

Workshop on Particle Detectors for  
**Interdisciplinary Applications.**  
September 30 – October 2.

Official Language: Spanish/English.  
Idioma Oficial: Español/Inglés.

## Estimación de la densidad interna en torres de hidrotatamiento mediante detectores de centelleo en la industria petroquímica.

R. A. Martínez Rivero<sup>1</sup>, C. Sarmiento-Cano, V. Baldovino, J. Stephany, L. Nuñez.

<sup>1</sup>rafael2248058@correo.uis.edu.co



Latin American alliance for  
Capacity building in Advanced physics  
LA-CoNGA physics



# Introducción y motivación

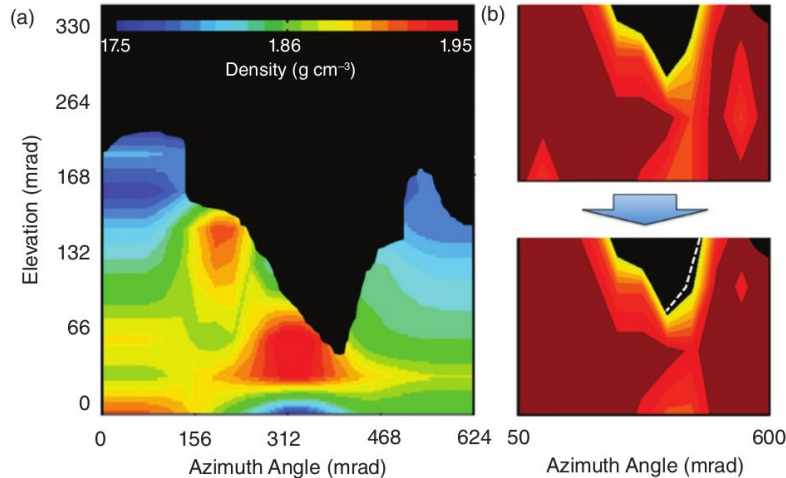
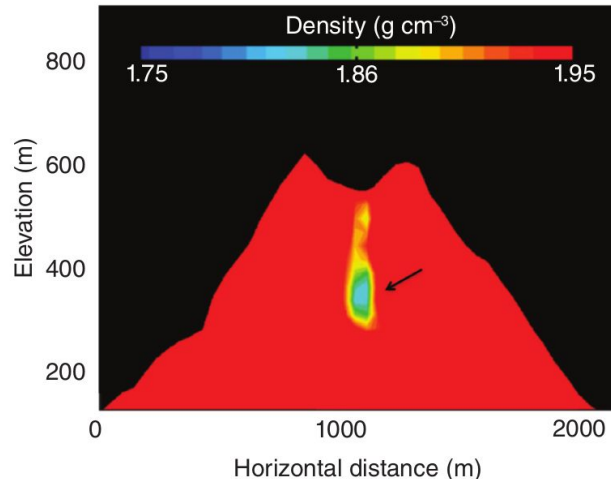
- Desafío en la extracción y refinamiento del **crudo pesado**.
- Reactores de hidrotratamiento.
- Catalizador y altas temperaturas.
- **Obstrucción**: Acumulación de material en los poros. **fouling**
- Detección temprana de la obstrucción.
- Modelos y técnicas de monitoreo.
- Espectroscopia Raman o Infrarroja, absorción de rayos X. Limitaciones.



# Muografía

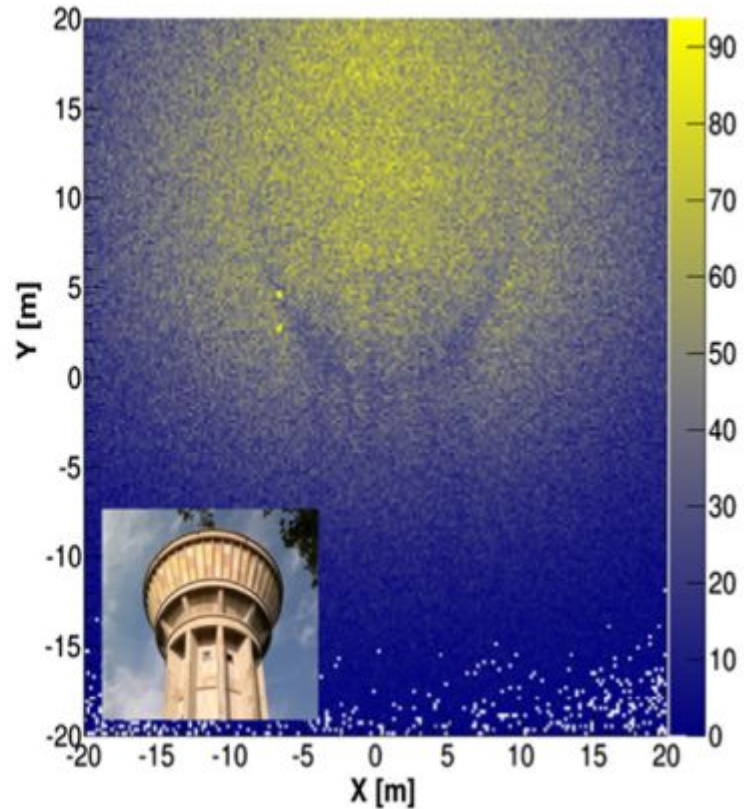
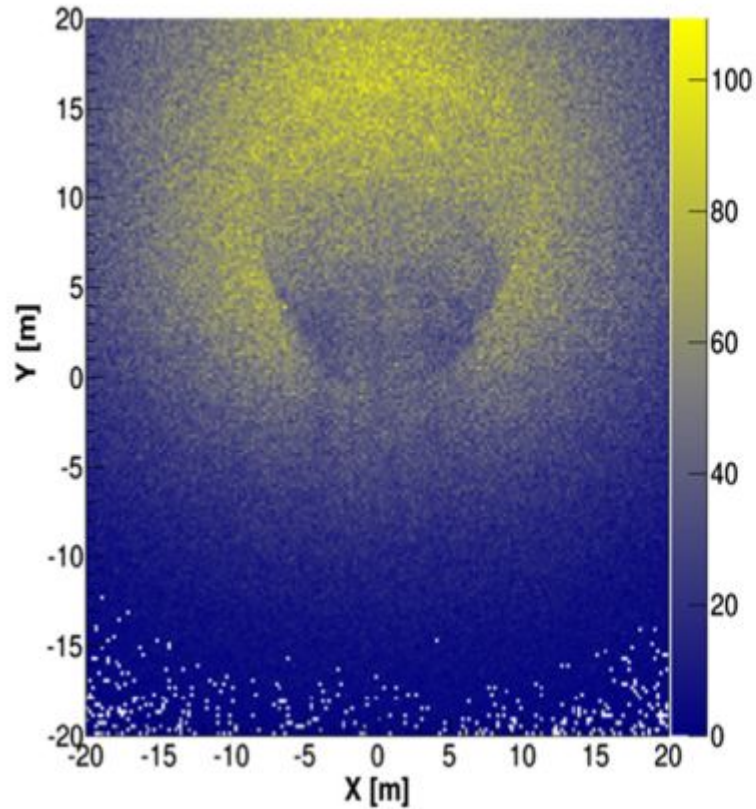
La obtención de una imagen de una estructura por medio de muones cósmicos.

Perfiles de densidad promedio



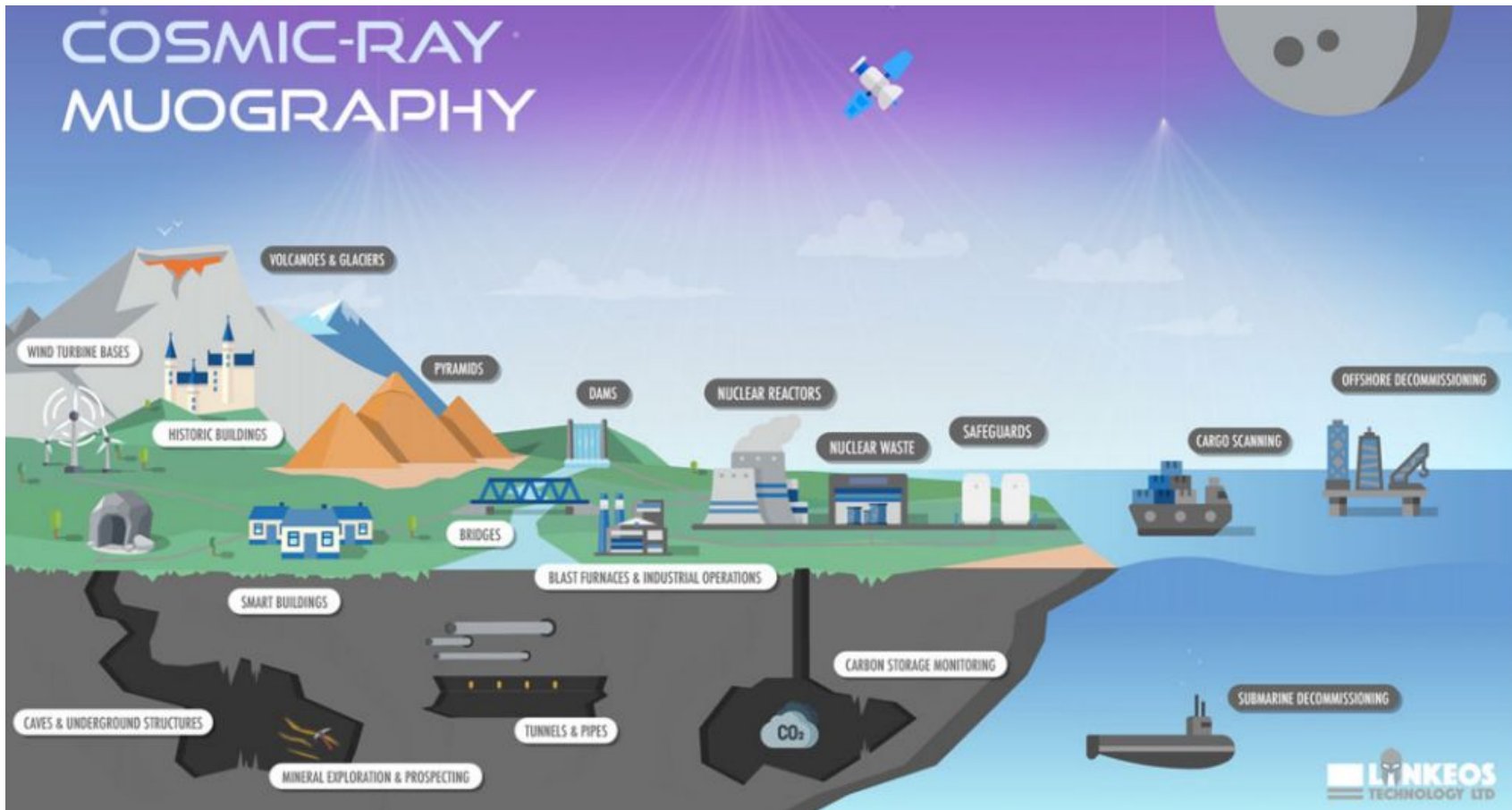
- H. Tanaka et al. Japanese volcanoes visualized with muography (2019)  
**E.S  $\sim(0.02 - 0.2)$   $\text{g/cm}^3$  a 250 m a.s.l.**

S. Bouteille, et al., Nucl. Instrum. Methods A 834 (2016) 223.



Tanque de agua, lleno Izquierda - vacío derecha. 4 días de exposición, Hodoscopio de  $0,25 \text{ m}^2$

# COSMIC-RAY MUOGRAPHY



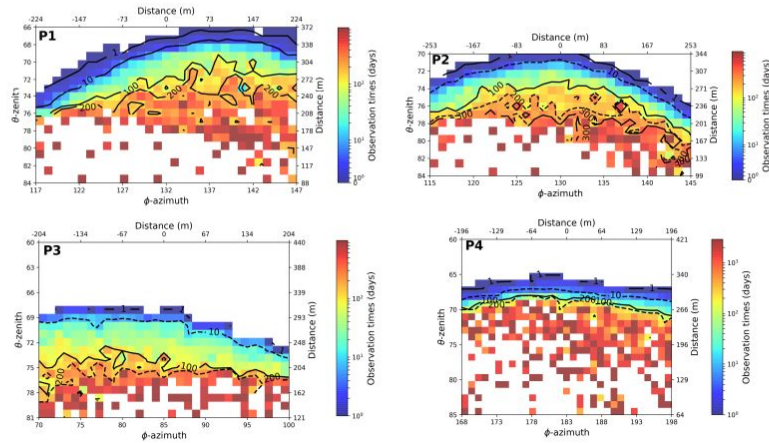
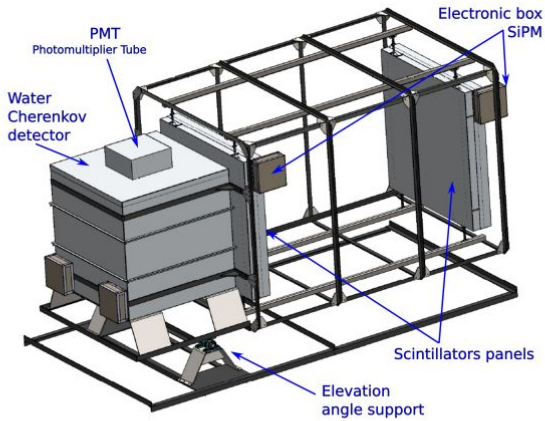
# COSMIC-RAY MUOGRAPHY





**Altura:** 20 - 40 m (algunas alcanzan más de 50 m)  
**Diámetro:** 3 - 6 m

# MuTe: Muon Telescope.



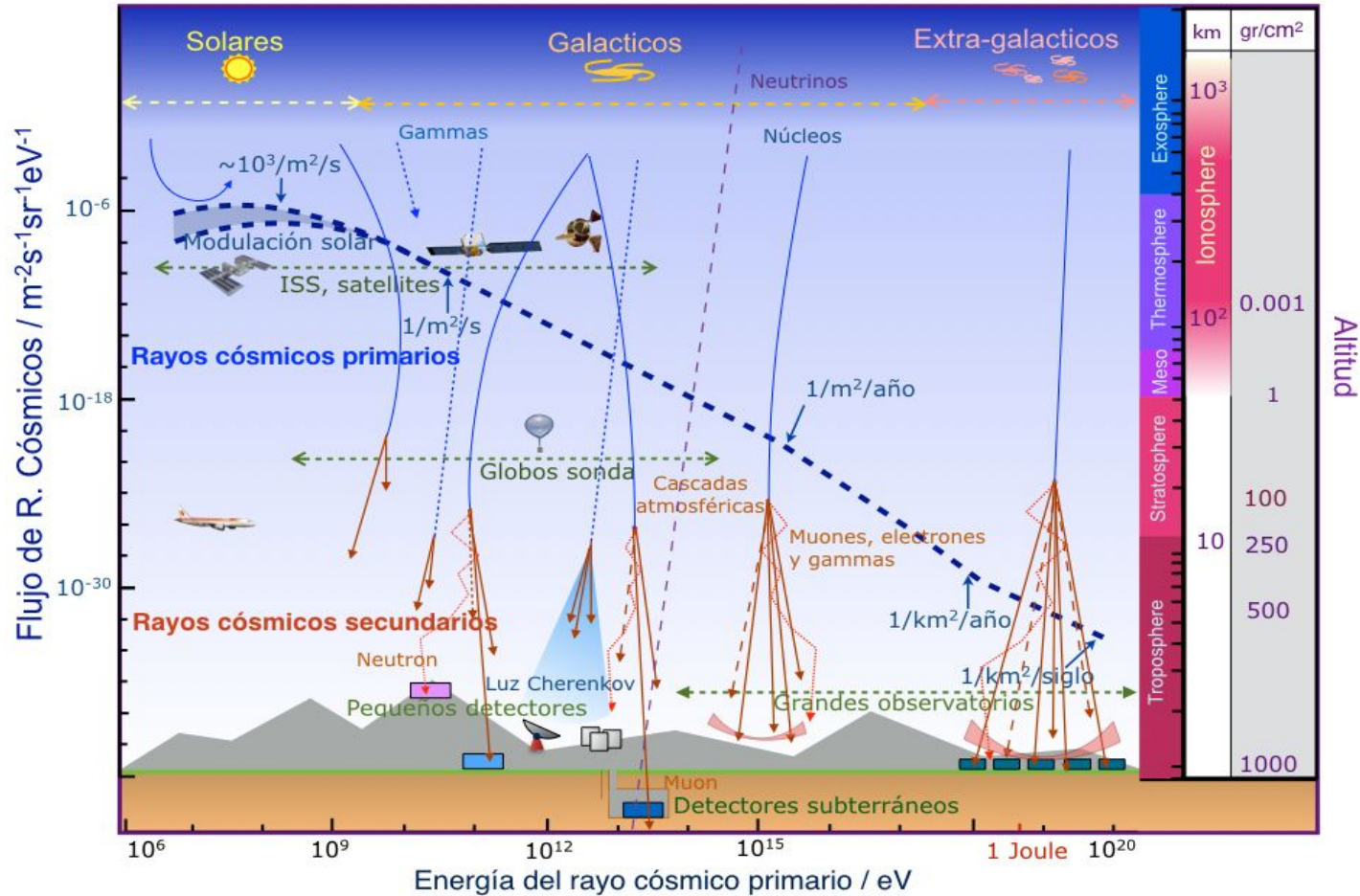
Calibration and first measurements of MuTe: a hybrid Muon Telescope for geological structures . Jesús Peña-Rodríguez, et al.

Simulated Response of MuTe, a Hybrid Muon Telescope. A. Vásquez-Ramírez et al.

MiniMuTe: A muon telescope prototype for studying volcanic structures with cosmic ray flux. H. Asorey. et al.



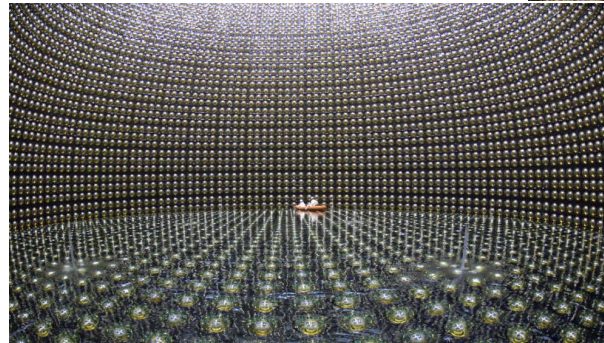
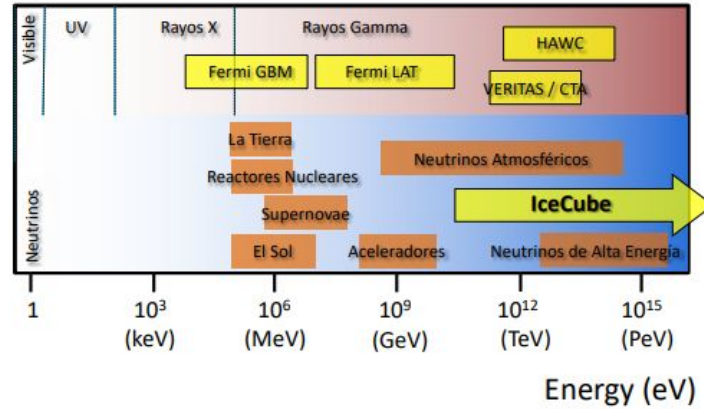
# Astropartículas



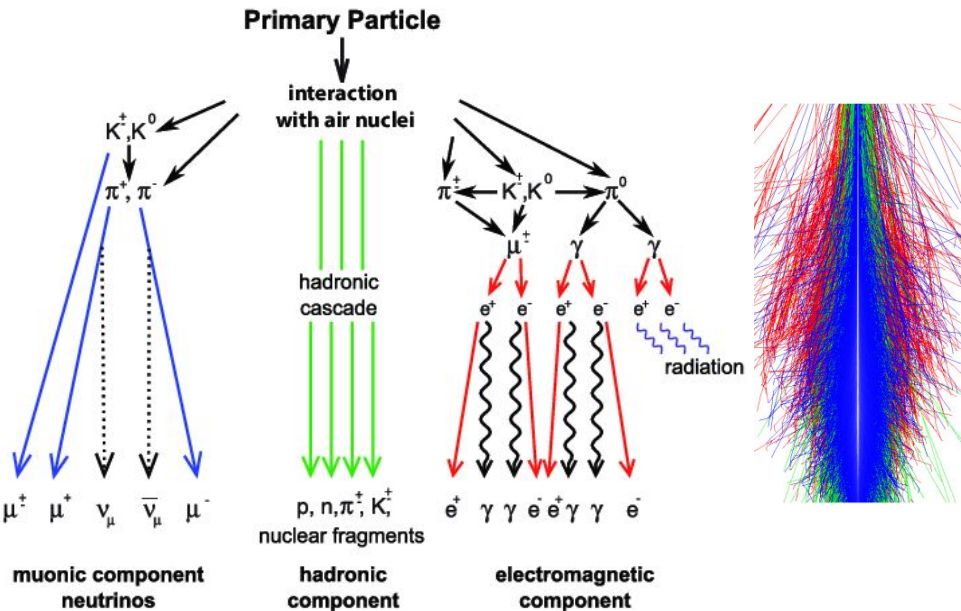
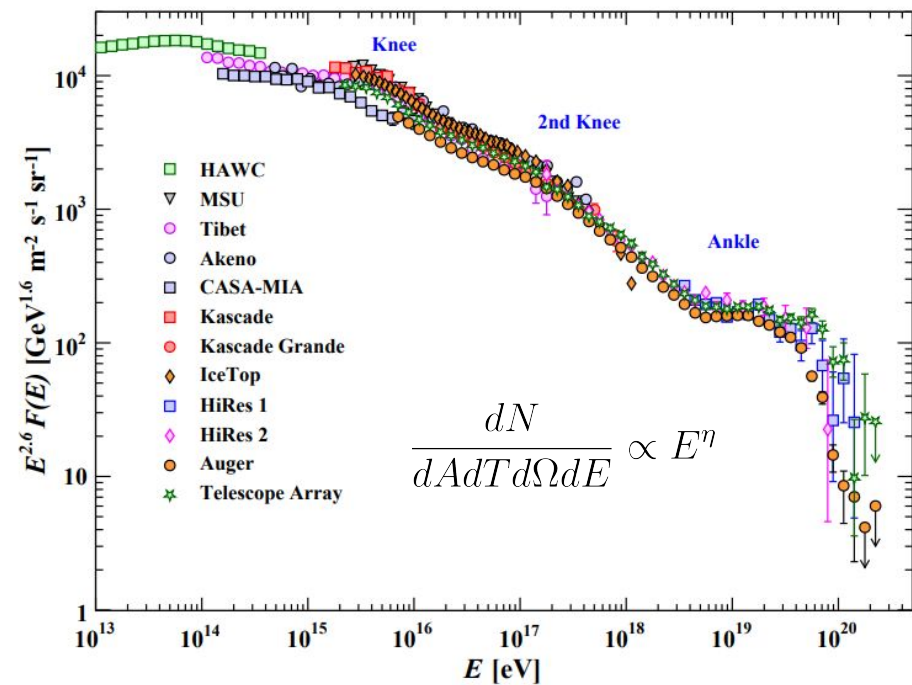
# Línea principal

- Origen y medios de aceleración.
- Composición química.
- Neutrinos, materia oscura, etc.
- Kamiokande
- Observatorio Pierre Auger
- LAGO
- IceCube
- HAWC

¿Altas energías?



# Radiación Cómica y Muones



Partícula	Canales de desintegración parcial	BR [%]	Vida media [s]
$\pi^\pm$	$\mu^\pm + (\nu_\mu)$	99.99	$2.603 \cdot 10^{-8}$
$K^\pm$	$\mu^\pm + (\nu_\mu)$ $\pi^0 + \mu^\pm + (\nu_\mu)$	63.43 3.27	$1.238 \cdot 10^{-8}$
$\tau^\pm$	$\mu^\pm + (\nu_\mu) + (\bar{\nu}_\tau)$	17.36	$2.906 \cdot 10^{-13}$
$D^\pm$	$K^0 + \mu^\pm + (\nu_\mu)$	7.0	$1.040 \cdot 10^{-12}$
$D^0$	$\mu^\pm + \text{Hadrones}$ $K^- + \mu^+ + \nu_\mu$	6.5 3.19	$4.103 \cdot 10^{-13}$

# Pérdida de Energía en la Materia

Mecanismos:

- Producción de pares
- Radiación de frenado (Bremsstrahlung)
- Colisiones inelásticas con núcleos
- Ionización

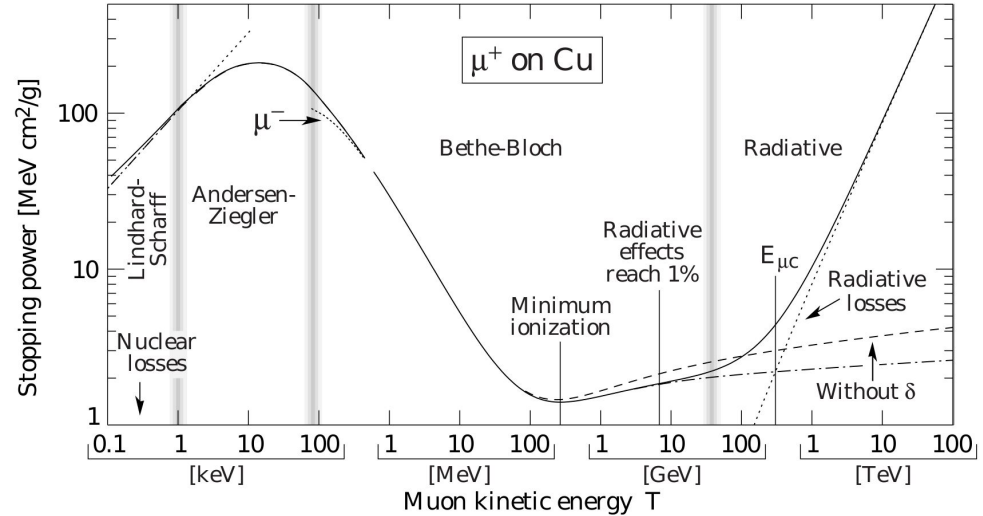
La pérdida de energía posee una dependencia de:

- Energía cinética del muón
- Densidad del material

$$\frac{-dE}{d\rho} = a(E) + b(E)E$$

$$b(E)E < 10^{-2}a(E) \longrightarrow E < 100\text{GeV}$$

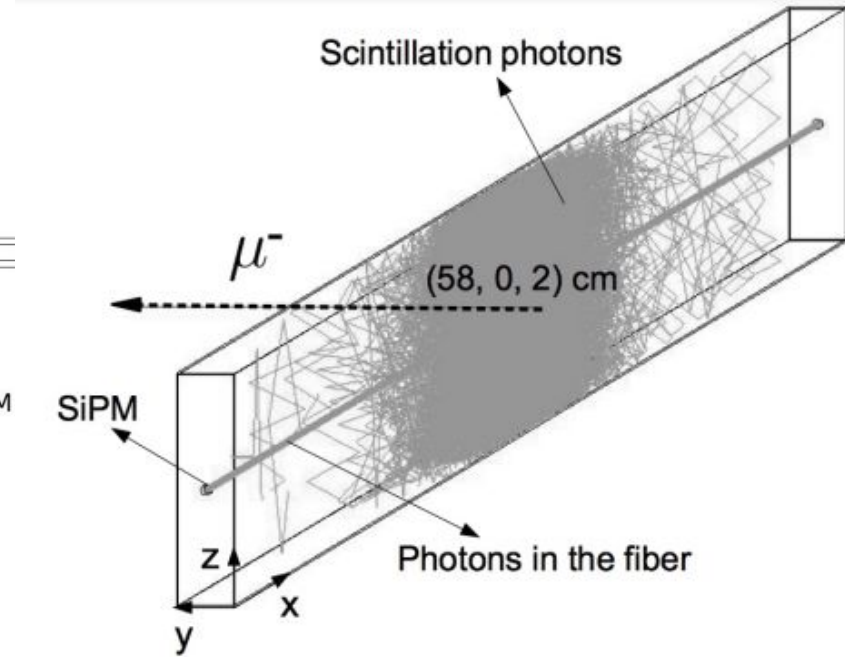
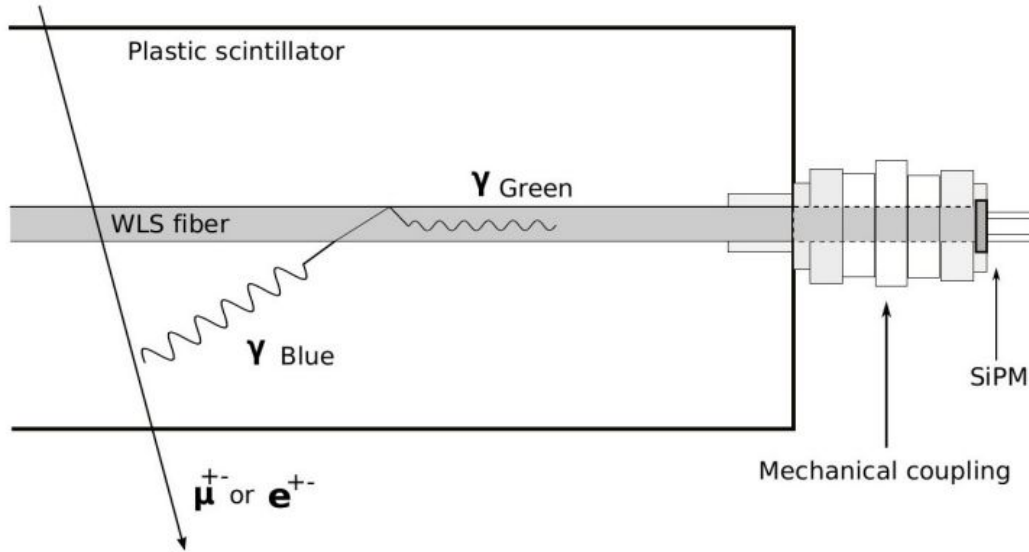
**Groom et al. 2001** Caracterización de a y b para diferentes Materiales



$$P(E_\mu, v)_{br} dv = \alpha \frac{N_A}{A} Z^2 r_e^2 \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 \frac{16}{3} \left(\frac{3v}{4} + \frac{(1-v)}{v}\right) dv \cdot \left[ \ln \left( \frac{12(1-v)}{5} \frac{E_\mu}{v m_\mu Z^{1/3}} \right) - \frac{1}{2} \right],$$

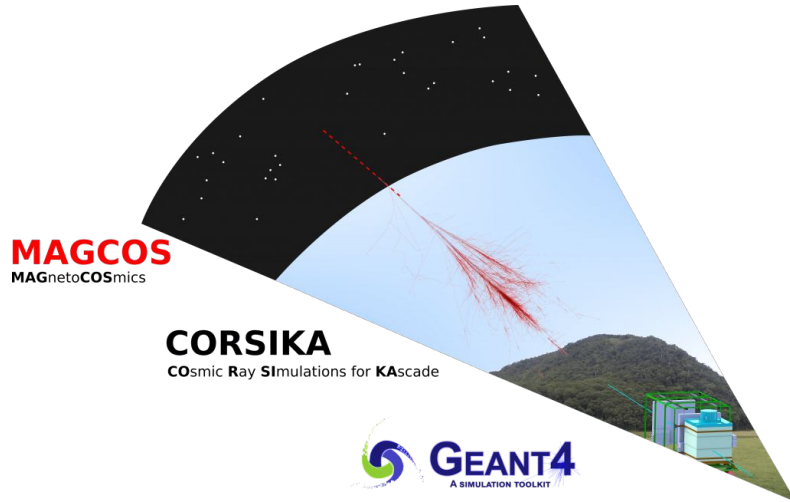
$$\frac{d\sigma}{dv d\rho} = 2 \frac{(Z\alpha r_e)^2}{3\pi} \left(\frac{1-v}{v}\right) \left[ \Phi_e(E_\mu, \rho, v) + \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 \Phi_\mu(E_\mu, \rho, v) \right]$$

# Sistema de detección



# ARTI

Framework en C++, Fortran, Bash y Perl  
permite la integración entre  
MagnetoCosmics, CORSIKA y Geant4.



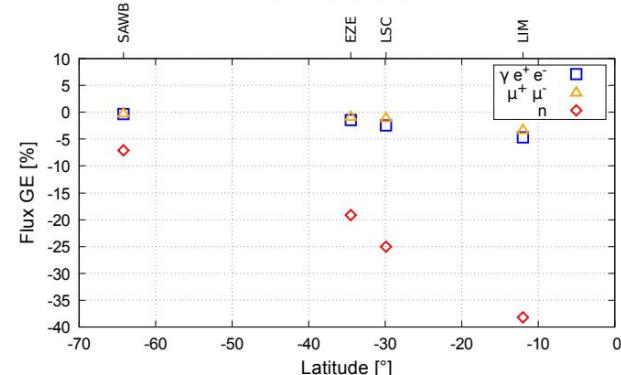
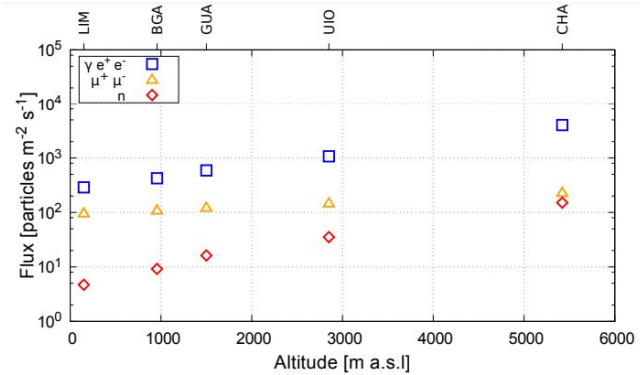
$$\Phi(E_p, Z, A, \Omega) \simeq j_0(Z, A) \left( \frac{E_p}{E_0} \right)^{\alpha(E_p, Z, A)}$$

(0.1 - 10<sup>6</sup>) GeV,

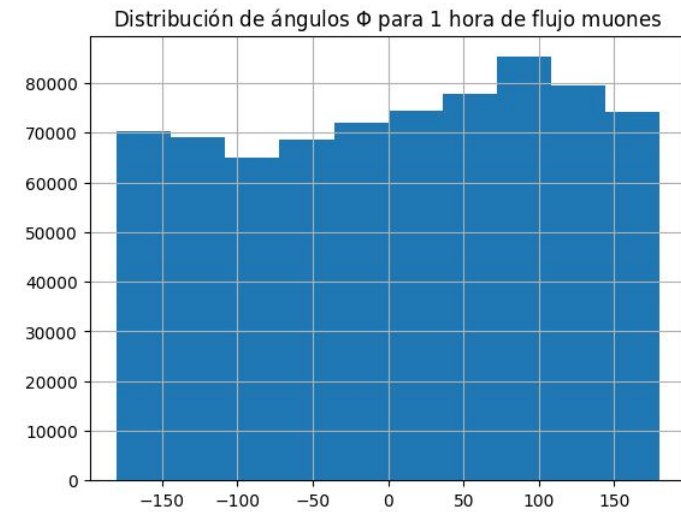
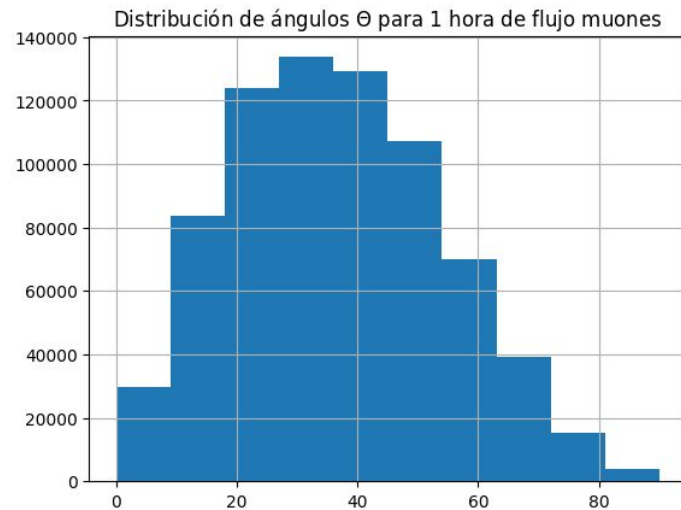
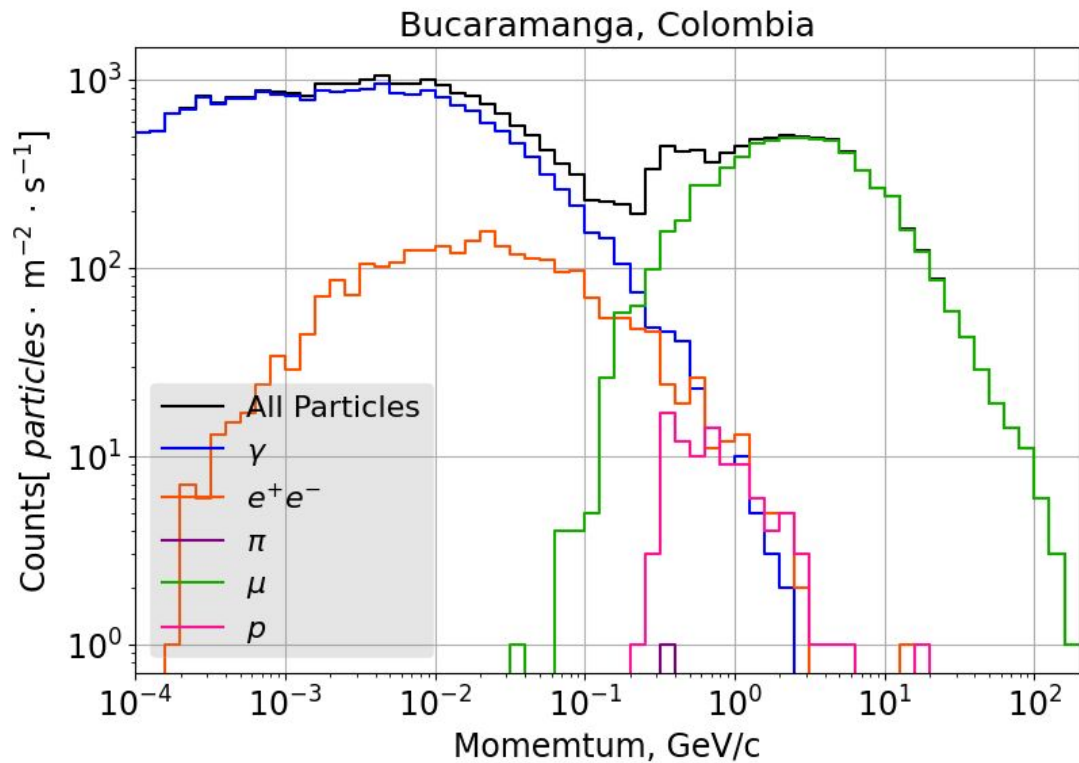
$$j_0(Z, A, E_0 = 10^3 \text{ GeV})$$

122km asl

$$1 \leq Z \leq 26,$$

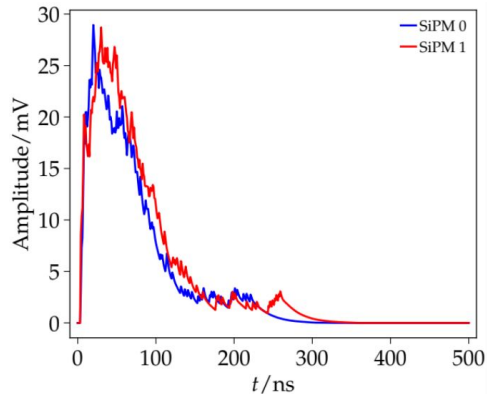
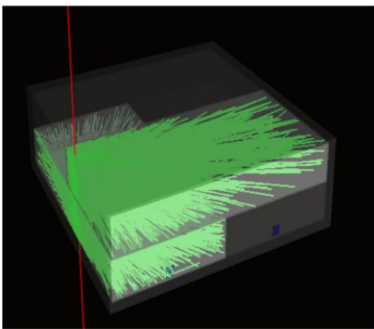
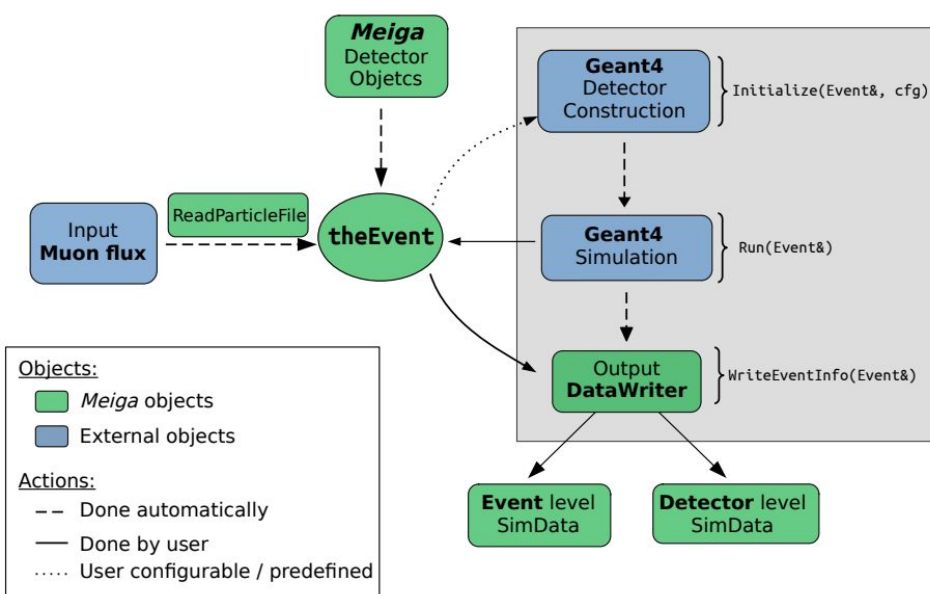


# Flujo simulado en Bucaramanga

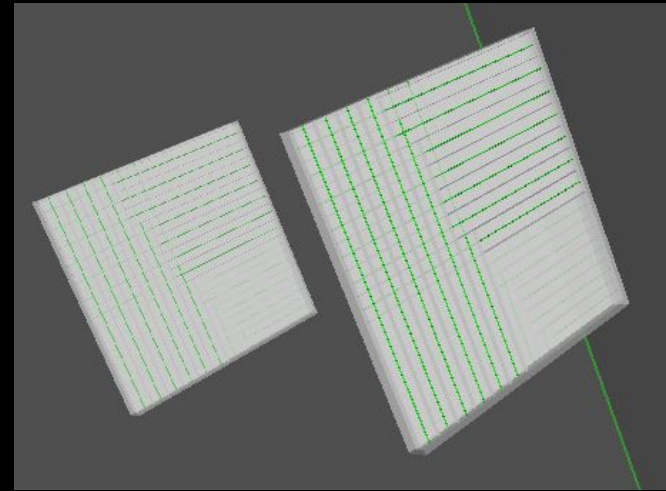


# MEIGA

Integra el cálculo del **flujo** de rayos cósmicos, la **propagación** de partículas a través de materiales y la simulación de la **respuesta** del detector.



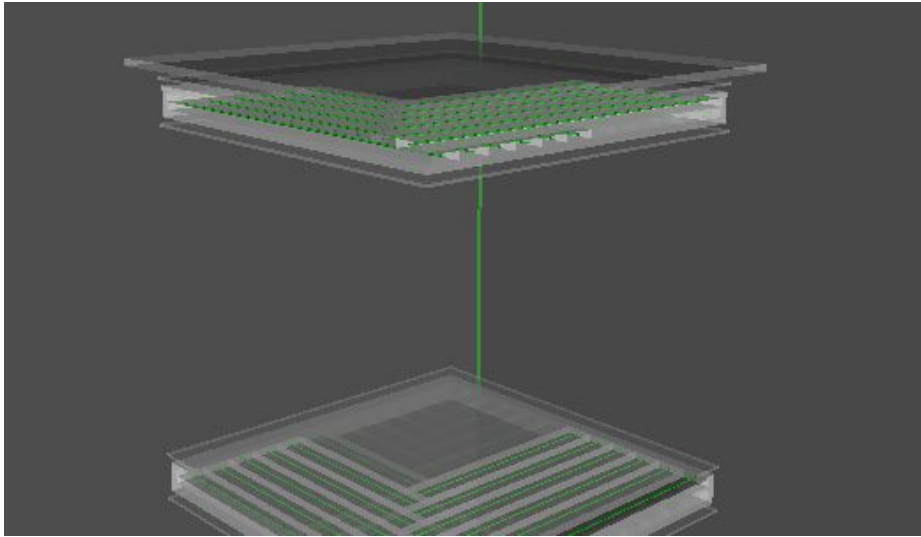
Meiga, a Dedicated Framework Used for Muography Applications A. Taboada, et al.



Physics List: QGSP\_BERT\_HP



# Modelado del detector



- **Diseño geométrico:** Barras de centelleo organizadas en un arreglo **NxN** distribuidas en dos paneles perpendiculares.
- **Dimensiones de las barras:** Ancho, longitud y grosor ajustados según la simulación.
- **Carcasa externa:** Protege y afecta el comportamiento óptico de la luz emitida.

## Propiedades Ópticas del Centelleador

- **Energía de los fotones:** 2.00 eV a 4.20 eV.
- **Índice de refracción:** Constante de 1.5.
- **Longitud de absorción:** 4 cm a 24 cm, dependiendo de la energía.
- **Componentes rápidas y lentas:** Simulación de respuesta temporal.

## Fibras Ópticas y Detección

- **Transporte de fotones:** Fibras ópticas de PMMA con índice de refracción de 1.60.
- **Detección óptica:** Fotomultiplicadores con modelado preciso de su eficiencia cuántica.

## Reflexión y Dispersión

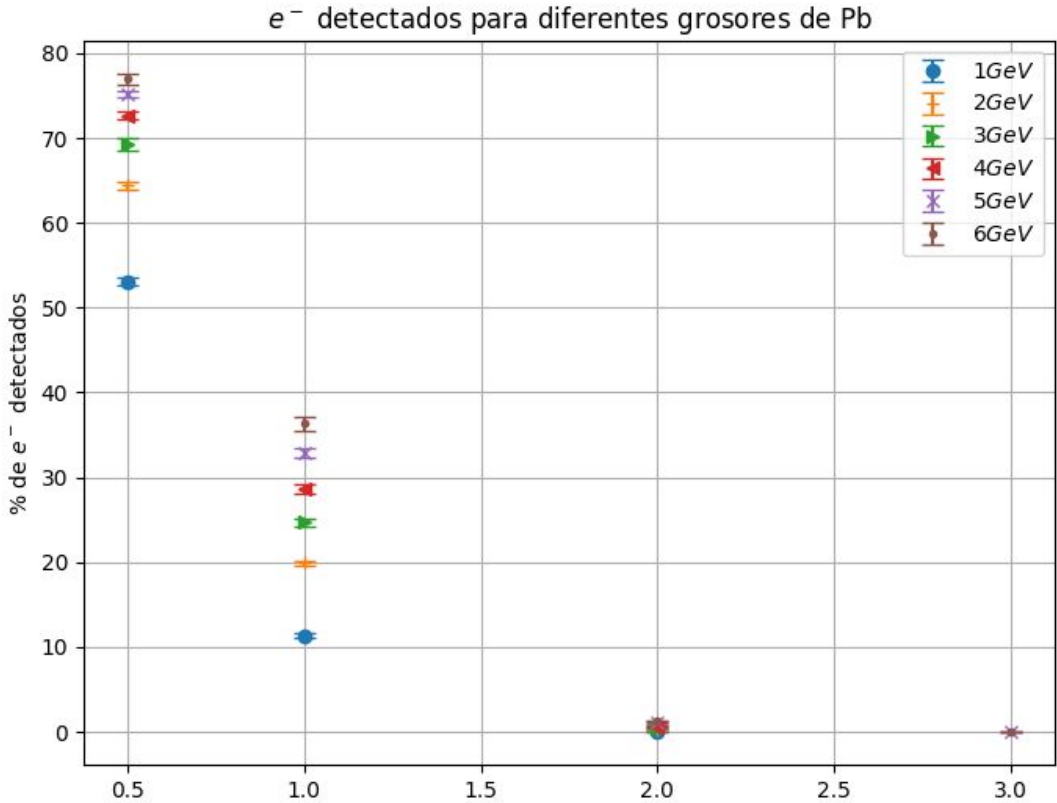
- **Rugosidad superficial:** Control de la dispersión de fotones.
- **Reflexión especular:** 20% de la luz reflejada en un lóbulo especular, sin reflexión especular exacta.

## Sensor Óptico SiPM

### Blindaje de Pb con densidad 11.3 g/cm<sup>3</sup>

# Respuesta del detector frente al blindaje.

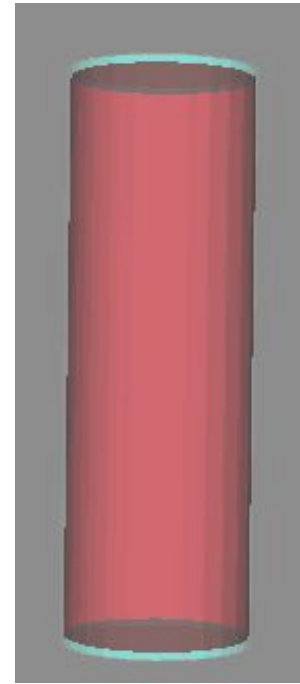
Inyección de 100000 electrones verticales monocromáticos.



# Modelado de la Torre

## Modelado de la Torre

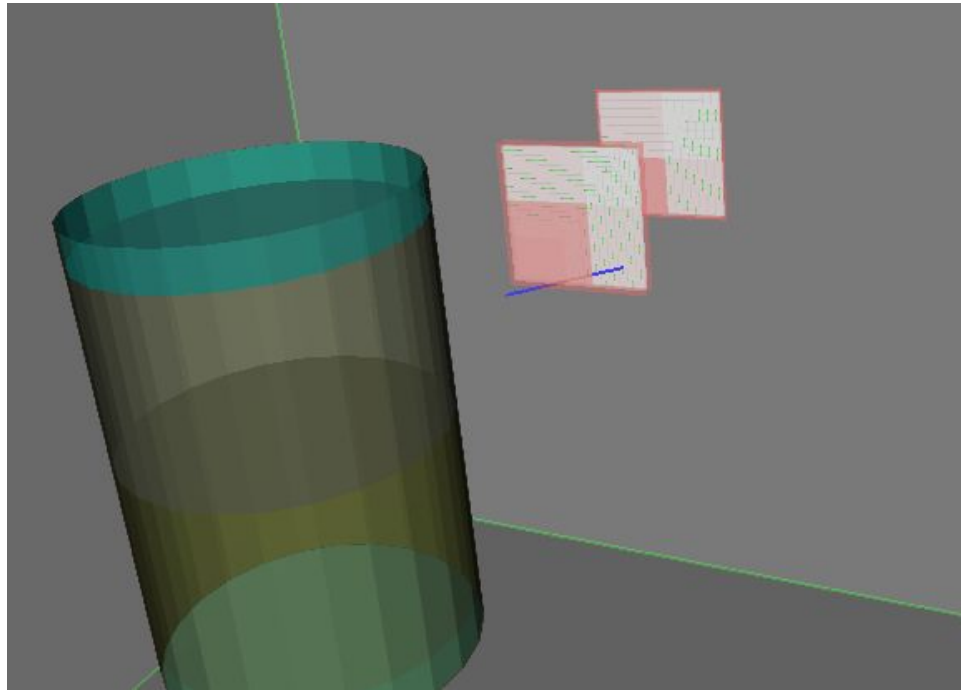
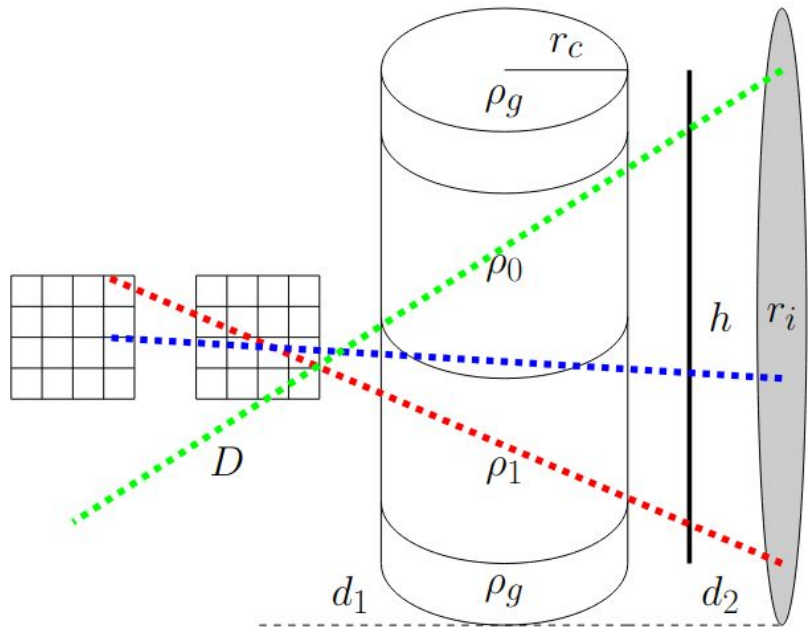
- **Envolvente de acero** para el lecho de catalizador.
- **Capa de calorifugado con aire** para aislamiento térmico.
- **Envolvente de aluminio** para protección y estabilidad estructural.
- **Lecho interno:** Mezcla de **diésel** (75% parafina, 25% benceno) y catalizadores **NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**.



$$\rho_{eq}^0 = \varepsilon^0 \rho_{Diesel} + (1 - \varepsilon^0) \rho_{ca}^A$$

$$\rho_{eq}^r = \varepsilon^r \rho_{Diesel} + (1 - \varepsilon^r) \rho_{ca}^{A,r}$$

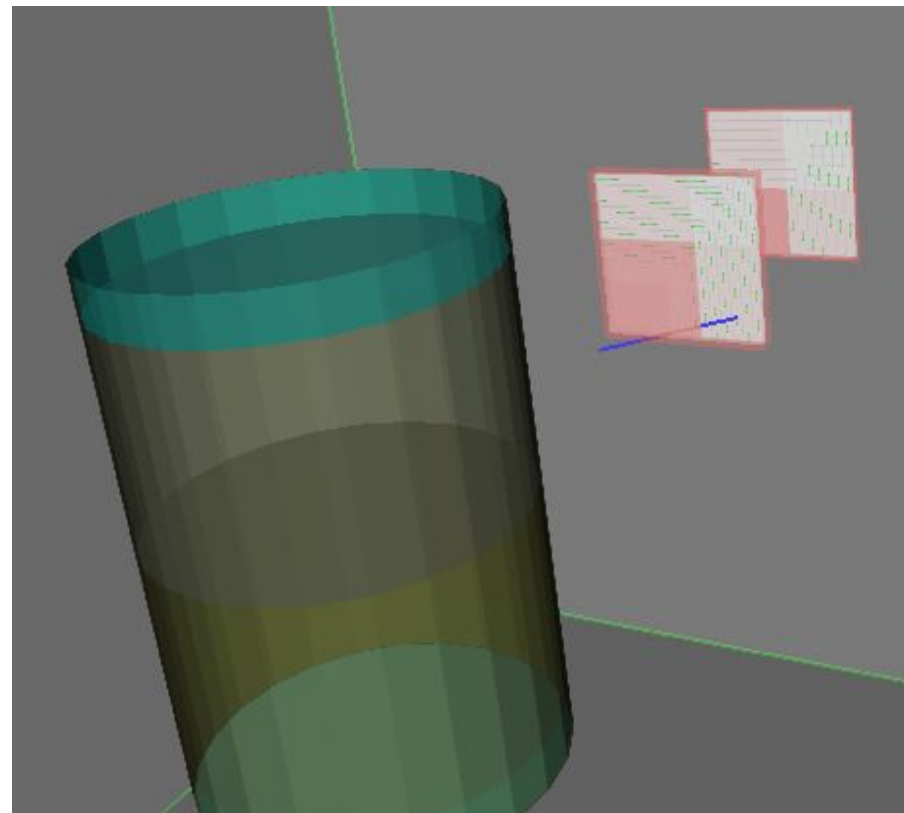
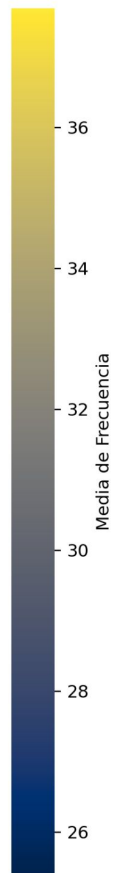
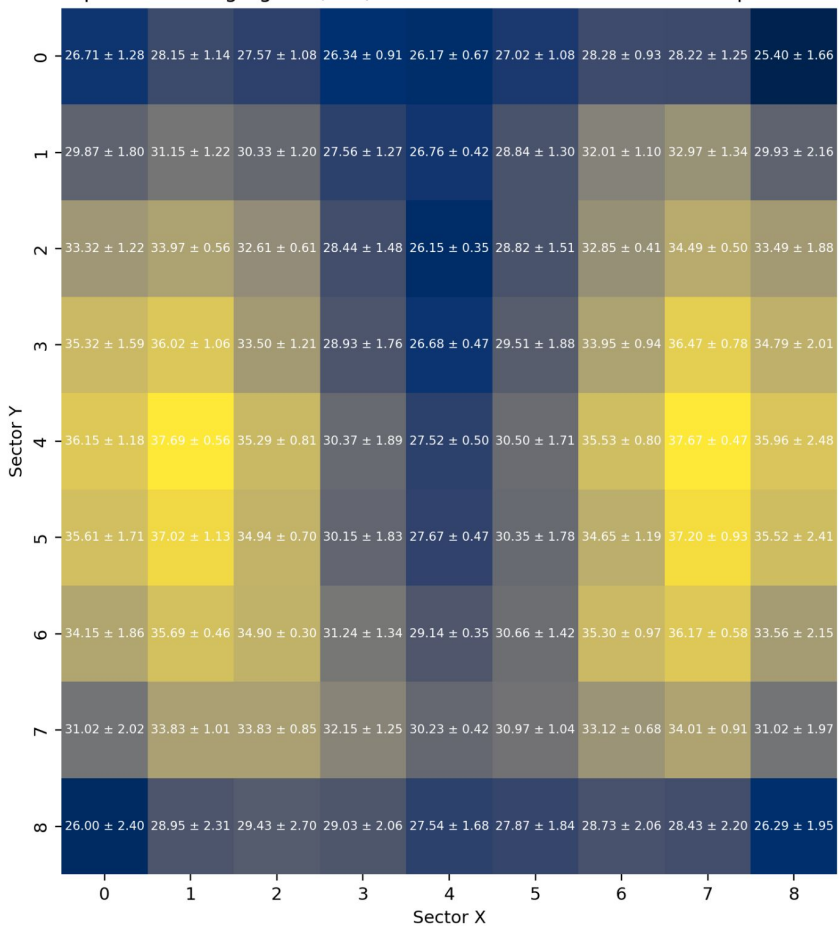
# Esquema de simulación



Radio de inyección 1.8 m, a 5 cm del objetivo , 1 m de distancia entre paneles, Torre 50 cm de radio y 1,5 m de altura a 1 m del panel 1.

**557740530 Particulas 20 H de Flujo.**  $\rho_0=4,1 \text{ g/cm}^3$   $\rho_1=1,2 \text{ g/cm}^3$

Mapa de Calor Agregado (9x9) con Media  $\pm$  Desviación Estándar por Sector



# Conclusiones

- Se modeló el detector incorporando un blindaje de 2 cm, suficiente para atenuar por completo la radiación secundaria, incluyendo electrones de hasta 6 GeV.
- Se desarrolló un modelo computacional que integra la radiación cósmica de fondo, detectores de centelleo con fibras ópticas y SiPM, y la simulación de la torre de hidrotatamiento como objetivo.
- Este modelo permite simular con precisión la interacción de la radiación cósmica con la estructura de la torre y la respuesta del detector.
- Se reconstruyó un mapa de calor, mostrando una diferencia de conteo de hasta el 10% entre zonas de distinta densidad en la interfase y hasta un 30% en comparación con el fondo.

Workshop on Particle Detectors for  
**Interdisciplinary Applications.**  
September 30 – October 2.

Official Language: Spanish/English.  
Idioma Oficial: Español/Inglés.

Gracias por su atención



Latin American alliance for  
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



# Backup



# Condición de viabilidad.

$$\Delta T \times \mathcal{T} \times \frac{\Delta I^2(\varrho_0, \delta\varrho)}{I(\varrho_0)} > 1$$

$$\Delta I(\varrho_0, \delta\varrho) = \Phi[E_{\min}(\varrho_0)] \times \left. \frac{dE_{\min}}{d\varrho} \right|_{\varrho=\varrho_0}$$

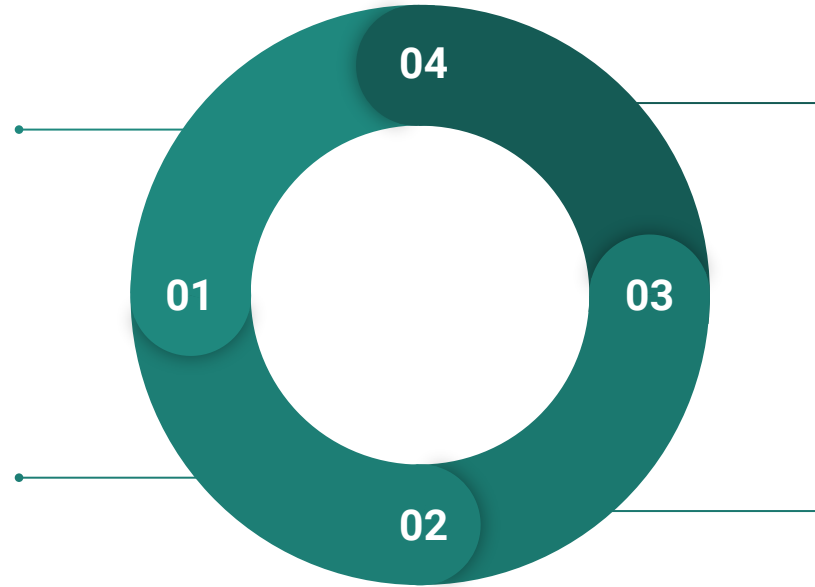
$E_{\min}$	GeV	minimum muon energy to cross a given opacity
$\Phi$	$\text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1} \text{GeV}^{-1}$	differential flux of muons
$\gamma$	$\in \mathbb{R}$	power-law exponent of differential spectrum
$A$		scale factor (i.e. amplitude) of differential spectrum
$I$	$\text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$	integrated flux

¿Es factible utilizar la muografía como una técnica para medir y estudiar la dinámica de los procesos de refinamiento en reactores catalítico de lecho fijo, con el fin de optimizar la eficiencia del refinamiento?

# Desarrollar un modelo computacional estudiar la dinámica en las RLF.

Caracterización y simulación del Fondo de Rayos Cósmicos.

Modelar y simular el Detector.

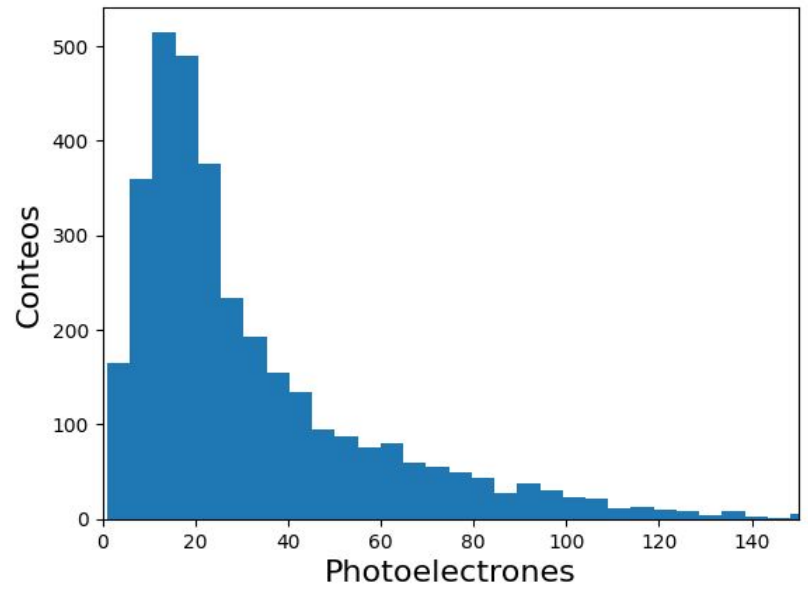


Integrar el FRC, el hodoscópio y el RLF.

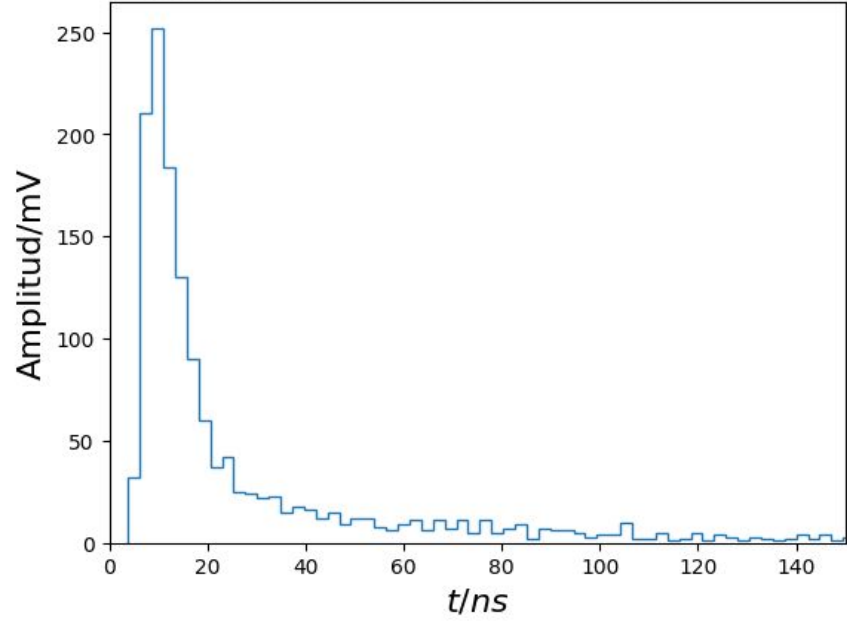
Emular un reactor de lecho fijo.

# Respuesta del detector

## Distribucion del Numero de PE en el SiPM

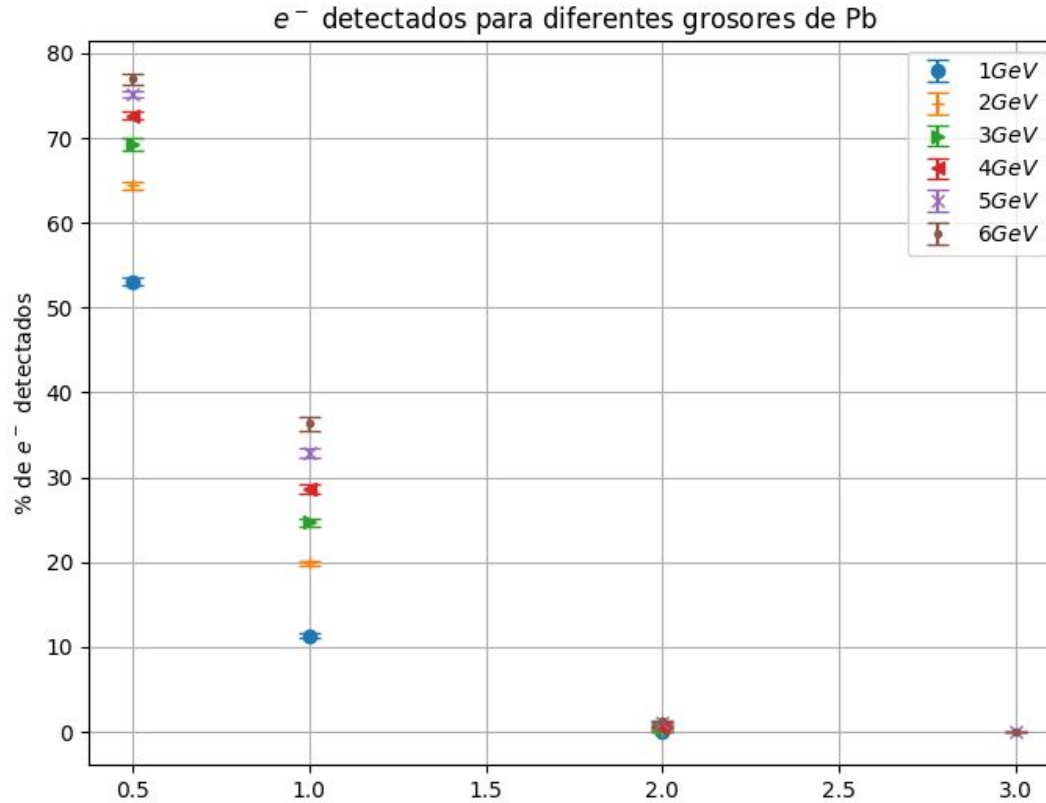


## Distribución temporal en los SiPM



# Respuesta del detector frente al blindaje.

Inyección de 100000 electrones verticales monocromáticos.



# Parámetros geométricos del hodoscopio.

Opacidad

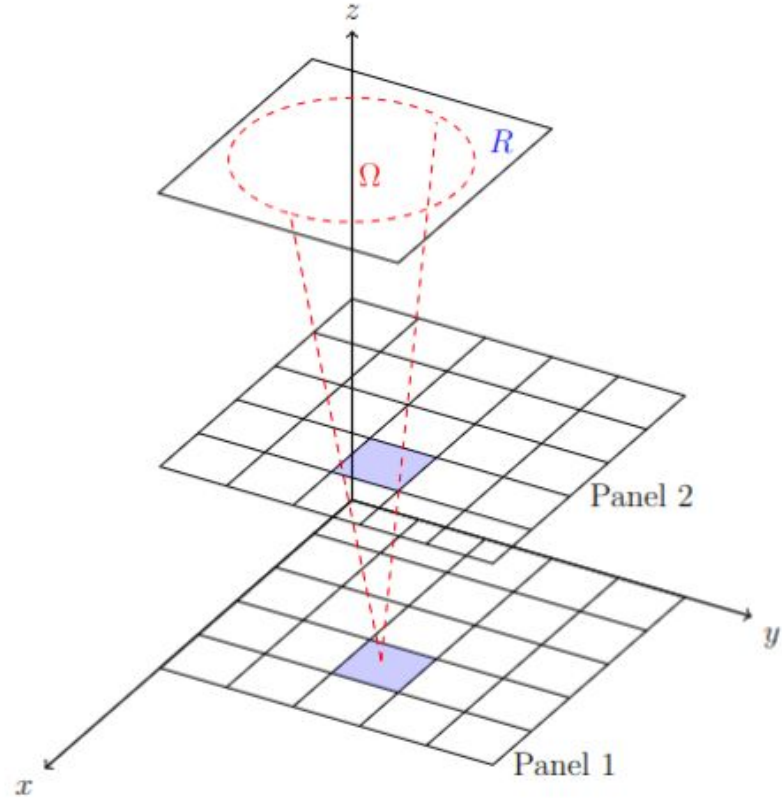
$$\varrho = \int_L \rho(\chi) d\chi = \rho \times L$$

Flujo detectado

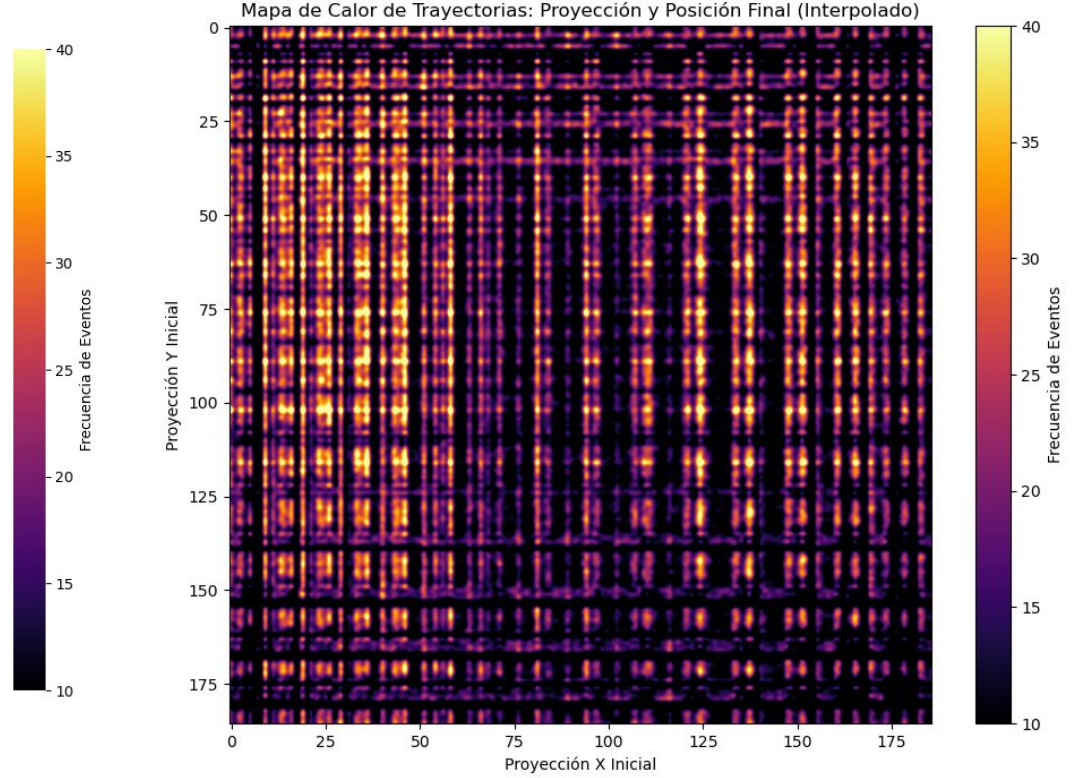
$$N(\varrho) = \Delta t \times T \times I(\varrho)$$

Aceptancia

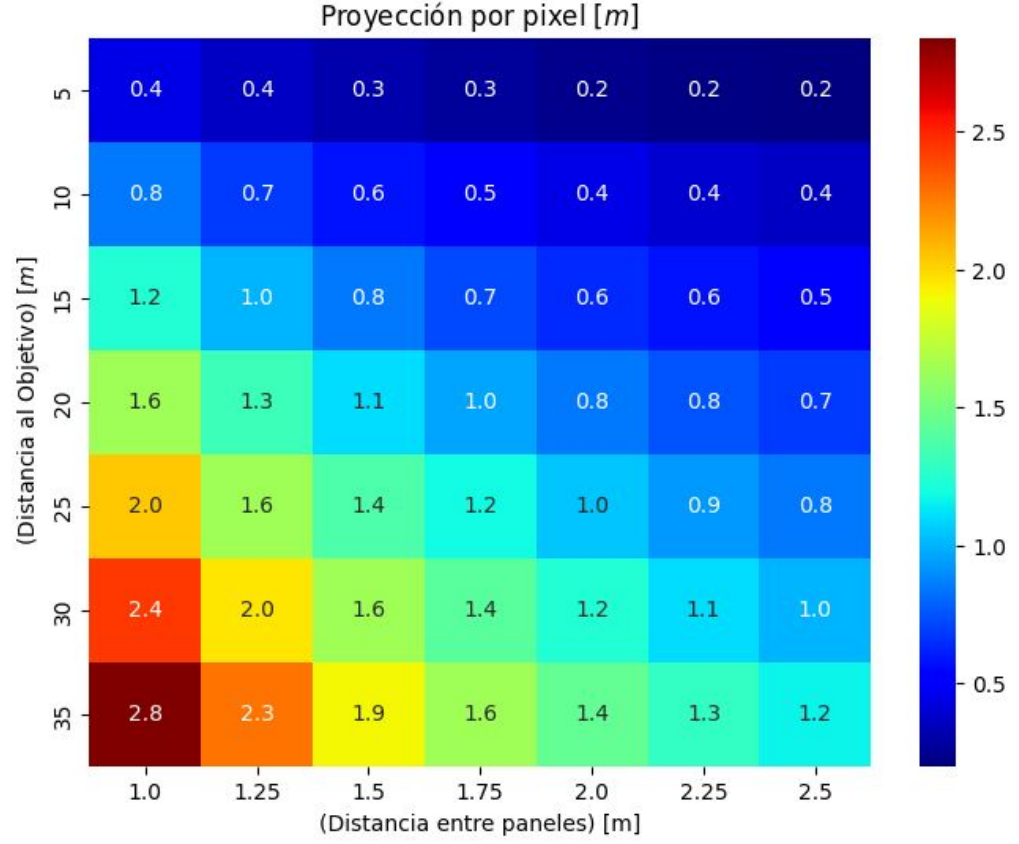
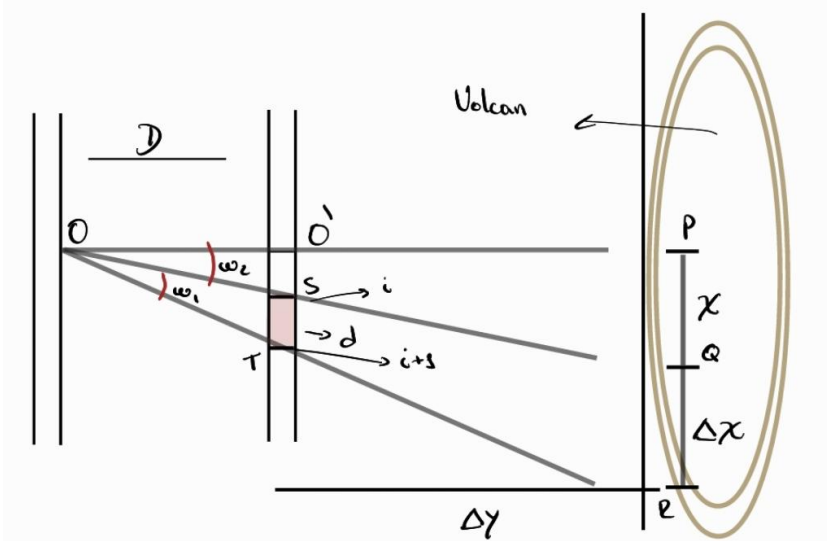
$$T(r_{ij}) = R(r_{ij}) \times \delta\Omega(r_{ij})$$



# Muograma y procesamiento:



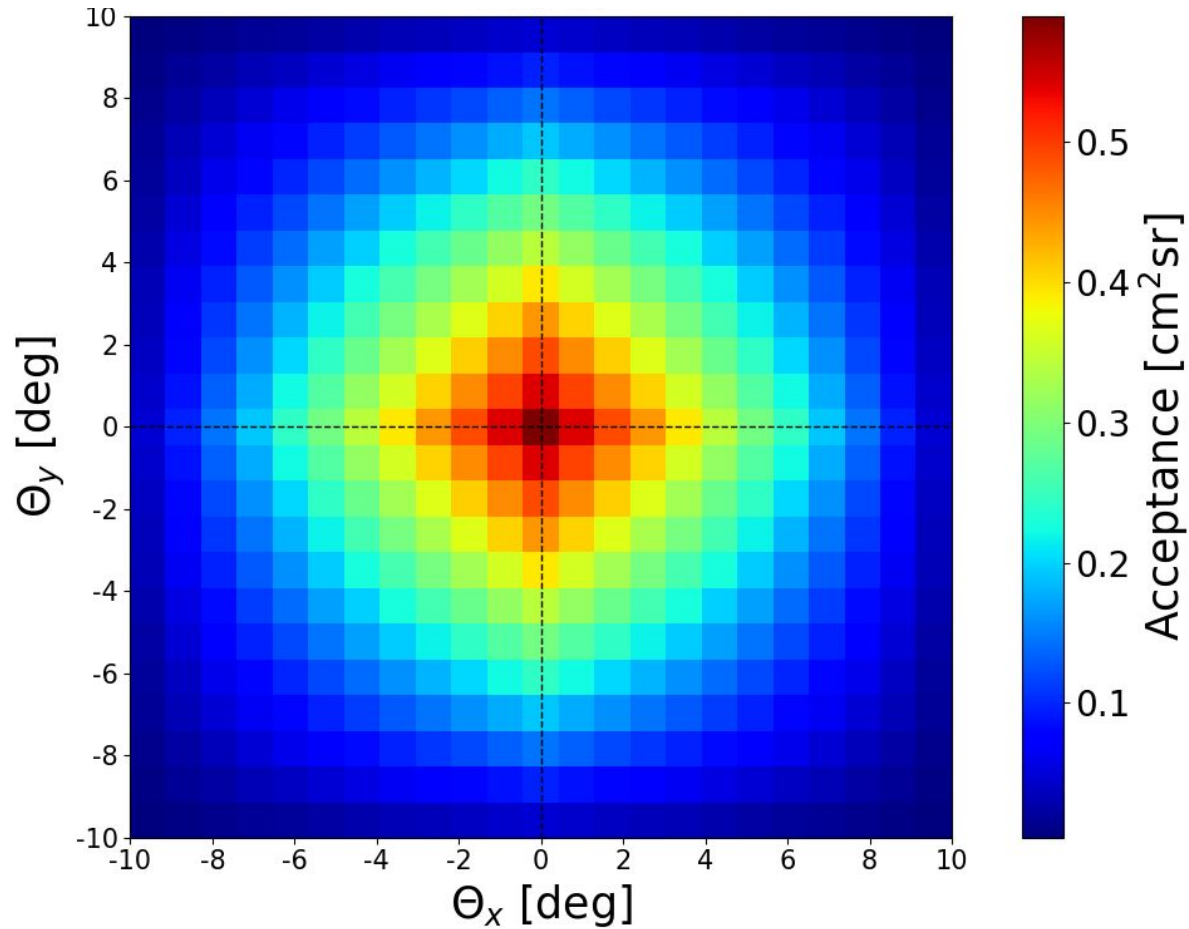
# Resolución Espacial 15 Barras

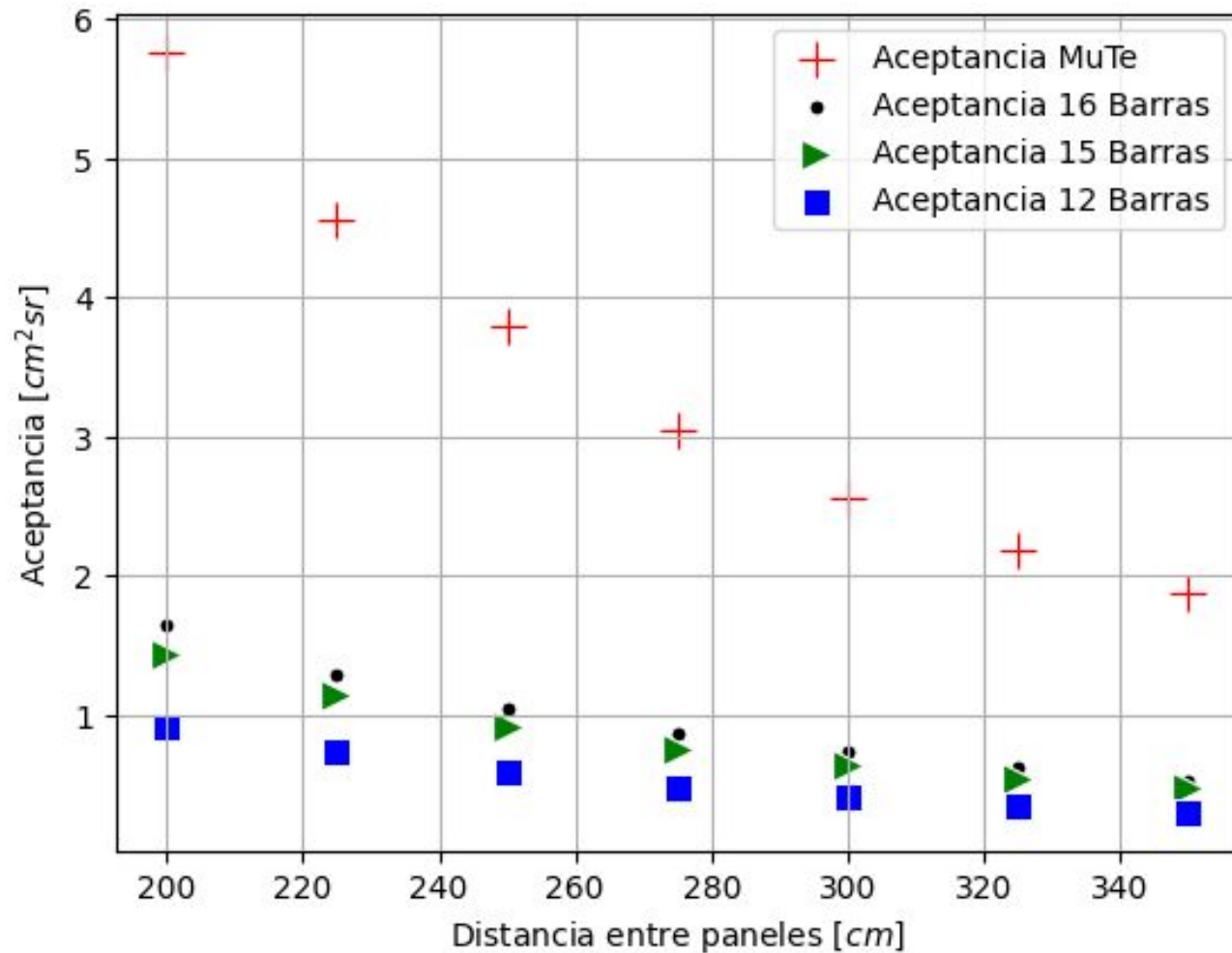


$$\Delta x = \frac{d(2\Delta y + D)}{D}$$

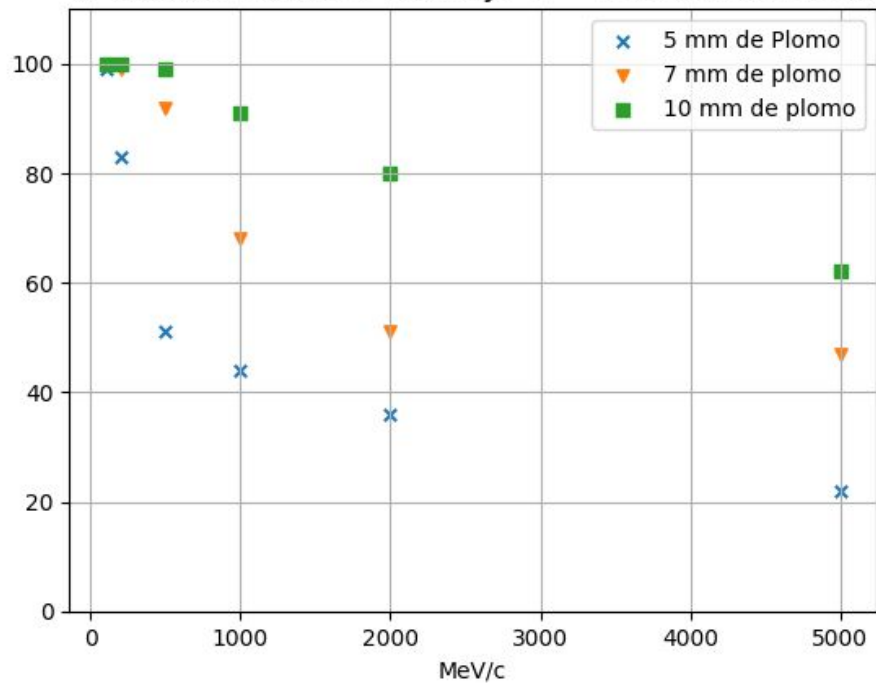


# Aceptancia 15 Barras

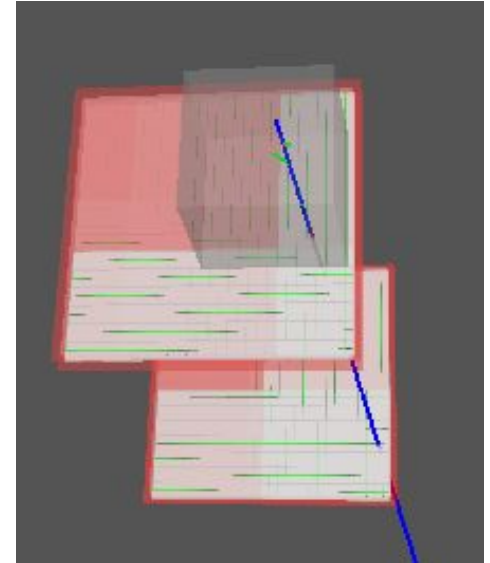
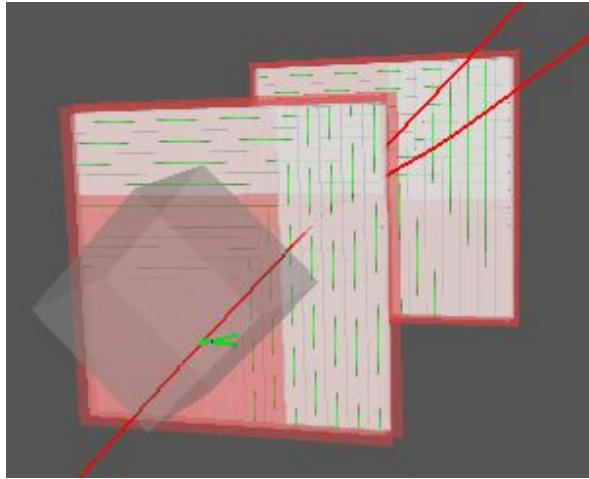
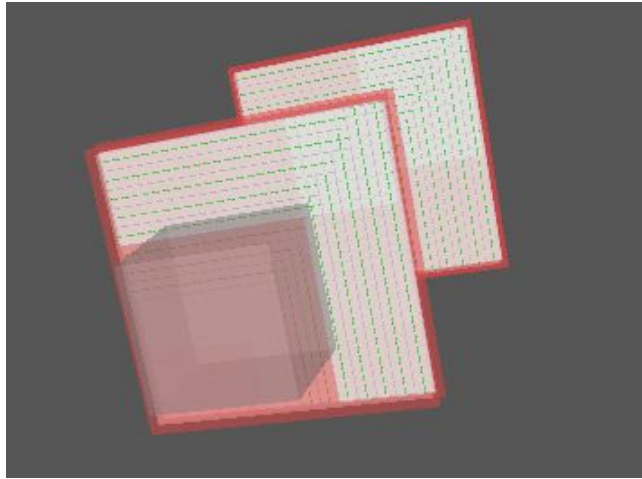




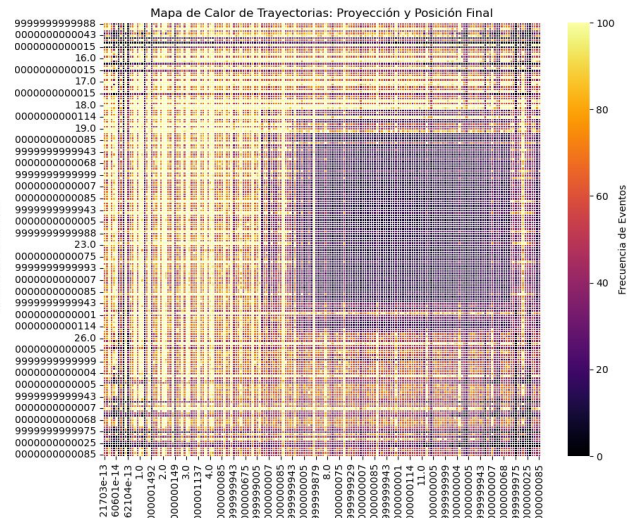
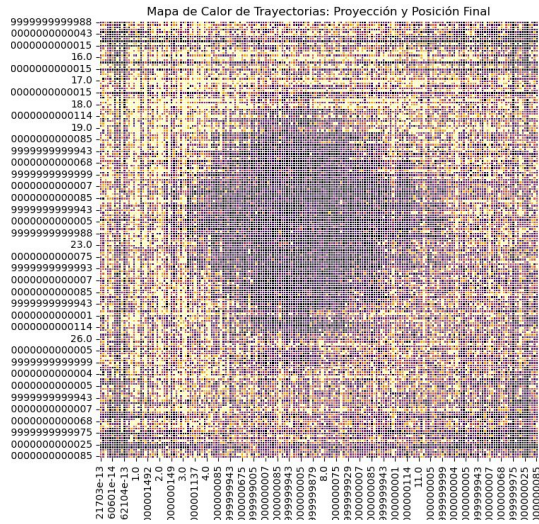
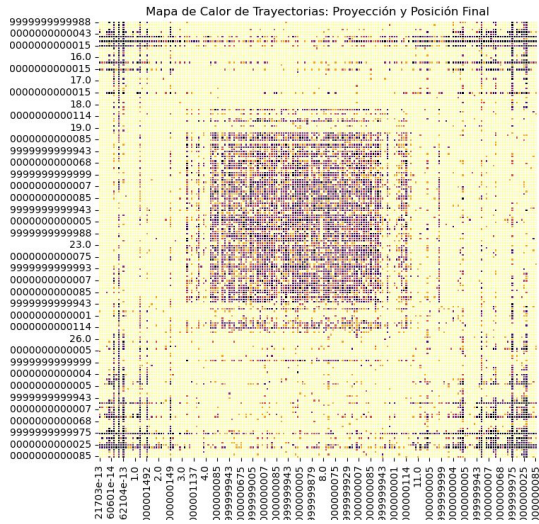
% de Atenuacion Pb flujo  $e^-$  monocromatico

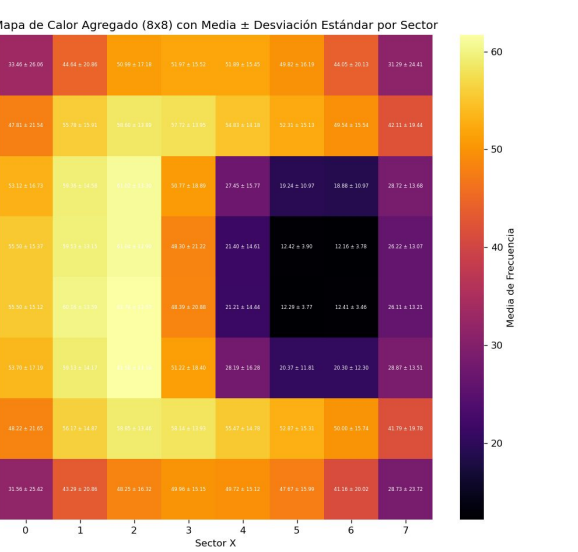
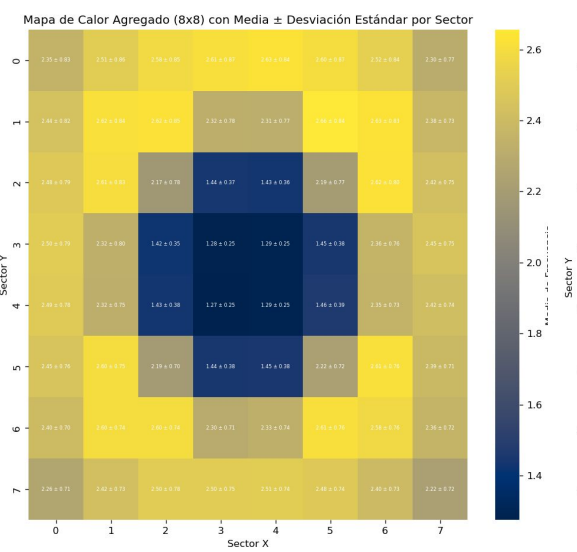
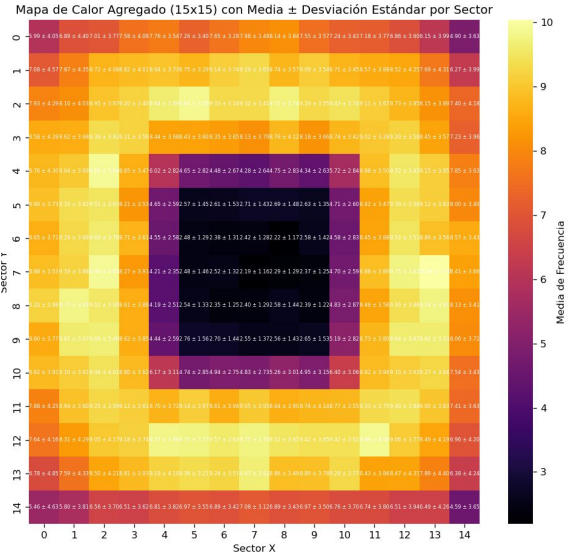
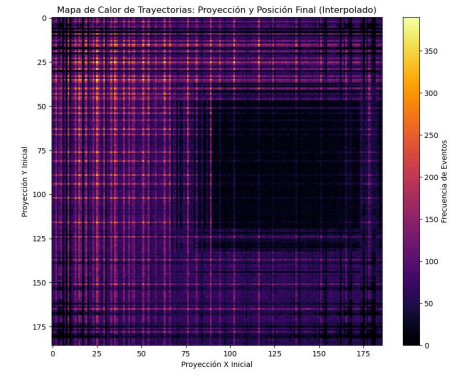
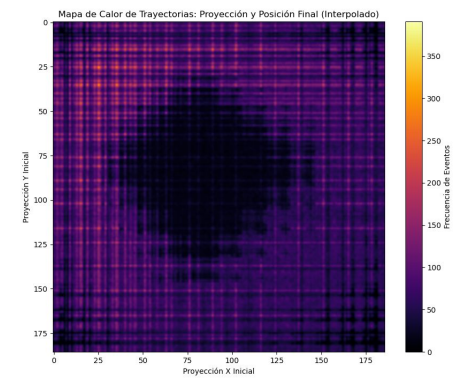
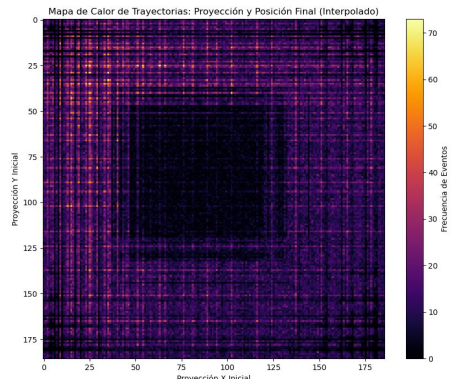


# Simulación: Centrado, rotado z 45° y desplazado.

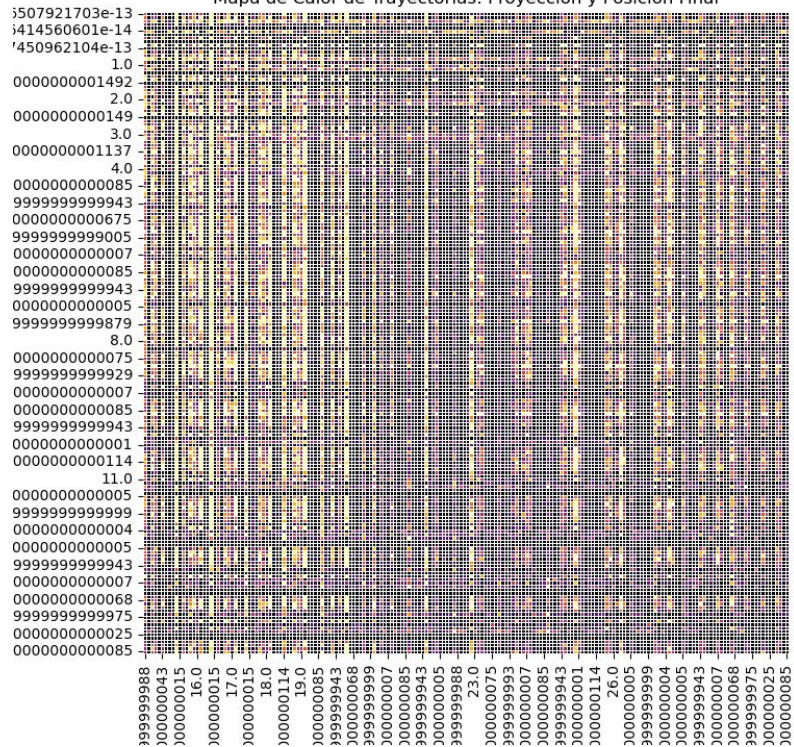


Radio 0.6 m<sup>2</sup>, a 5 cm del objetivo , 1 m de distancia entre paneles, Cubo de 30 cm a 10 cm del panel 1 Simulados 12 H de flujo: 55774053 particulas.

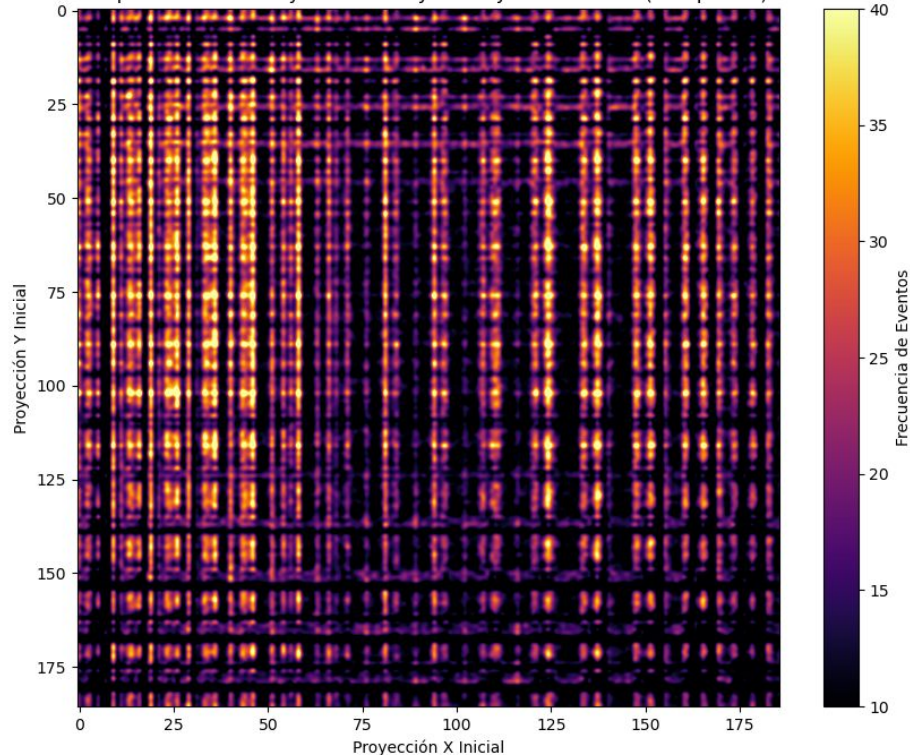




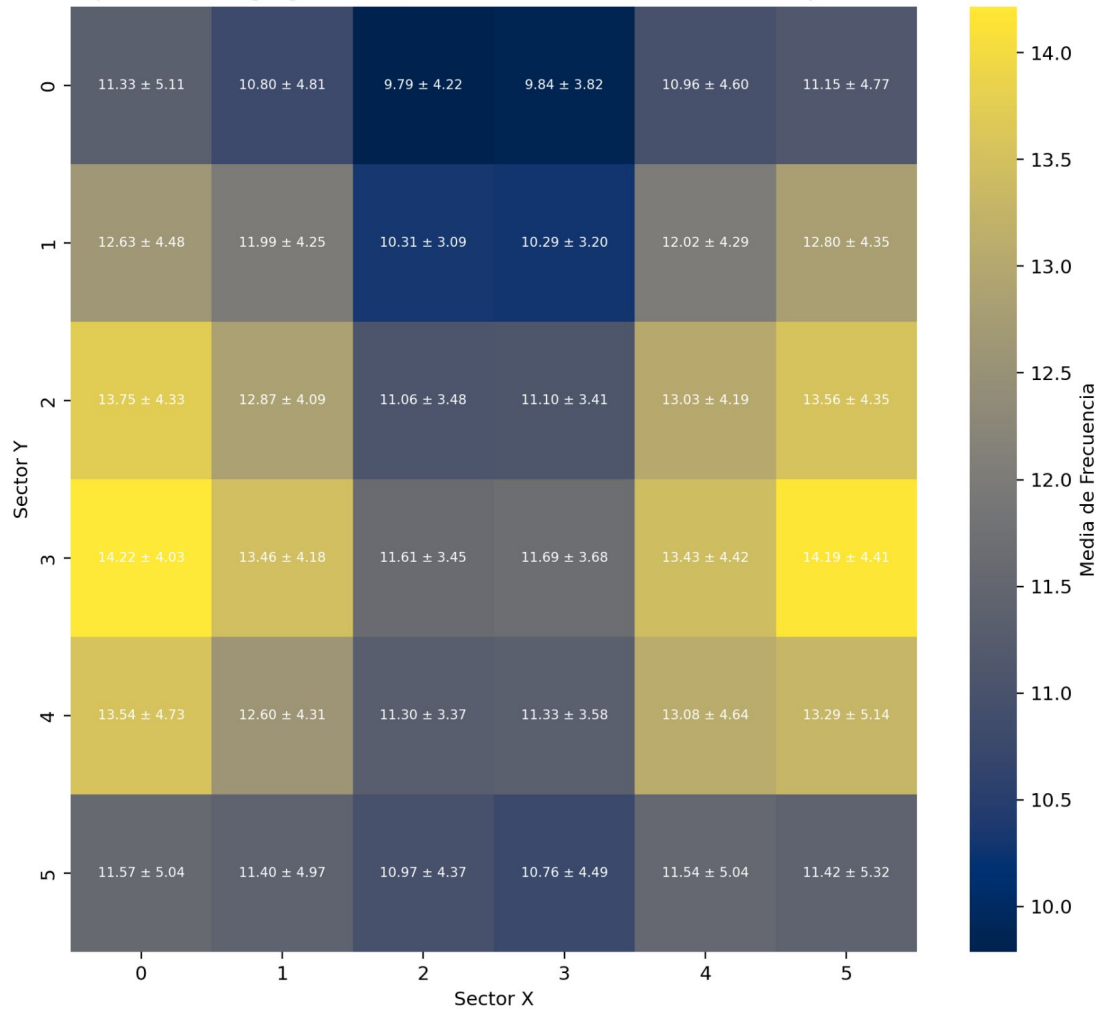
Mapa de Calor de Trayectorias: Proyección y Posición Final



Mapa de Calor de Trayectorias: Proyección y Posición Final (Interpolado)



Mapa de Calor Agregado (6x6) con Media  $\pm$  Desviación Estándar por Sector





3	11	8	17
5	19	9	16
7	20	2	14
18	12	4	15

Regularización

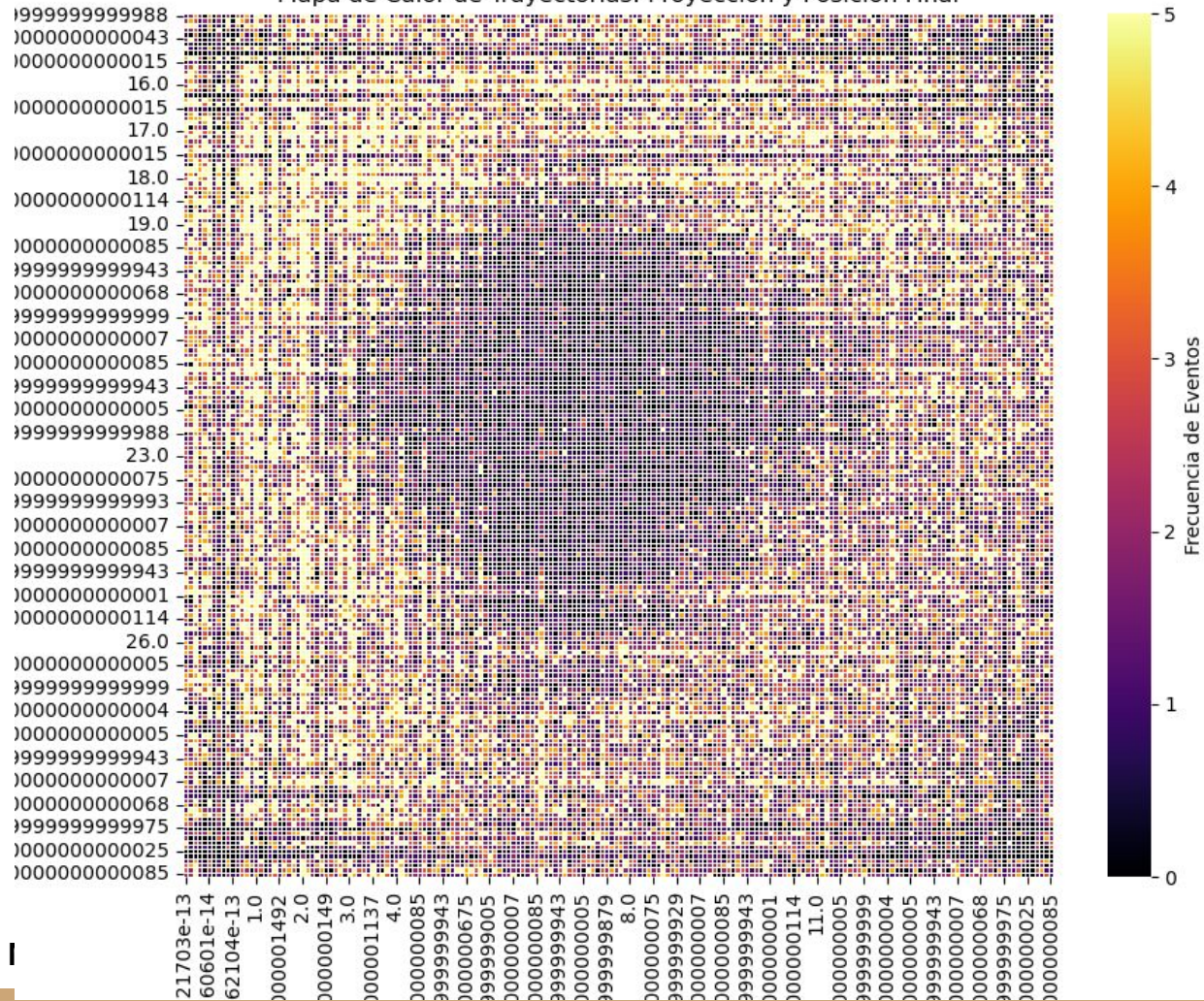


Si  $f_{\text{orig}}(x, y) \in [f_{\text{media}}(x, y) - N \cdot \sigma, f_{\text{media}}(x, y) + N \cdot \sigma]$   
entonces  $f_{\text{orig}}(x, y)$  no cambia, de lo contrario:  
 $f_{\text{nuevo}}(x, y) = (1 - w) \cdot f_{\text{media}}(x, y) + w \cdot f_{\text{orig}}(x, y)$

3	11	8	17
5	14	8	16
7	16	11	14
18	12	4	15

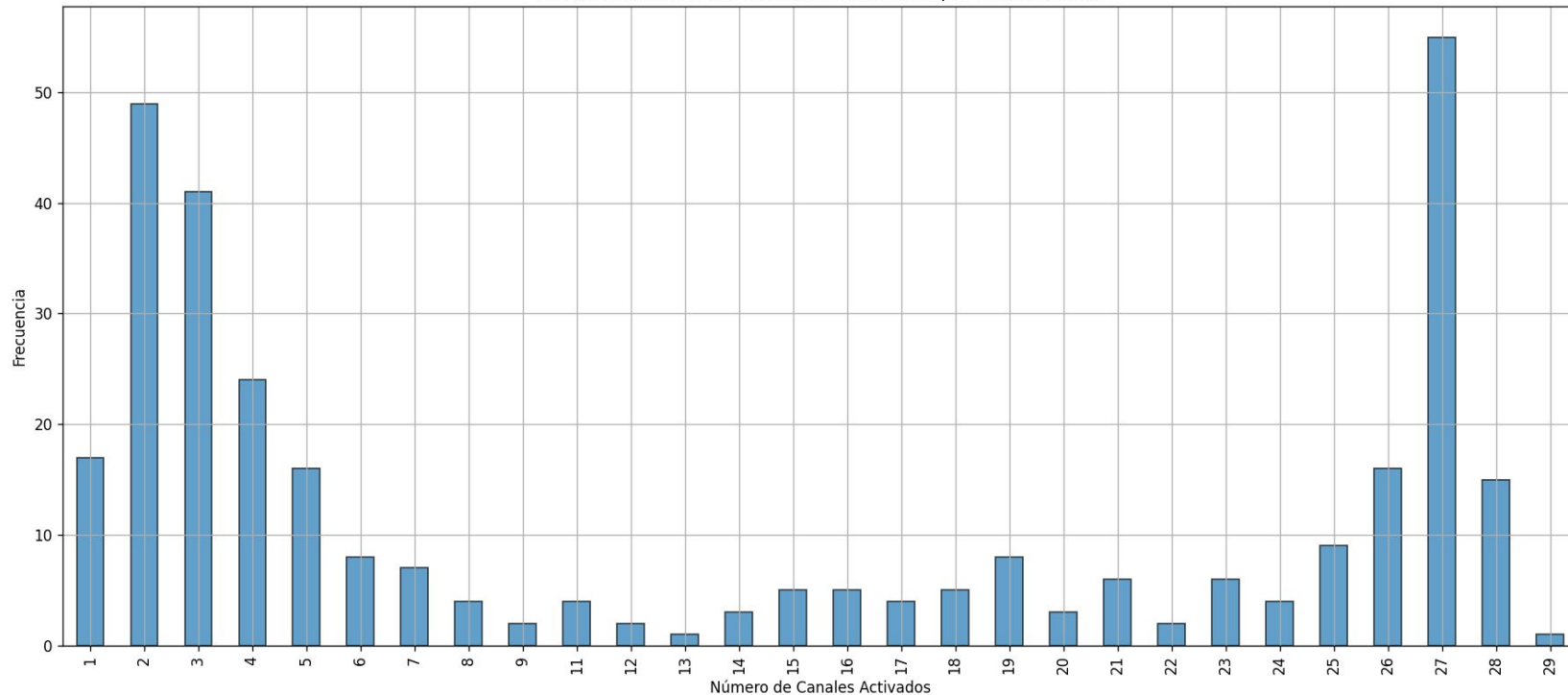
Y un nuevo enrejillamiento para calcular la media y std por región

# Mapa de Calor de Trayectorias: Proyección y Posición Final



## Datos Exp: # de canales activados por evento

Frecuencia de Número de Canales Activados por Evento (ch05)



# Resultados de la simulación

Frecuencia de Número de Canales Activados por Evento (ch09)

