

# Reconstrucción del centro de chubascos de partículas de altas energías en MATHUSLA

Asto Rojas, Omar Moises; UNI; Perú

## SUPERVISORES

- Arteaga Velázquez, Juan Carlos ; UMSNH; México
- Caballero Mora, Karen Salomé; UNACH; México
- Solano Salinas, Carlos Javier; UNI; Perú



Latin American alliance for  
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea





**MATHUSLA y su relación con Rayos  
Cósmicos (RC)**

**Obtención de datos simulados**

**Reconstrucción del centro**

**Análisis de las reconstrucción**

**Conclusiones**

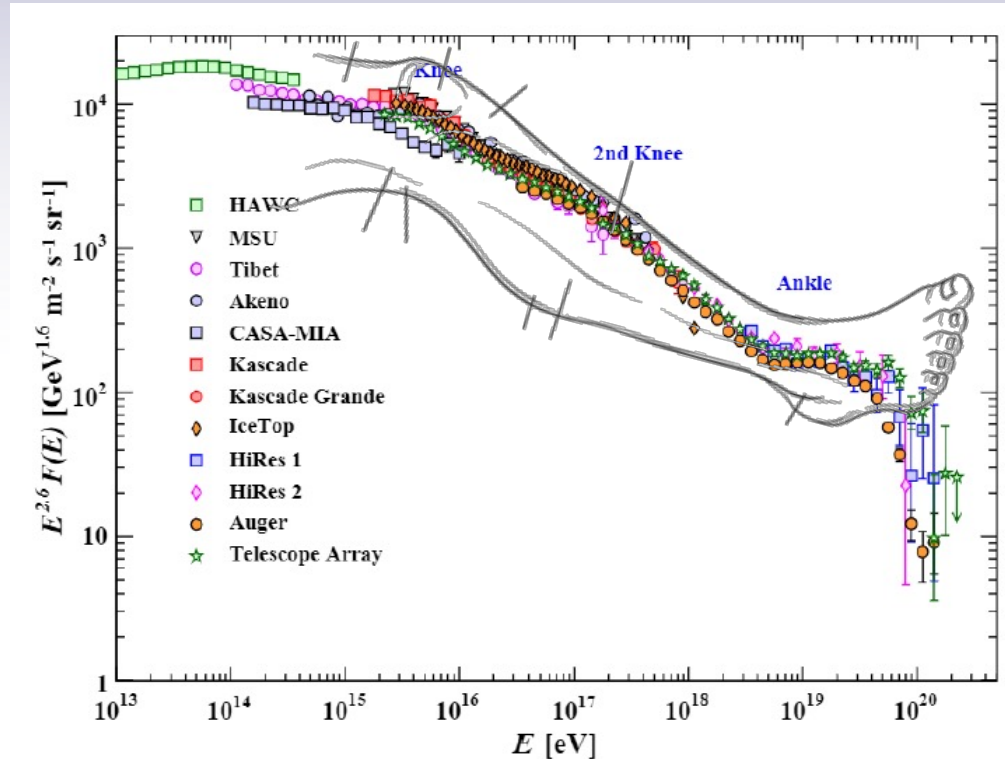


# MATHUSLA y su relación con RC

¿QUÉ ES UN RAYO CÓSMICO?

ESPECTRO DE RC

$E^{-\gamma}$ : Ley de potencias  
 $\gamma$ : índice espectral



El espectro total de RC como función de E (energía por núcleo) obtenido de las mediciones de chubascos de partículas; (PDG – 2021)



# MATHUSLA y su relación con los RC)

¿QUÉ ES UN RAYO CÓSMICO?

ESPECTRO DE RC

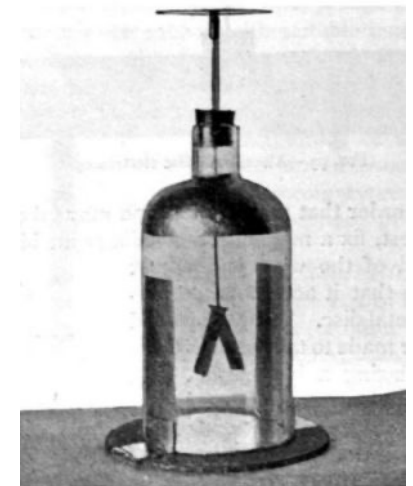
DESCUBRIMIENTO

VICTOR HESS - 1912



Victor Hess (1883 - 1964), PN – 1936; Bertolotti, M. (2012). Springer Science & Business Media.

Electroscopio de la época.  
Hess, V. F. (1911). *Akad. Wiss.(Wien)*,  
*Ila*, 120, 1205-1212.





# MATHUSLA y su relación con los RC

¿QUÉ ES UN RAYO CÓSMICO?

ESPECTRO DE RC

DESCUBRIMIENTO

VICTOR HESS - 1912

PROBLEMAS ABIERTOS

FUENTES

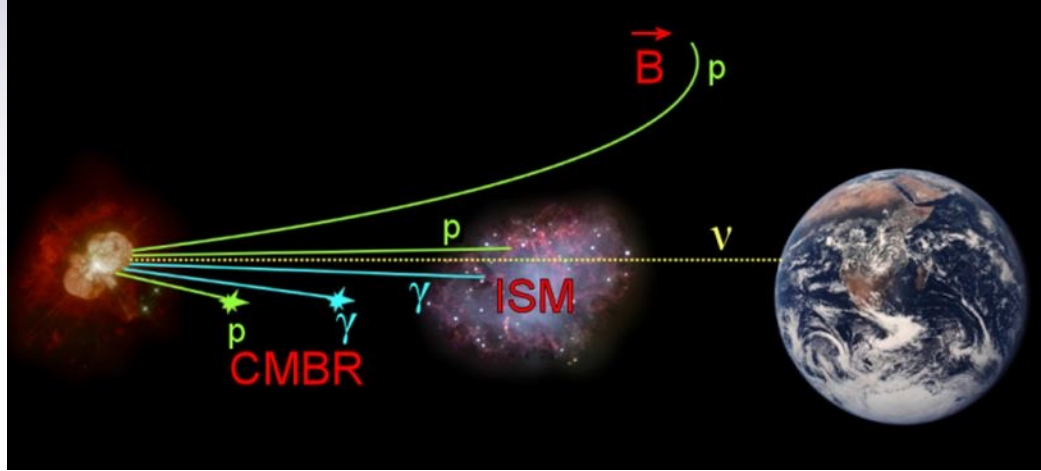
ACELERACIÓN  
(¿Cómo? y ¿Dónde?)

FORMA DEL ESPECTRO

PROPAGACIÓN



Un remanente masivo de supernova, N63A; NASA/ESA/HEIC/The Hubble Heritage Team



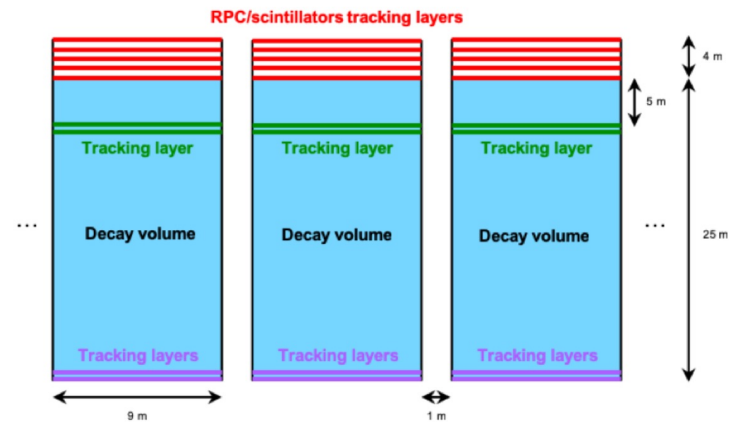
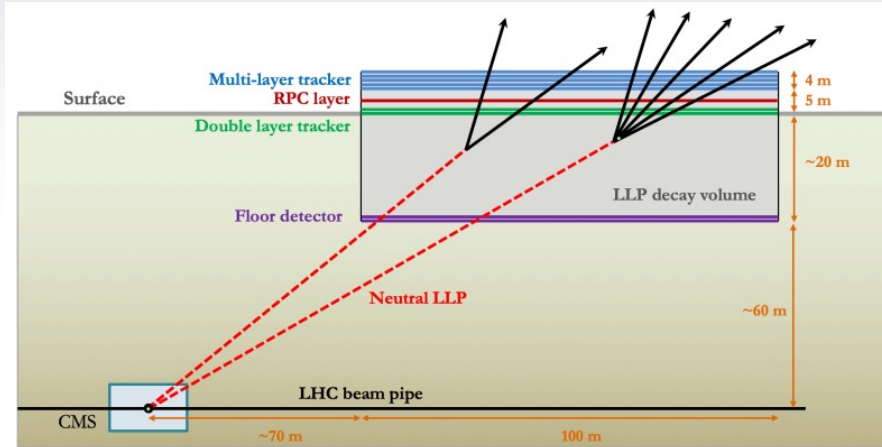
Propagación de los RC a través del espacio.



# MATHUSLA y su relación con los RC

MATHUSLA

Detector de partículas de larga vida.



FORMAS DE DETECCIÓN

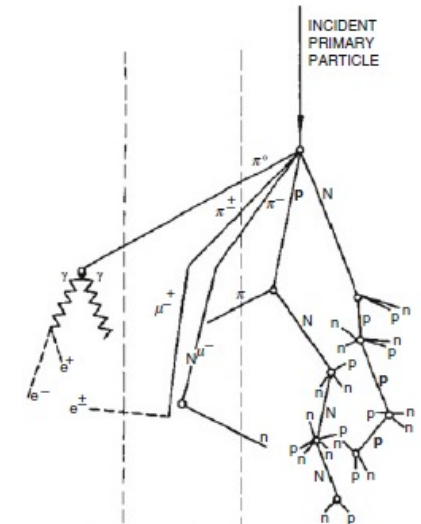
DIRECTA

INDIRECTA

CHUBASCOS DE PARTÍCULAS

Vista esquemática del detector MATHUSLA.

Alpigiani, C., et al.,  
*arXiv:2009.01693* (2020).





# MATHUSLA y su relación con los RC

MATHUSLA

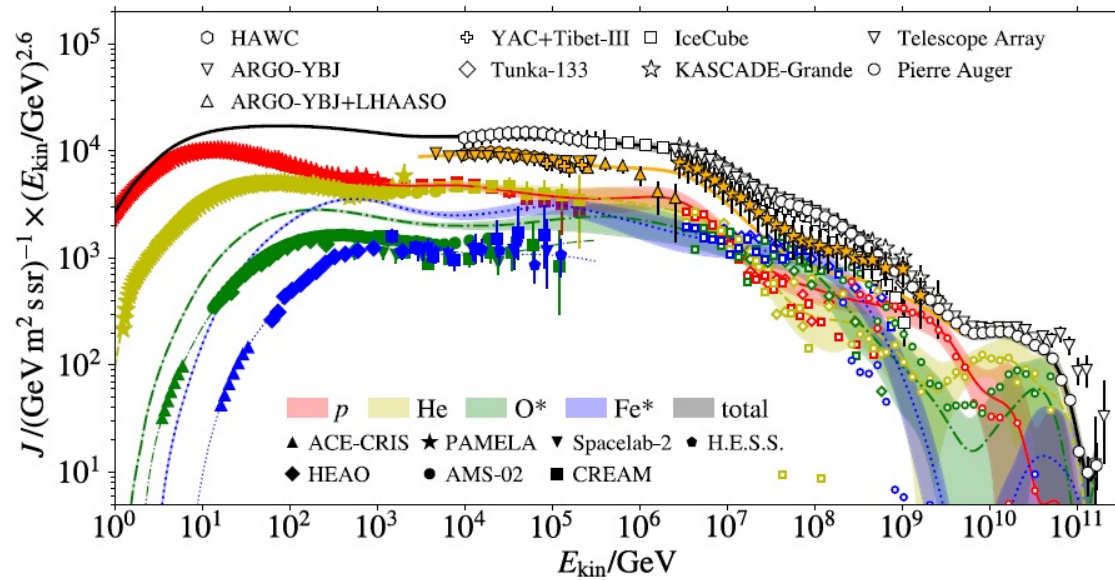


$(10^5 - 10^8) GeV$

PESADOS

LIGEROS

AMBOS



Ajuste combinado del espectro de RC y su composición (H. Dembinski et al., PoS(ICRC2017), 533)

FORMAS DE DETECCIÓN

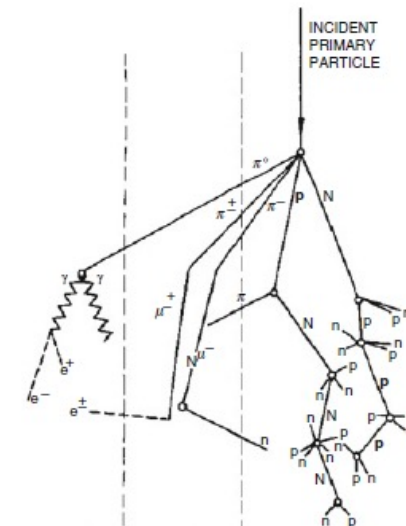
DIRECTA

INDIRECTA

CHUBASCOS DE PARTÍCULAS

MATHUSLA

- LHC, CERN SUIZA  
- PROPUESTA EXPERIMENTAL





# Obtención de datos simulados

CORSIKA

FRAMEWORK PARA SIMULAR  
CHUBASCOS DE PARTÍCULAS  
PRODUCIDAS POR LOS RC

## CORSIKA 76900

<b>MODELO HADRÓNICO PARA ALTAS ENERGÍAS</b>	QGSJET-II-04 *
<b>MODELO HADRÓNICO PARA BAJAS ENERGÍAS (&lt; 200 GeV)</b>	GHEISHA **
<b>PARTÍCULAS</b>	H, Fe
<b>RANGO DE ENERGÍA</b>	10 TeV - 10PeV
<b>RANGO CENITAL</b>	0° – 20°
<b>MODELO ATMOSFÉRICO</b>	STANDARD US MODEL CURVED***
<b>CAMPO MAGNÉTICO ****</b>	$B_x = 22.506 \mu T; B_y = 41.325 \mu T$
<b>NIVEL DE OBSERVACIÓN</b>	436 m s. n. m. (Altura De ATLAS)

\*Kalmykov, N. N., S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov " Nuclear Physics B-Proceedings Supplements 52.3 (1997): 17-28.

\*\*Application Software Group, GEANT, CERN Program Library (1994)

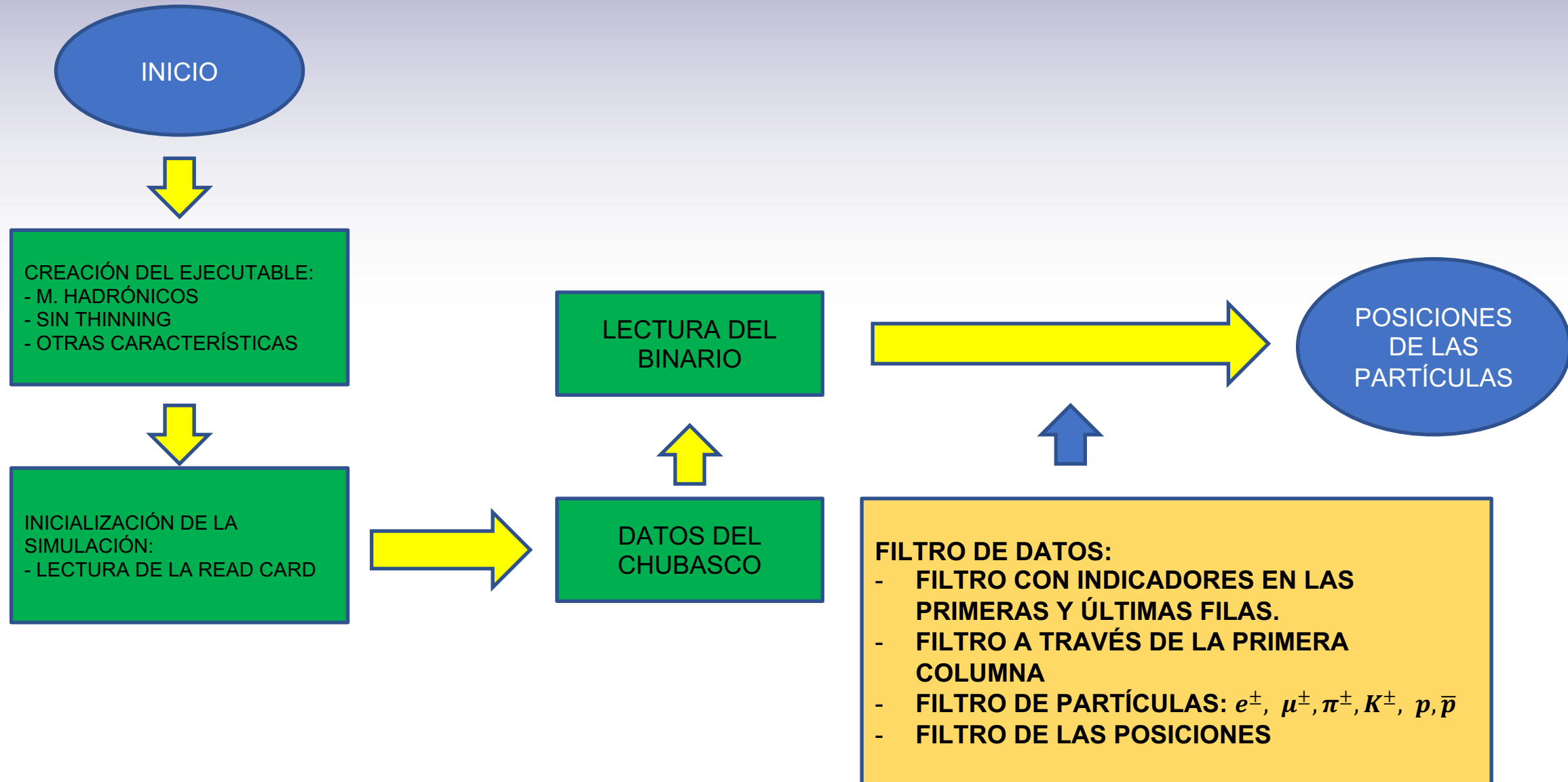
\*\*\*J. Linsley, private communication by M. Hillas (1988)

\*\*\*\*Datos obtenidos de: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>



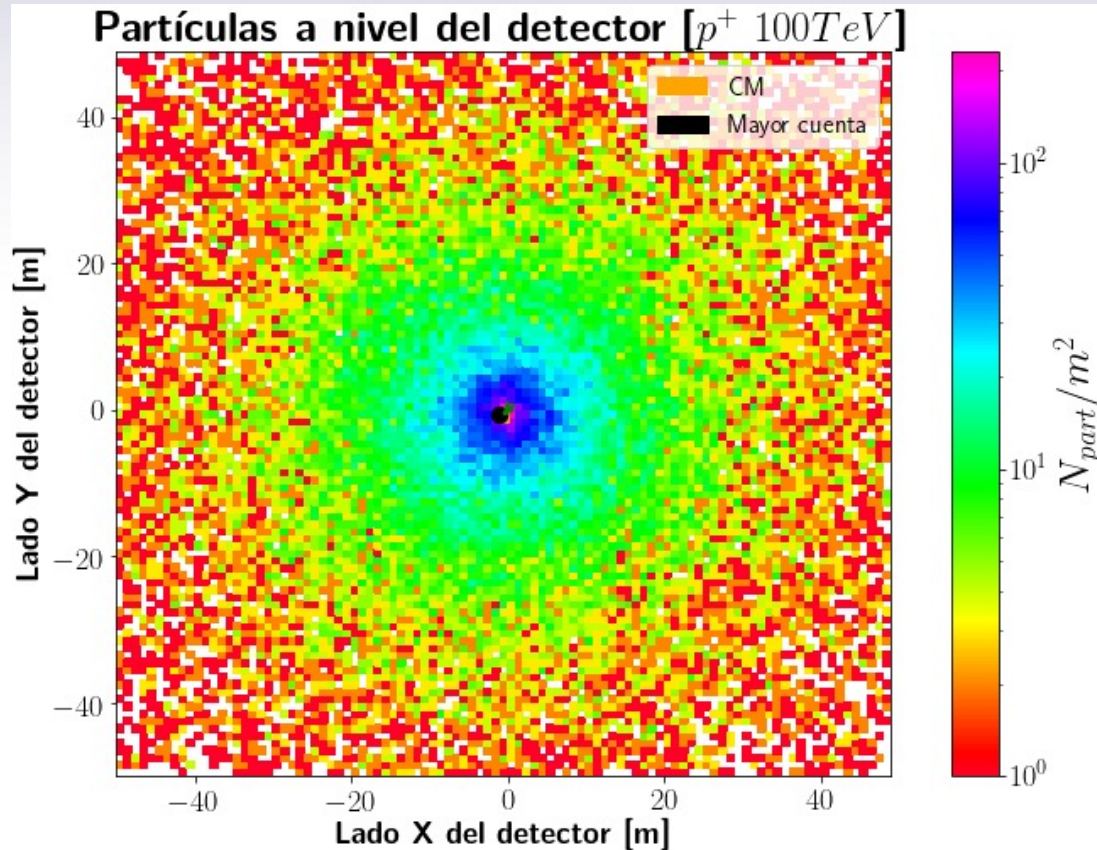


# Obtención de datos simulados





# Reconstrucción del centro



Búsqueda del centro del chubasco

Mayor Cuenta  
Primera Aproximación

Centro de masa o baricentro  
Segunda Aproximación

Proyecciones 1D  
Tercera Aproximación

Distribución de carga 3D  
Cuarta Aproximación

Función NKG  
Quinta Aproximación

$(x_{true}; y_{true})$

Coor.  
verdaderas

$(x_{rec}; y_{rec})$

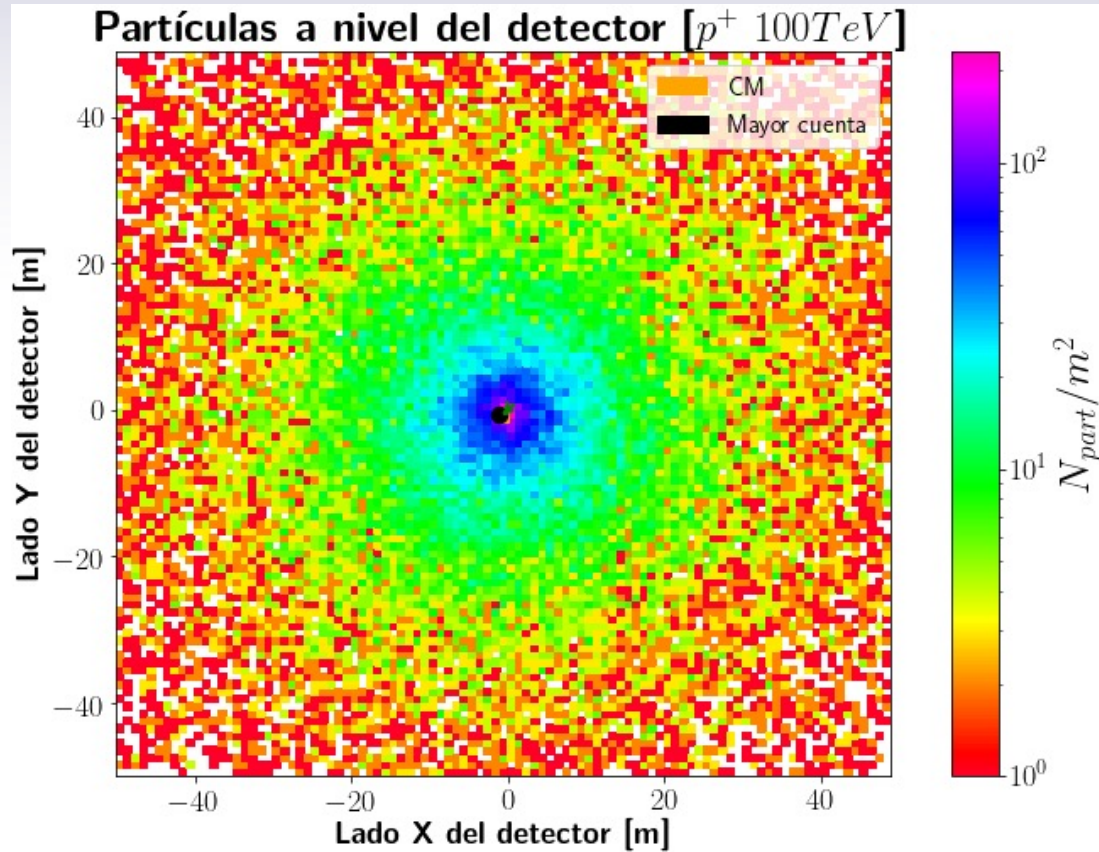
Coor.  
reconstruidas



$$\Delta r = \sqrt{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2}$$



# Reconstrucción del centro



## Búsqueda del centro del chubasco

$$(x_{true}; y_{true}) = (0\text{ m}, 0\text{ m})$$

## MAYOR CUENTA

$$(x_{MC}; y_{MC}) = (-1\text{ m}; -1\text{ m})$$

$$\Delta r = 1.4\text{ m}$$

## CENTRO DE MASAS

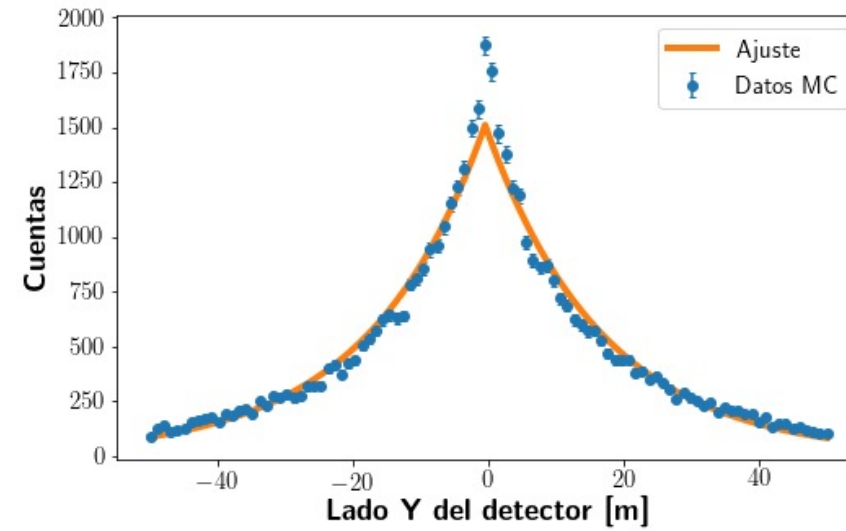
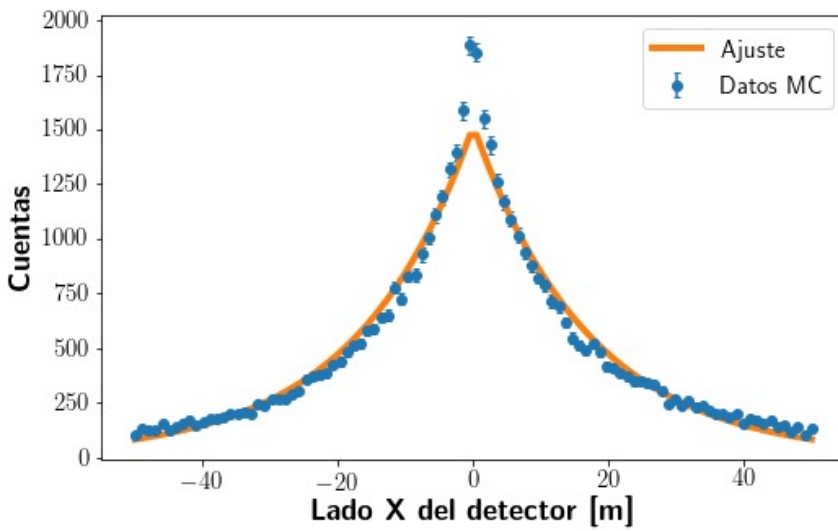
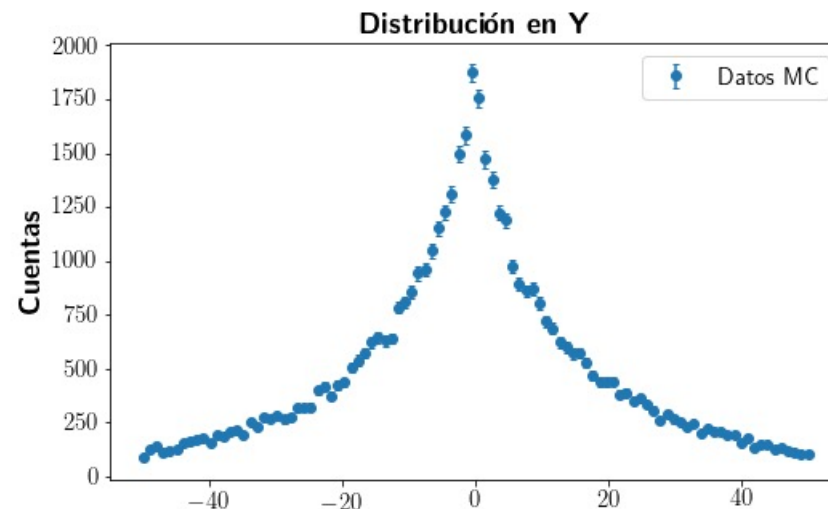
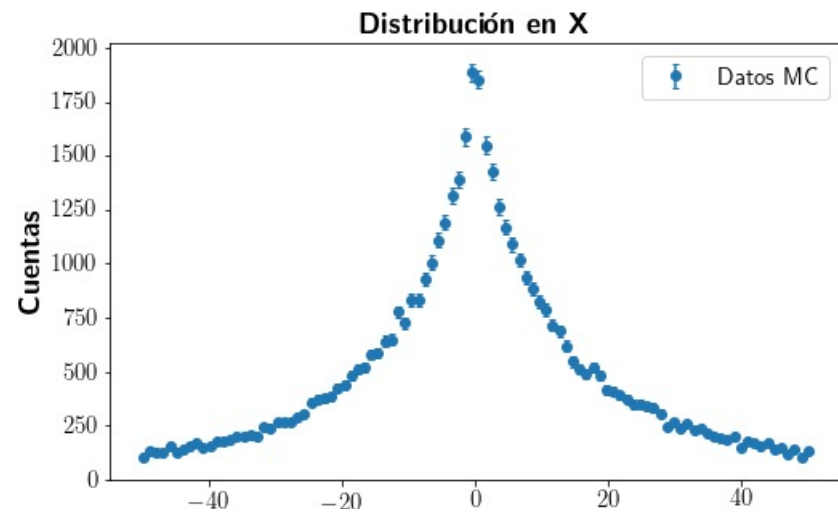
$$X_{CM} = \sum \frac{m_i x_i}{M} \quad Y_{CM} = \sum \frac{m_i y_i}{M}$$

$$(x_{CM}; y_{CM}) = (-0.35\text{ m}; -0,86\text{ m})$$

$$\Delta r = 0.93\text{ m}$$



# Reconstrucción del centro



## TERCERA APROXIMACIÓN

$$f(x) = a e^{-b|x-x_c|}$$

$$f(y) = a e^{-b|y-y_c|}$$

Donde  $a, b, x_c, y_c$ : parámetros libres

$(x_{CM}; y_{CM})$ ; MC: Parámetros iniciales

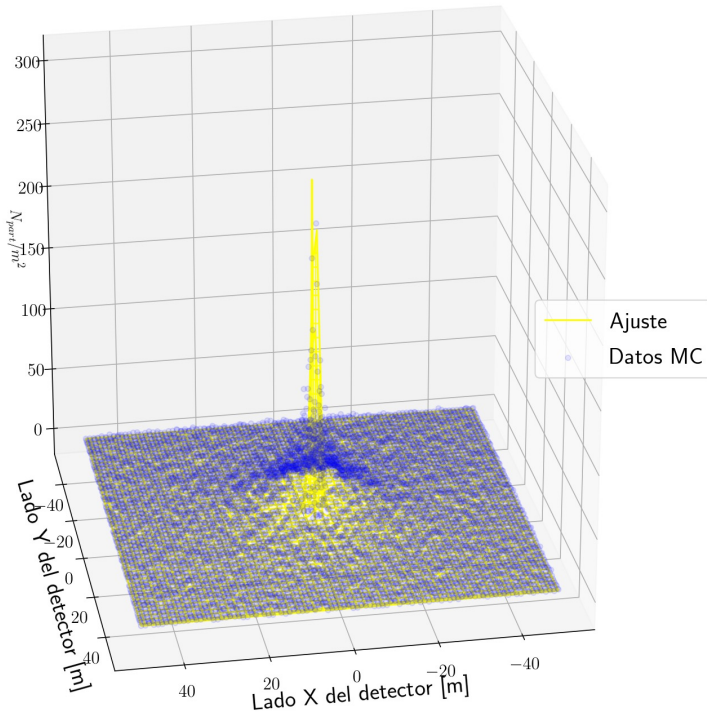
$$(x_{Center}; y_{Center}) = (-0.5 \text{ m}; 0 \text{ m})$$

$$\Delta r = 0.5 \text{ m}$$



# Reconstrucción del centro

Partículas a nivel del detector [ $p^+ 100 \text{ TeV}$ ]



$$\omega_i = n_e e^{-0.5} (r_i / 15)^2 *$$

$$(x_{Center}; y_{Center}) = (-0.7 \text{ m}; -1 \text{ m})$$

$$\Delta r = 1.2 \text{ m}$$

Donde  $n_e, x_c, y_c$ : parámetros libres

AJUSTE 3D

Cuarta aproximación

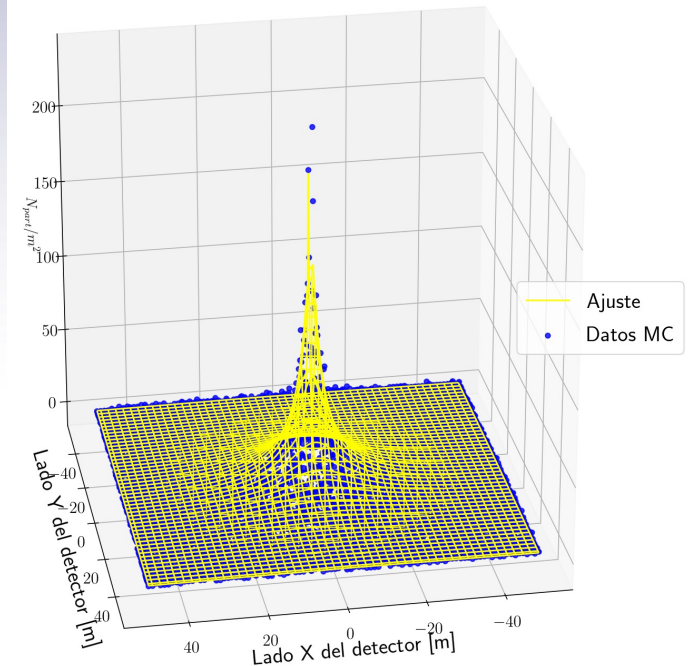
Función Nishimura-Kamata-Greisen (NKG)  
Quinta Aproximación

$$r_i = \sqrt{(x_{CM} - x_i)^2 + (y_{CM} - y_i)^2}$$

$(x_{CM}; y_{CM})$ ; MC: Parámetros iniciales  
 $s$ : edad del chubasco

$r_m$  (Radio de Moliere) = 30 m

Partículas a nivel del detector [ $p^+ 100 \text{ TeV}$ ]



$$\rho(r) = \frac{N_{size}}{2\pi r_m^2} \frac{\Gamma(4.5 - s)}{\Gamma(s - 0.3)\Gamma(5 - 2s)} \left(\frac{r_i}{r_m}\right)^{s-2.5} \left(1 + \frac{r_i}{r_m}\right)^{s-4.5}$$

$$(x_{Center}; y_{Center}) = (-0.5 \text{ m}; -0.9 \text{ m})$$

$$\Delta r = 1 \text{ m}$$

Donde  $A(r_m, s), x_c, y_c, r_m, s$ : parámetros libres

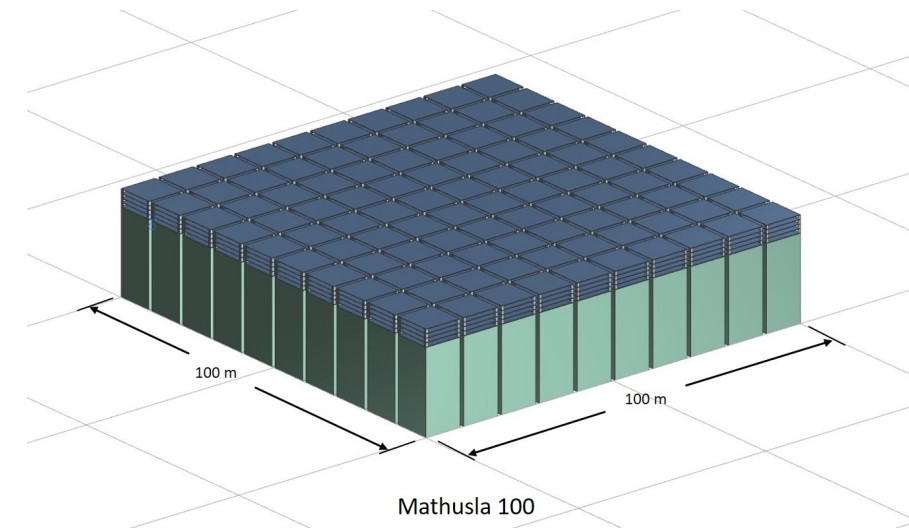
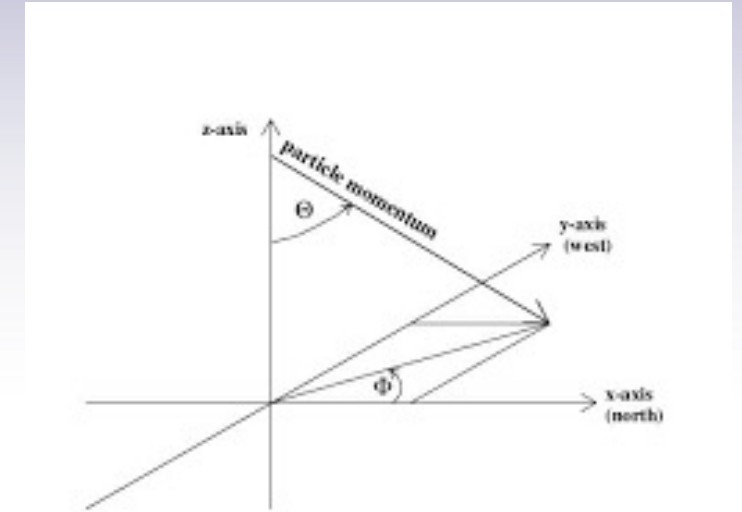
\*Aharonian, F., et al., *Chinese Physics C* 45.2 (2021): 025002.



# Análisis de las reconstrucción



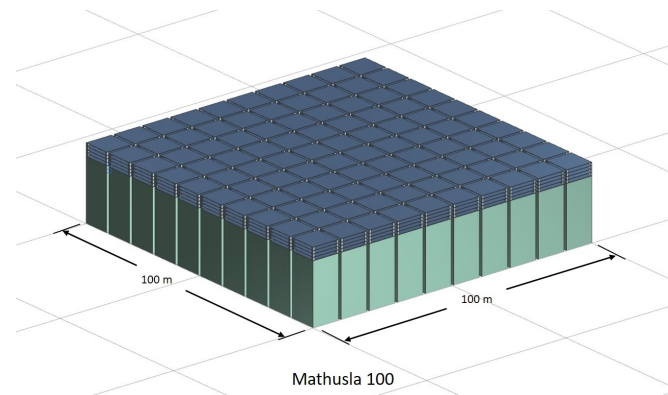
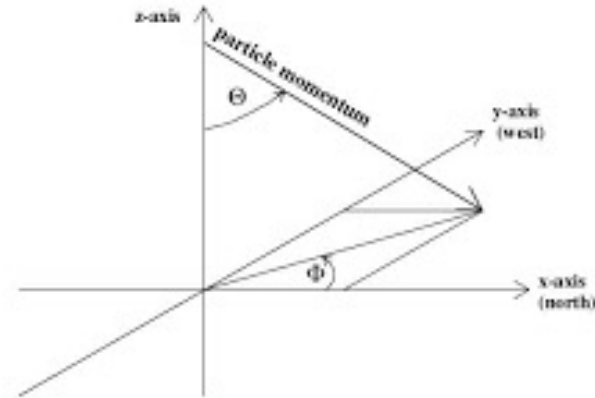
¿Cómo es el  
ajuste si se  
cambia el punto  
de  
impacto del  
chubasco?





# Análisis de las reconstrucción

¿Cómo es el ajuste si se varía el centro del chubasco?

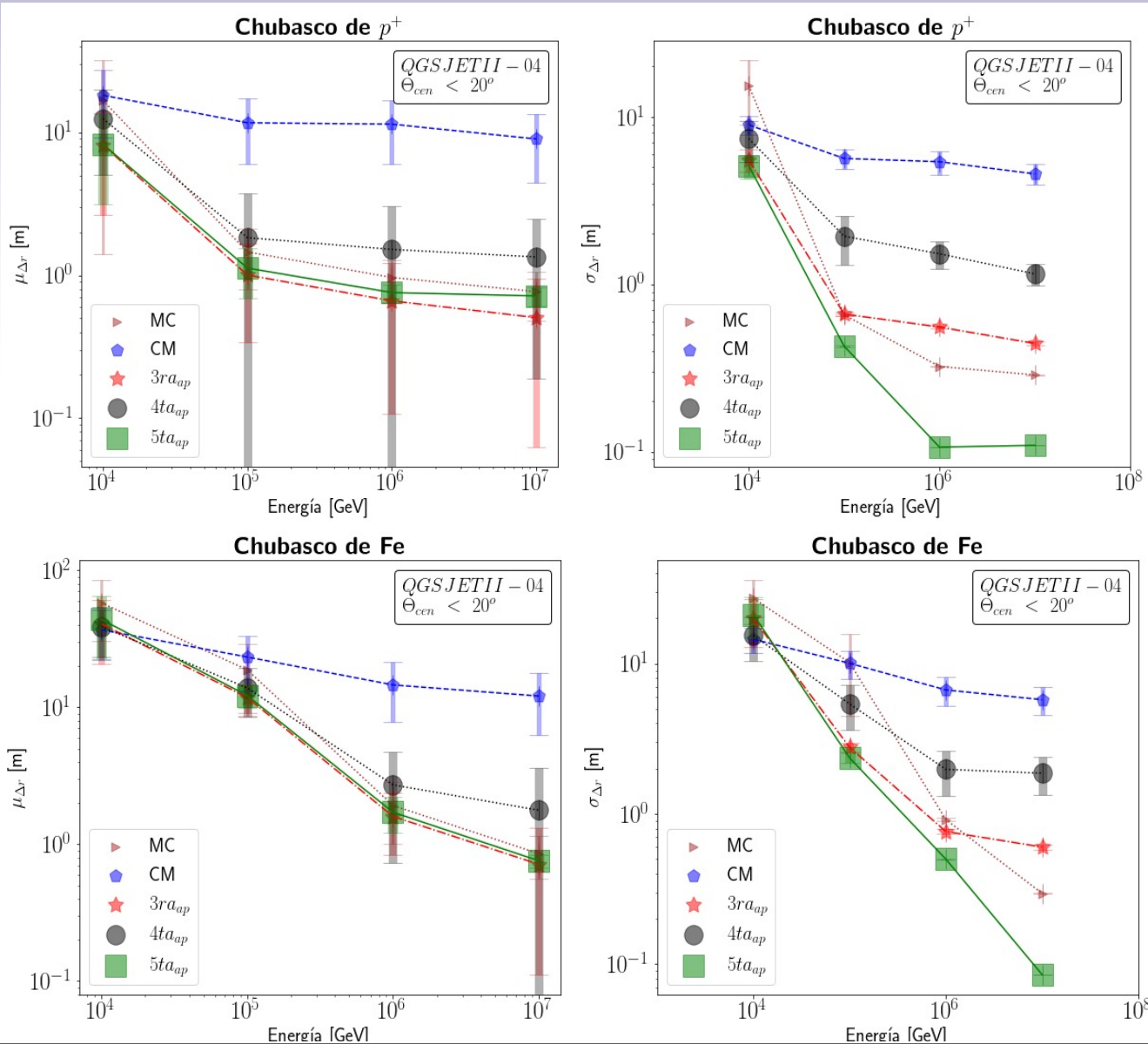


TRASLACIONES ALEATORIAS ALREDEDOR DE LA SUPERFICIE DEL DETECTOR

Nº Simulaciones	Energía (TeV)	Nº Cascadas por simulaciones
15	10	10
15	$10^2$	10
5	$10^3$	5
5	$10^4$	5



# Análisis de las reconstrucción



Media del error o “bias” como función de la energía.

Desviación estándar del error o resolución como función de la energía

¿Cómo se comporta el ajuste en función de dónde está el centro del chubasco?

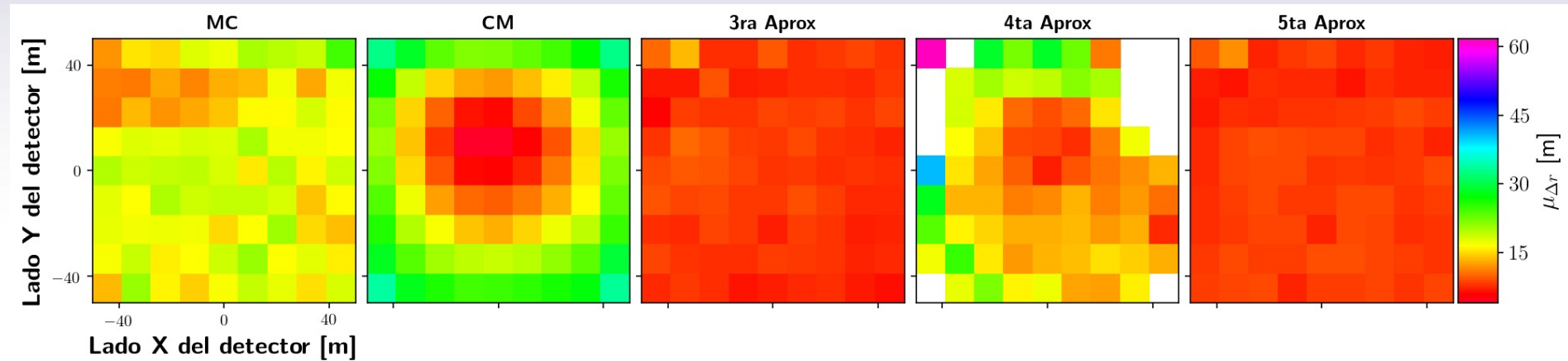




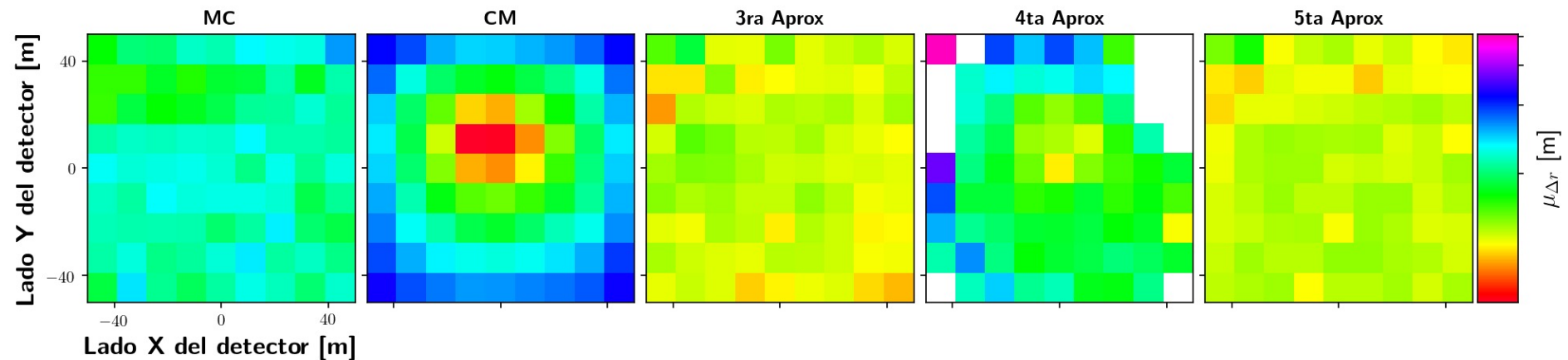
# Análisis de las reconstrucción

Promedio del error sistemático en la localización del centro de chubascos de partículas en la RPC de MATHUSLA como función del punto de impacto del chubasco para protones de 10 TeV usando diferentes técnicas de reconstrucción.

## Escala Normal



## Escala Logarítmica

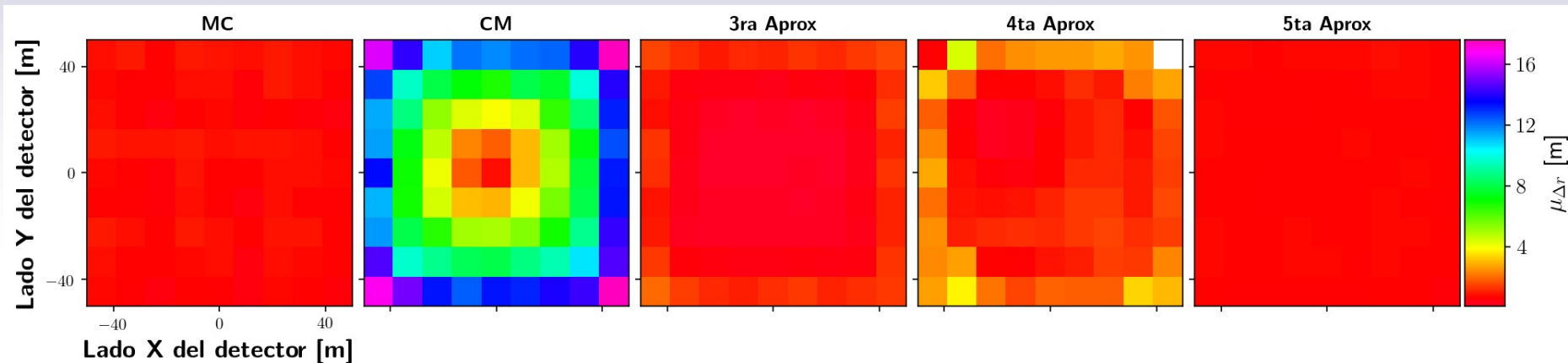




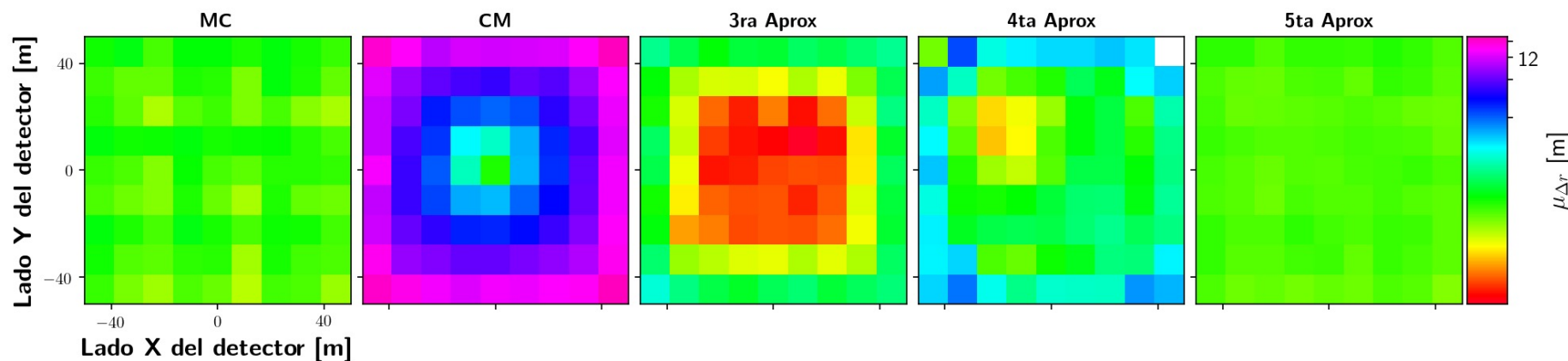
# Análisis de las reconstrucción

Promedio del error sistemático en la localización del centro de chubascos de partículas en la RPC de MATHUSLA como función del punto de impacto del chubasco para protones de 10 PeV usando diferentes técnicas de reconstrucción.

## Escala Normal



## Escala Logarítmica





- Se estudio el desempeño de diferentes técnicas para hallar el centro de chubascos de partículas en la RPC de MATHUSLA.
- Las técnicas basadas en ajustes de las proyecciones 1D de la carga depositada con funciones exponenciales y en ajustes de la distribución de carga 3D con una función NKG dan los mejores resultados a diferentes energías. En el caso del segundo método la precisión lograda es mucho mejor.
- La técnica basada en la búsqueda de la posición del detector con mayor cuenta muestra una menor exactitud a bajas energías, pero se incrementa a altas energías.
- El método basado en la búsqueda del baricentro de la distribución, en general, ofrece una menor exactitud y precisión, pero puede usarse para brindar una primera aproximación de la posición del centro del chubasco.



- El método que emplea un ajuste de la distribución tridimensional de la carga con la función radial usada por LHAASO ofrece un menor desempeño que los ajustes con la función NKG en 3D y las funciones exponenciales en 1D, pero mejor que la técnica basada en la búsqueda del baricentro.
- En general, los errores sistemáticos en la localización del centro del chubasco son menores cuando este impacta en el centro del detector.



# Próximos objetivos

- Extender este tipo de estudios para ángulos mayores.
- Mejorar el análisis estadístico del estudio.
- Incrementar la cantidad de datos usados en el análisis.



<http://laconga.redclara.net>



[contacto@laconga.redclara.net](mailto:contacto@laconga.redclara.net)



lacongaphysics



Latin American alliance for  
Capacity buildiNG in Advanced physics

**LA-CoNGA physics**



Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea

El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.