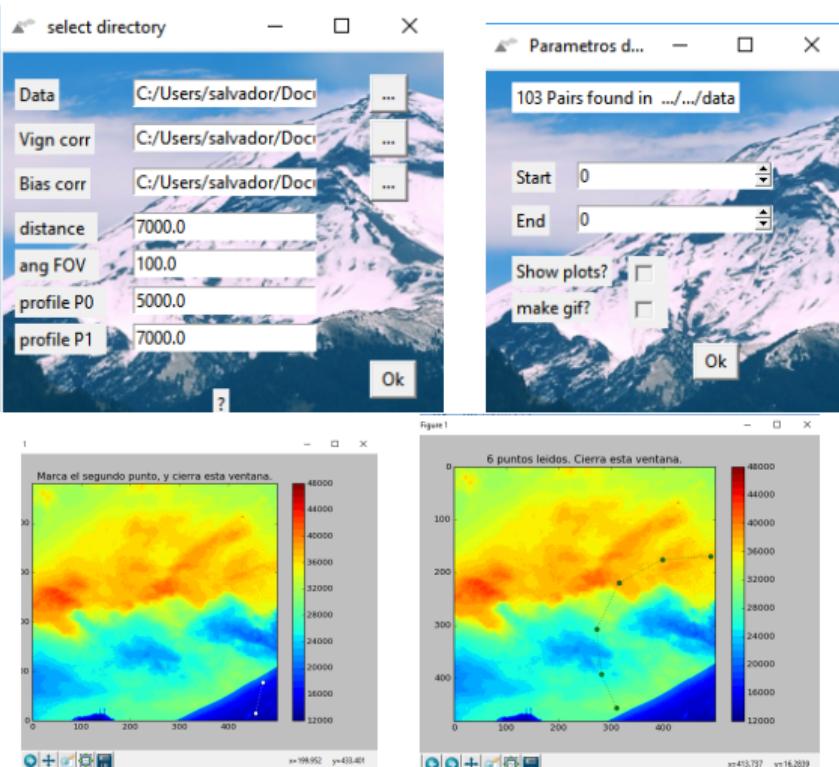
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Resultados (interfaz del programa)

S. Pedraza Espitia



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Imágenes preparadas

S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

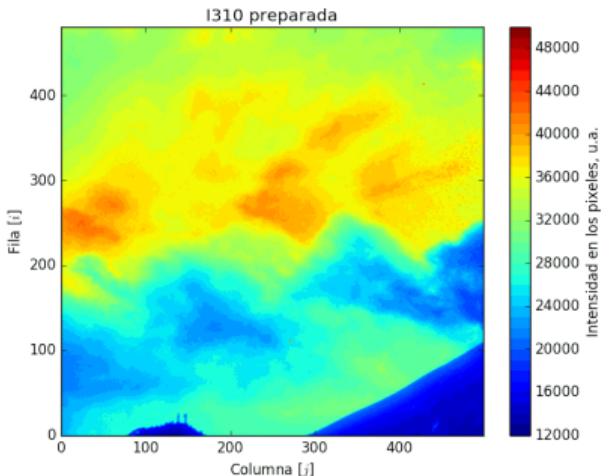


Imagen I310 Preparada.

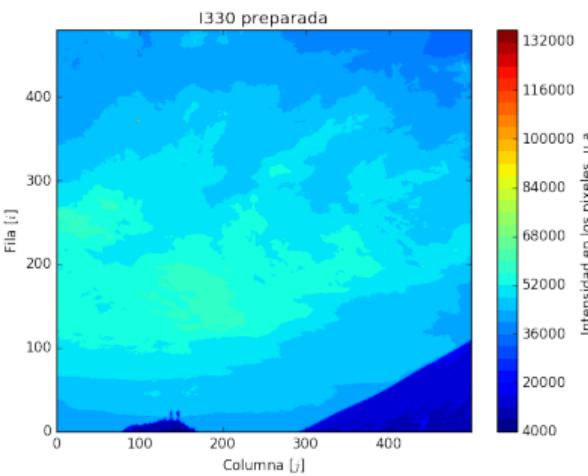
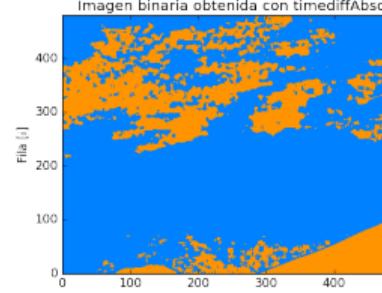
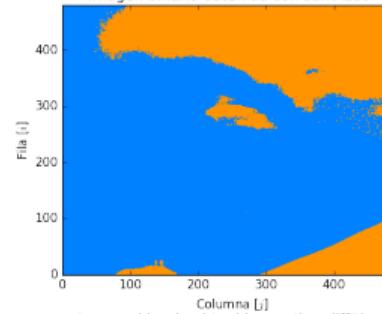
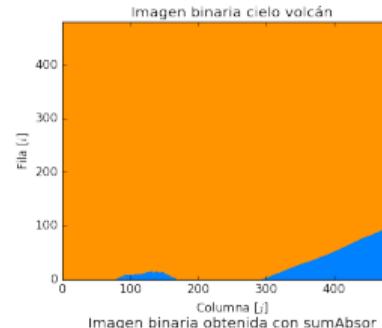
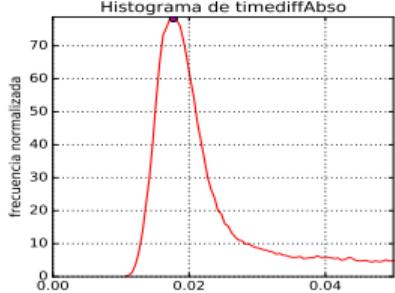
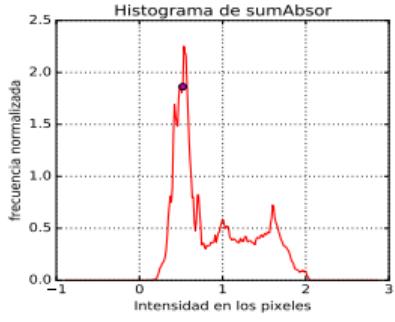
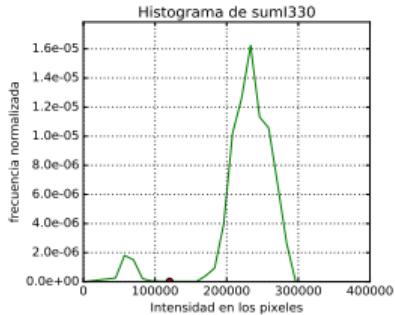
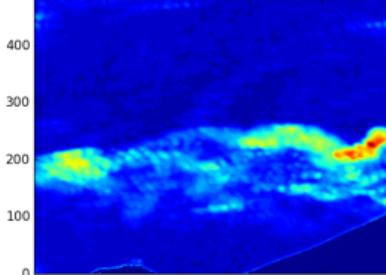
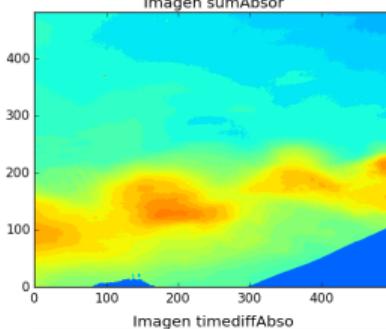
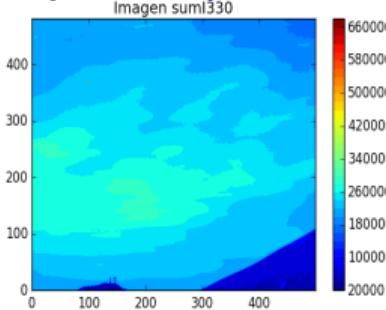


Imagen I330 Preparada.



# Popocatépetl



S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

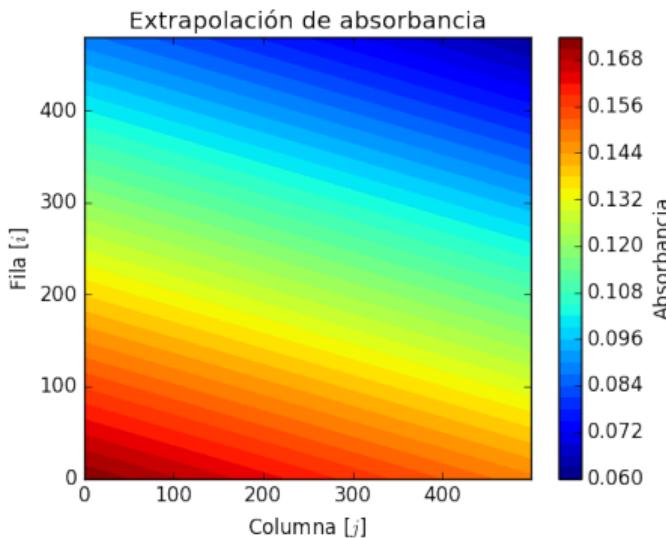
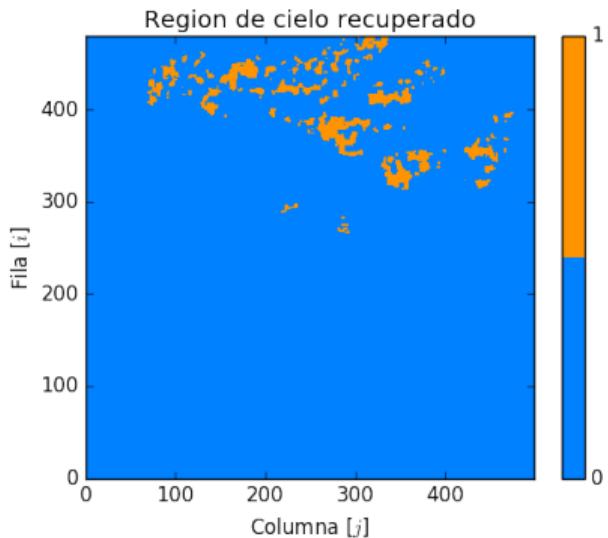
## Apéndice A



# Región de cielo recuperado

S. Pedraza Espitia

$$\mathbf{AA} = \ln \left( \frac{\mathbf{I}_p^{330}}{\mathbf{I}_p^{310}} \right) - \ln \mathbf{B}$$



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

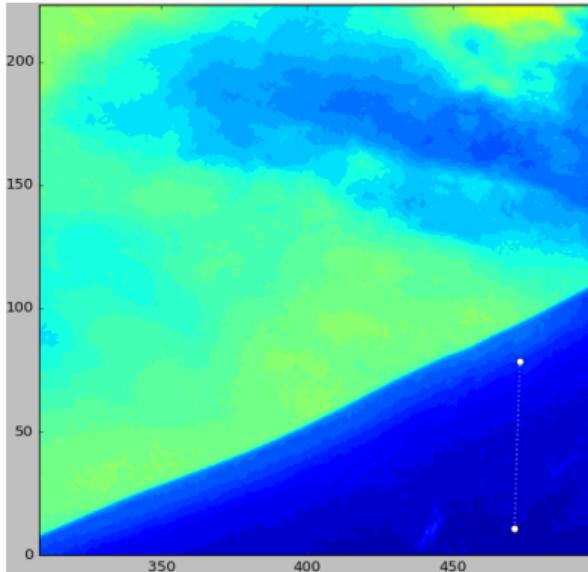
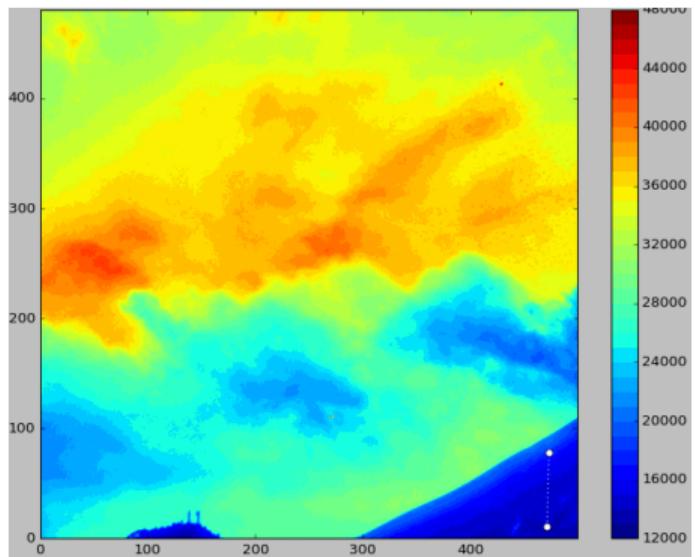
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Perfil para calcular dilución

S. Pedraza Espitia



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

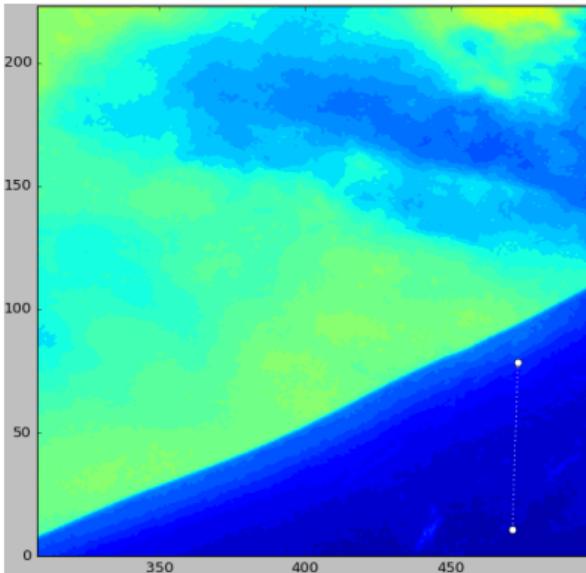
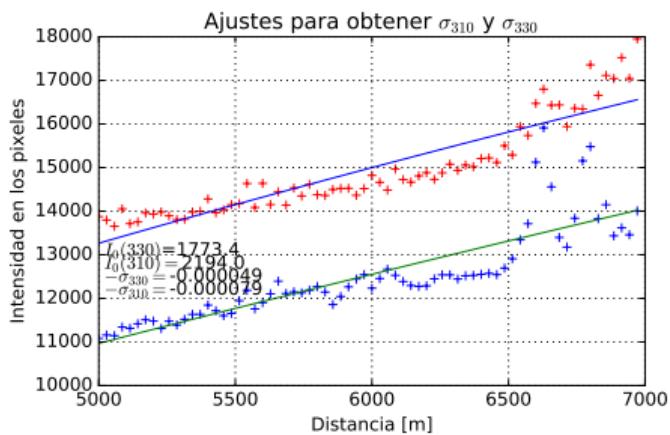
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Perfil para calcular dilución

S. Pedraza Espitia



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

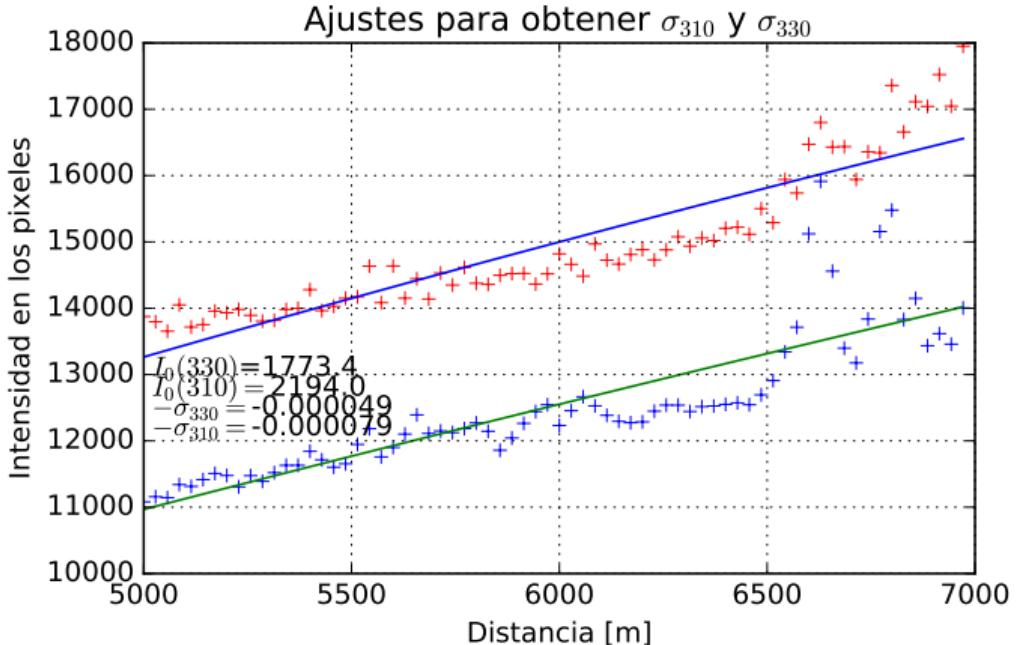
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Ajustes dilución

S. Pedraza Espitia



$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \left( e^{-\sigma(\lambda)d} \right) + I_A(\lambda) \left( 1 - e^{-\sigma(\lambda)d} \right) \quad (18)$$

$$I_{\text{corr}_{i,j}} = \frac{I_{\text{uncorr}_{i,j}} - I_{A_{i,j}} (1 - e^{-\sigma d_{i,j}})}{e^{-\sigma d_{i,j}}} \quad (19)$$

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Imagenes sin dilución

S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

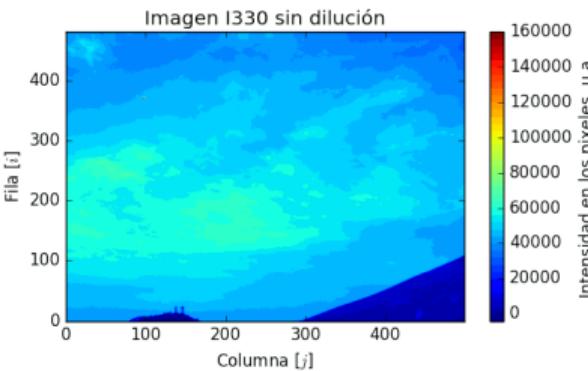
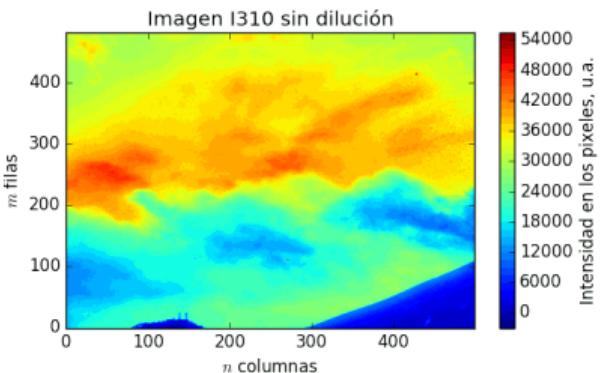
## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Absorbancia aparente

S. Pedraza Espitia

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

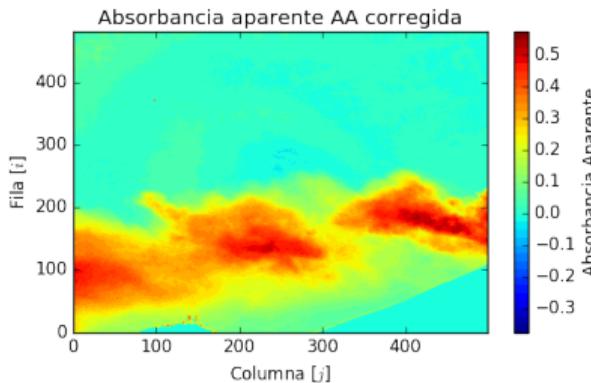
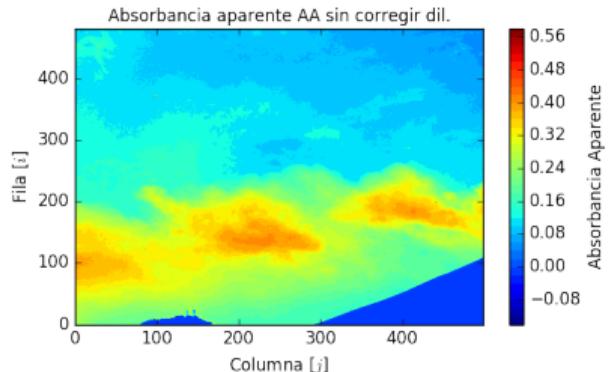
## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

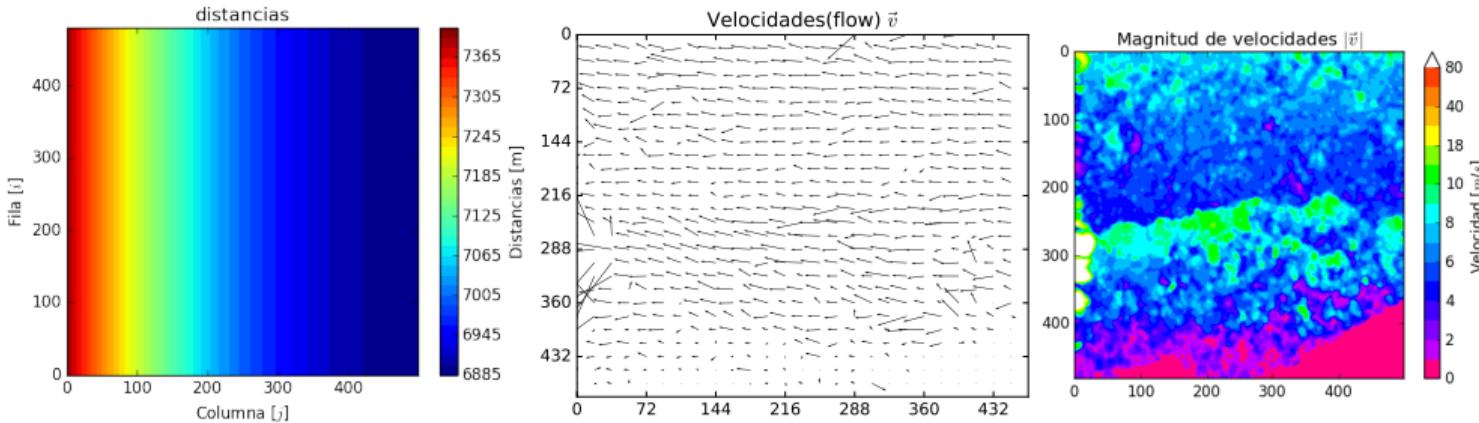
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Campo de velocidades

S. Pedraza Espitia



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

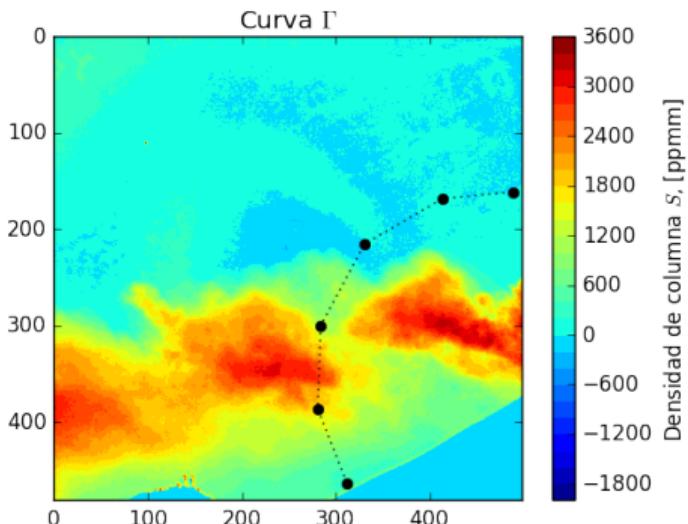
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Flujo de SO<sub>2</sub> en Popocatépetl

S. Pedraza Espitia



## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

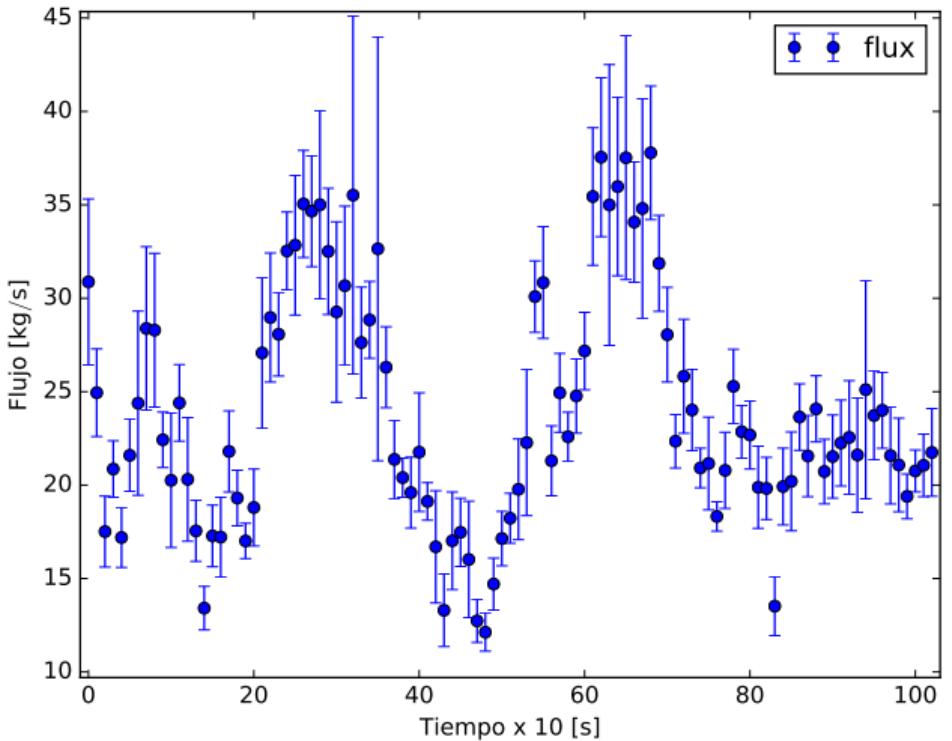
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Flujo de SO<sub>2</sub> en Popocatépetl

S. Pedraza Espitia



$t = 0 \Rightarrow 31/01/2013$  10 A.M. Hora local.

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades  
Flujo de SO<sub>2</sub>

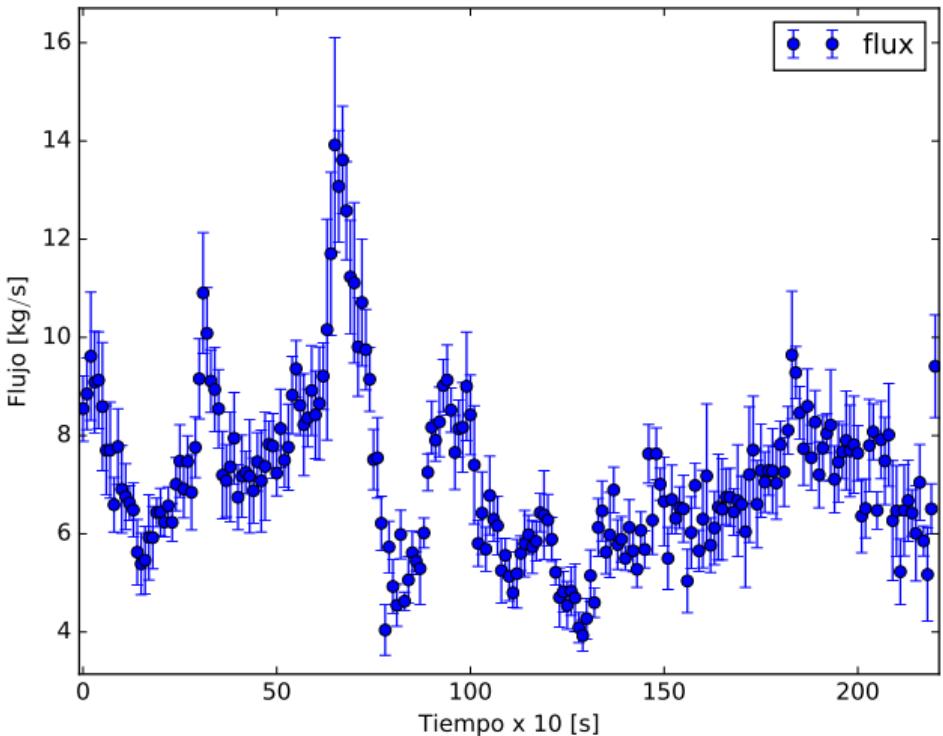
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Flujo de SO<sub>2</sub> en Ubinas

S. Pedraza Espitia



$t = 0 \Rightarrow 08/07/2015 19 : 25 : 10$  GMT.

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

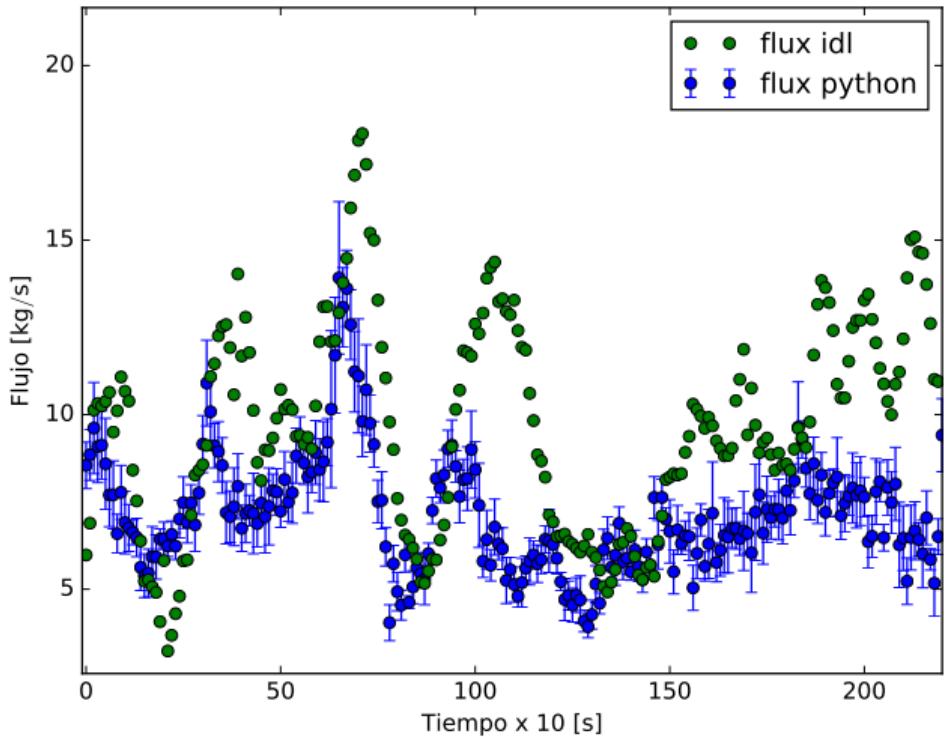
## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



# Flujo Ubinas

S. Pedraza Espitia

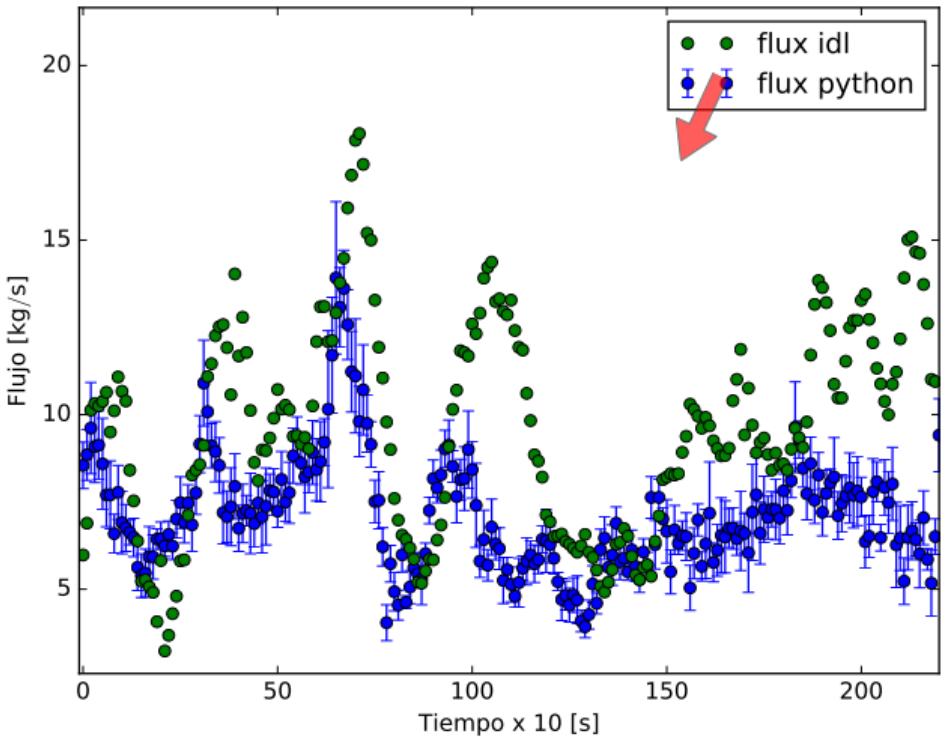


$t = 0 \Rightarrow 08/07/2015 19 : 25 : 10$  GMT.



# Flujo Ubinas

S. Pedraza Espitia



$t = 0 \Rightarrow 08/07/2015 19 : 25 : 10$  GMT.

## Introducción

- Planteamiento del problema
- Objetivos

## Marco teórico

- Ec transferencia radiativa
- Ley Beer Lambert
- Principio de medición cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

- Diagrama de flujo

## Resultados

- Campo de velocidades
- Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



- ▶ Importante monitorear gases volcánicos y entender los procesos de desgasificación.
- ▶ Conocer el principio físico de medición, de la cámara, permite diseñar los algoritmos de procesamiento.
- ▶ Detección automática de regiones de cielo para modelar radiación difusa detrás de la pluma (análisis de histogramas, morfología de imágenes binarias, extrapolación 2D, ...).
- ▶ Se hicieron correcciones a efectos de aerosoles, se recuperaron coeficientes de esparcimiento. Se logró obtener la distribución de columnas de SO<sub>2</sub> usando la ley de Beer–Lambert–Bouguer.

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



- ▶ **Campo de velocidades** usando un algoritmo de computación visual para obtener flujo óptico (operaciones matriciales – vectoriales).
- ▶ **Flujo de masa de SO<sub>2</sub>** utilizando el campo de velocidades y distribución 2D de columnas SO<sub>2</sub> y teorema de Gauss.
- ▶ Programa en Python versátil y con licencia de código abierto. Probado en mediciones de distintos volcán.
- ▶ Se procesaron imágenes del volcán Popocatépetl (hasta  $\approx 40$  kg/s), Ubinas (en promedio 8 kg/s), Pacaya ( $\approx 4$  kg/s).

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A



- ▶ Ajustar parámetros del cálculo del flujo óptico, cuidando que las deformaciones en la pluma volcánica sean aceptables (desplazamientos menores  $\sim 10\text{px}$ ).
- ▶ Integrar el programa de procesamiento con el programa de adquisición de imágenes y planear una estación fija de monitoreo.
- ▶ Agregar funcionalidades al programa para agregar mas de una línea de integración y más perfiles que permitan recuperar coeficientes de esparcimiento confiables.
- ▶ Probar otros algoritmos de detección automática, Sci-Kit de Python (Learning Machine).
- ▶ Comparación con datos sísmicos. Análisis de series de tiempo y detección de patrones de comportamiento.

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A





# Contenido

S. Pedraza Espitia

## 1. Introducción

Planteamiento del problema  
Objetivos

## 2. Marco teórico

Ec transferencia radiativa  
Ley Beer Lambert

Principio de medición cámara SO<sub>2</sub>

## 3. Metodología

Diagrama de flujo

## 4. Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## 5. Conclusiones y recomendaciones

## Introducción

Planteamiento del problema

Objetivos

## Marco teórico

Ec transferencia radiativa

Ley Beer Lambert

Principio de medición  
cámara SO<sub>2</sub>

## Metodología

Diagrama de flujo

## Resultados

Campo de velocidades

Flujo de SO<sub>2</sub>

## Conclusiones y recomendaciones

## Apéndice A

