

# Implementación de un modelo detector Cherenkov en Geant4 para detectar neutrones térmicos



Aniversario  
UIS 1948 - 2023

Legado académico y cultural de los santandereanos

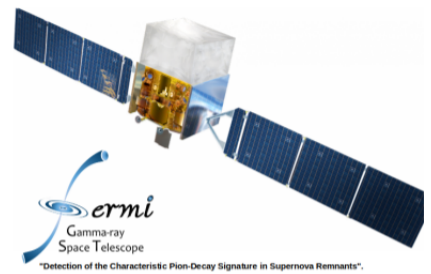
Jaime A. Betancourt M<sup>1</sup>,  
Luis Alberto Núñez de Villavicencio<sup>1</sup>,  
Christian Sarmiento Cano<sup>1</sup>,  
Jesús Peña Rodríguez<sup>2</sup>.

1. Escuela de Física. Universidad Industrial de Santander
2. Bergische Universität Wuppertal, Alemania.

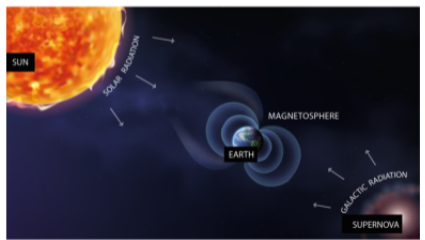
## 3er Encuentro Internacional Julio Garavito (13nov- 15nov).

Alianzas estratégicas entre Europa y Colombia.

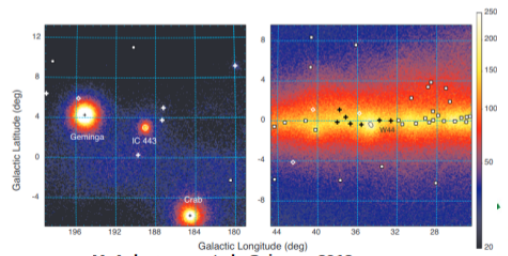
# ¿Qué son los rayos cósmicos?

"Detection of the Characteristic Pion-Decay Signature in Supernova Remnants".



<https://www.iaea.org/es/newscenter/news/radiacion-cosmica-por-que-no-deberia-ser-motivo-de-preocupacion-en-ingles>

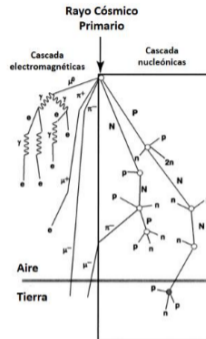
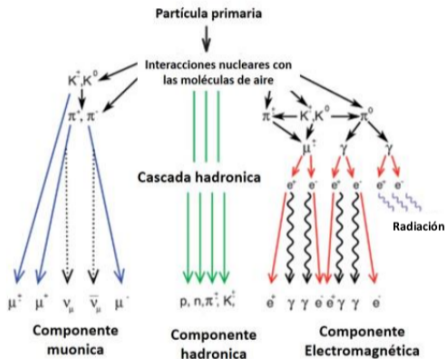


M. Ackermann et al. Science. 2013.

# Rayos cósmicos



Universidad Industrial de Santander



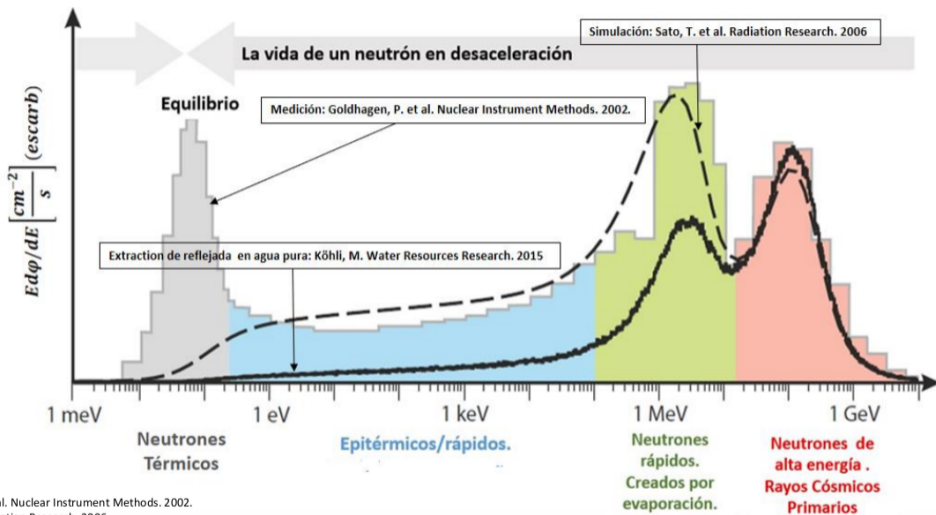
- N,P - Neutrones o protones de alta energía
- n,p - Evaporación de neutrones o protones
- $\pi$  - Pion
- $\mu$  - Muon
- e - Electrón
- $\gamma$  - Rayos gamma
- Desintegración nuclear

Gaisser, T. et al Cambridge: Cambridge University Press. 2016.

Andreasen, M. et al. Vadose Zone J. 2017.

Desilets, D. et al. Earth and Planetary Science Letters. 2001.

# Espectro de energía de los neutrones secundarios



Goldhagen, P. et al. Nuclear Instrument Methods. 2002.

Sato, T. et al. Radiation Research. 2006

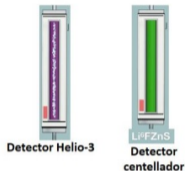
Köhli, M. Water Resources Research. 2015

# Método de neutrones cósmicos



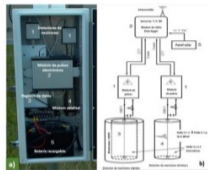
Universidad Industrial de Santander

Detectores de neutrones cósmicos

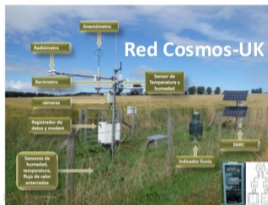


Stephan T. et al. Springer. 2010.

CRNS



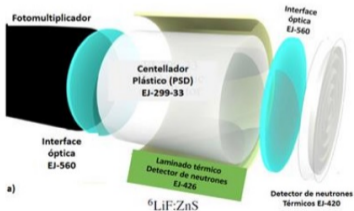
Zreda, M. Earth System Science. 2012.



Andreasen, M. et al. Vadose Zone J. 2017.



Suelo y Agua | COSMOS-Reino Unido (ceh.ac.uk)



Montaje del detector, Finapp.

Stevanato L. et al. Agriculture. 2019.

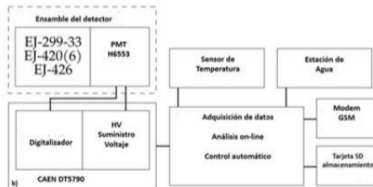
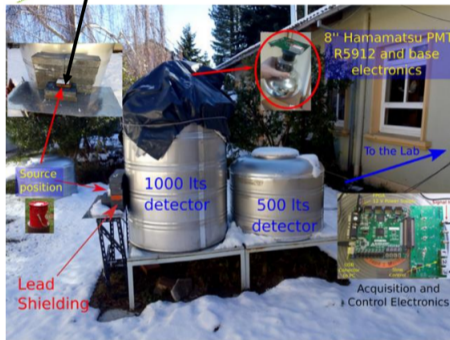


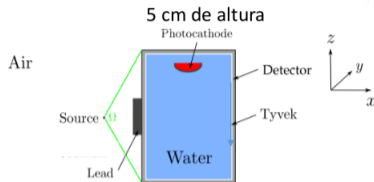
Diagrama de bloques del sistema adquisición de datos de la sonda.

# Medidas con neutrones de alta energía

A\_B-241 y Californio-252



Agua con un 2,5% de aditivo



Resultados experimentales de la eficiencia de detección en comparación con las simulaciones

Volumen sensible	Resultados experimentales (%)	Simulación (%)	Total de capturas (%)	
			<sup>1</sup> H (%)	<sup>35</sup> Cl (%)
Agua pura	19 ± 12	10.18	10.17	0
Agua + <sup>35</sup> Cl (2.5 %)	44 ± 10	24.19	15.57	7.91

Sidelnik, I. et al. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. 2019.



# Implementación del modelo en Geant4



## Modelo WCD

### Detector

1. Geometría
2. Materiales
3. Posición

### Dispositivo óptico

1. PMT

### Fuentes de partículas

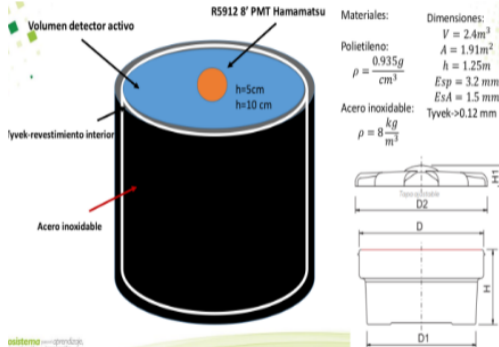
1. Tipos
2. Energía
3. Posición
4. Distribución angular

### Procesos de interacción

1. Transporte
  1. E.M.
  2. Hadronicos
    1. Dispersión
    2. Absorción

### Recopilación de datos

1. Interacción partículas con el detector
  1. Energía
  2. Posición
  3. Conteo
  4. Carga

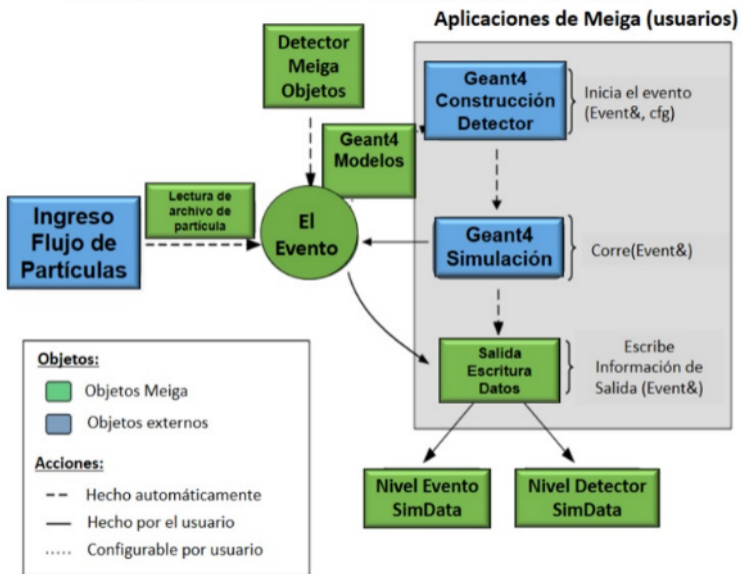




# Simulaciones: El Framework MEIGA



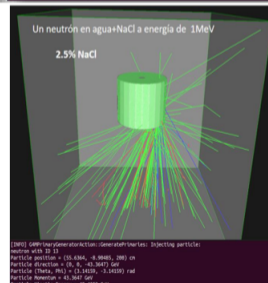
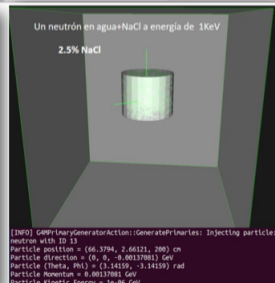
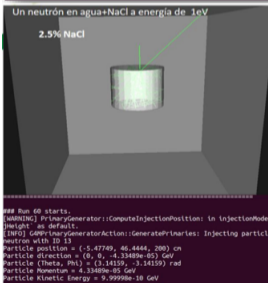
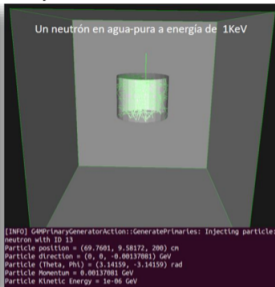
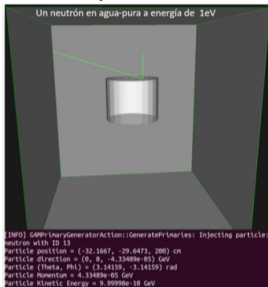
Universidad Industrial de Santander



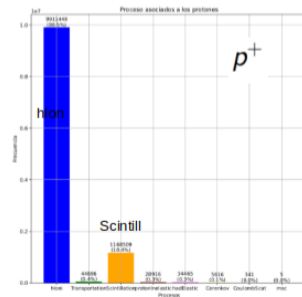
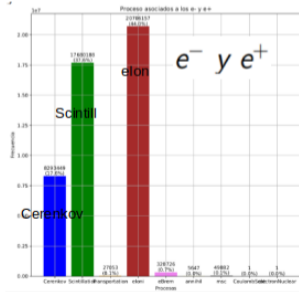
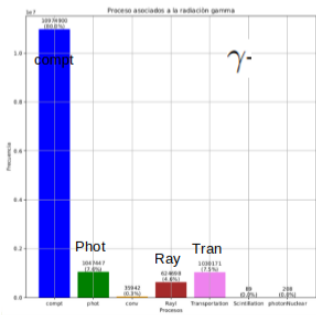
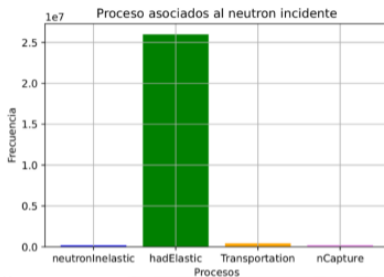
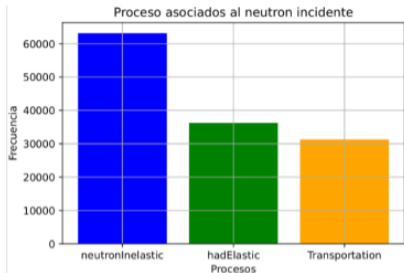
# Simulación (Modelo WCD)



Universidad  
Industrial de  
Santander



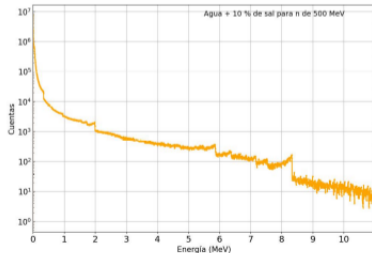
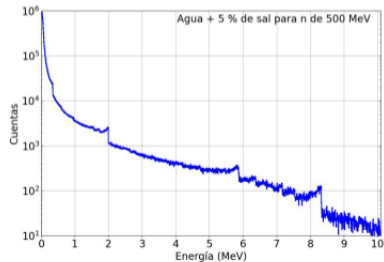
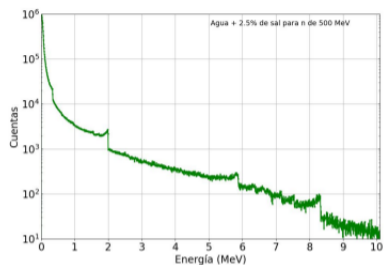
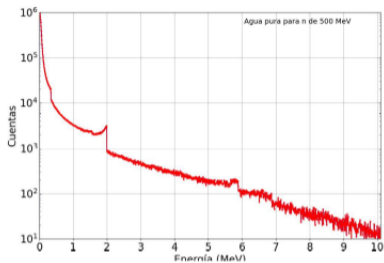
# Resumen estadístico de procesos (500 MeV)



# Espectro de energía de los electrones en el volumen.



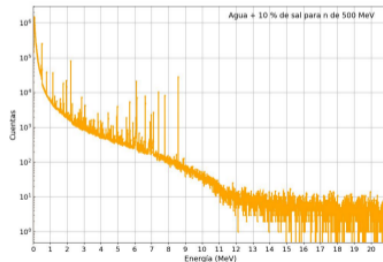
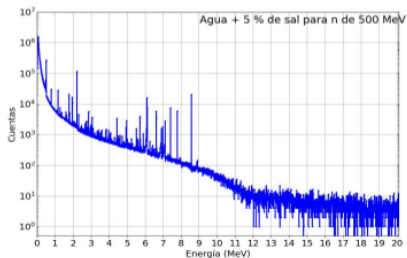
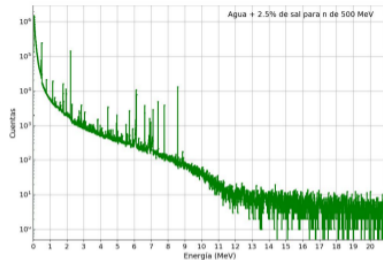
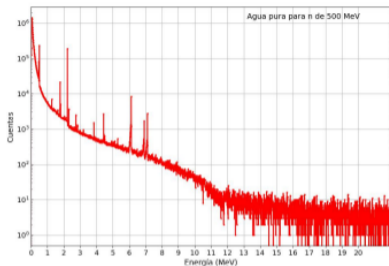
Universidad  
Industrial de  
Santander



# Espectro de energía de los gamma en el volumen.



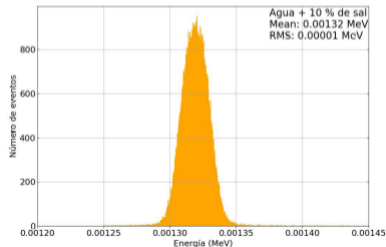
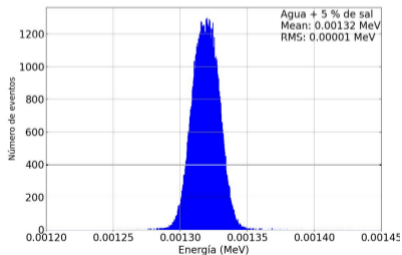
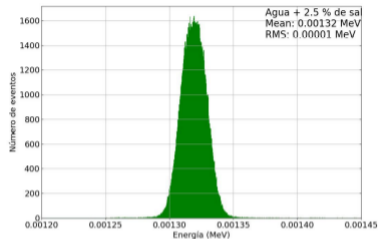
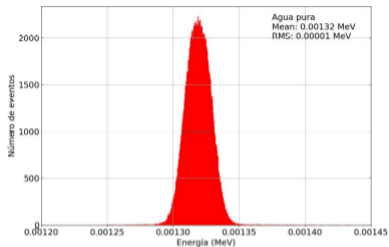
Universidad  
Industrial de  
Santander



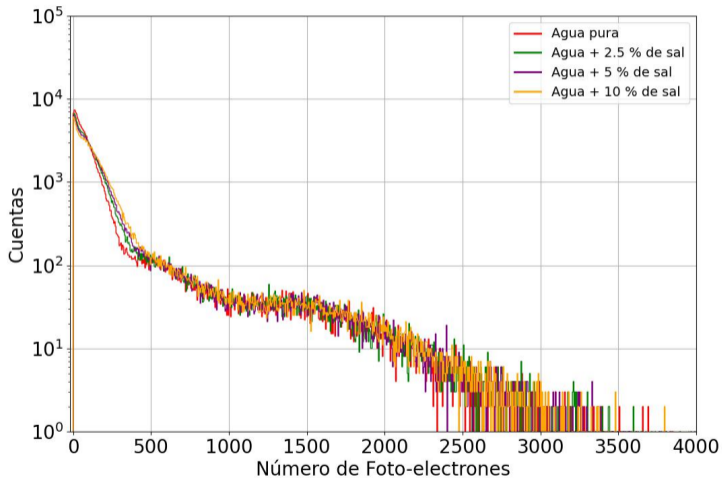
# Distribución de energía de los deuterones



Universidad  
Industrial de  
Santander



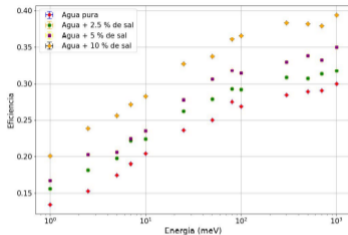
# Simulación (200000 N a 500 MeV)



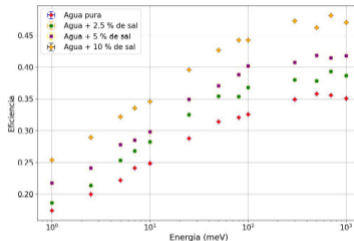
# Eficiencia captura de neutrones térmicos



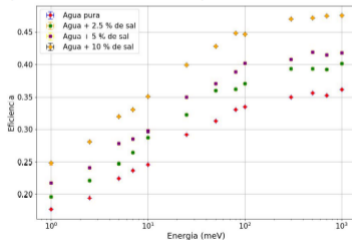
a) PMT borde superior



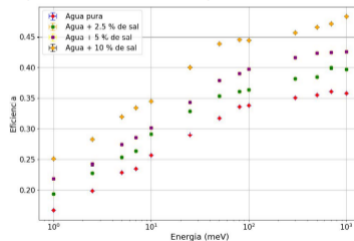
b) PMT 80 % la altura de tanque



c) PMT 50 % la altura de tanque



d) PMT en la mitad del tanque

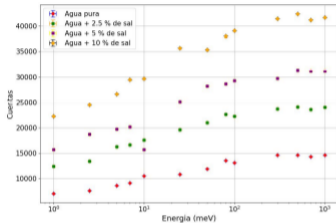




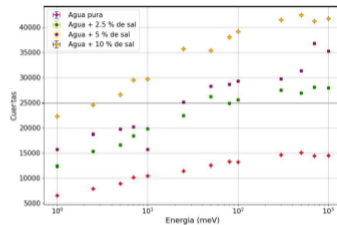
# Eficiencia Cherenkov en el nivel térmico



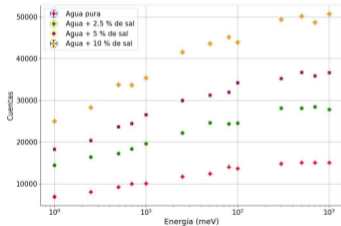
a) PMT borde superior



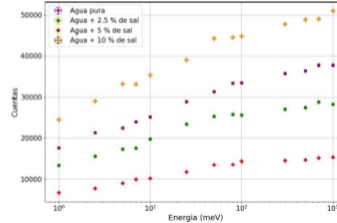
b) PMT 80% la altura de tanque



c) PMT 50% la altura de tanque



d) PMT en la mitad del tanque



# Conclusiones



1. Los resultados muestran que la reacción principal en el agua es la captura del neutrón térmico por el hidrógeno, lo que produce un fotón de 2.223 MeV, suficiente para impulsar electrones por efecto Compton y generar radiación Cherenkov.
2. Se observó una mayor producción de radiación gamma para energías superiores a 2.223 MeV cuando se utiliza agua sal.
3. Estos hallazgos indican que la incorporación de sal en el agua mejora significativamente la detección de neutrones a través de la radiación Cherenkov, lo que puede ser de gran utilidad en la detección de neutrones térmicos.
4. La captura de neutrones y su correspondiente radiación Cherenkov, en el régimen térmico mejora con la adición del aditivo al volumen detector.



# Muchas gracias

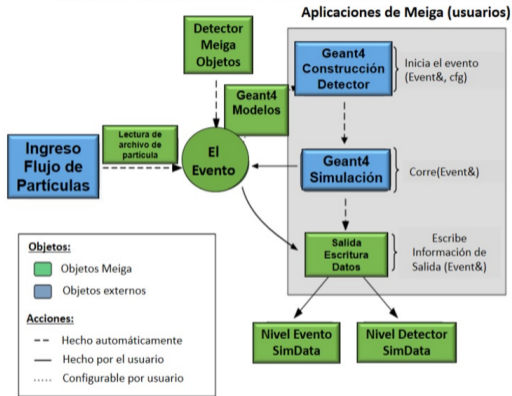


Universidad  
Industrial de  
Santander

#LaUISqueQueremos



# Simulaciones: El Framework MEIGA

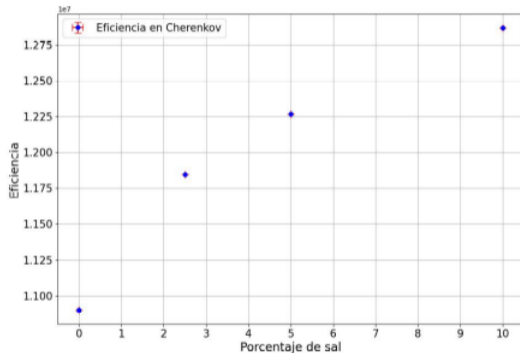
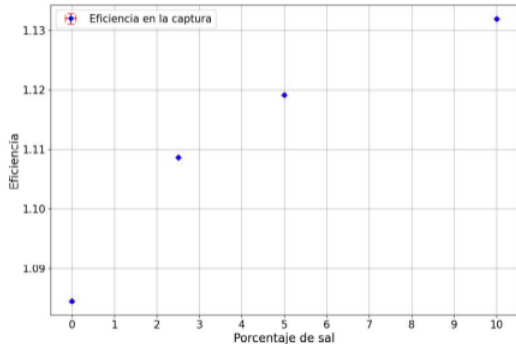


Universidad Industrial de Santander

#LaUISqueQueremos



# Simulación (200000 N a 500 MeV)



# Validación del modelo en Geant4

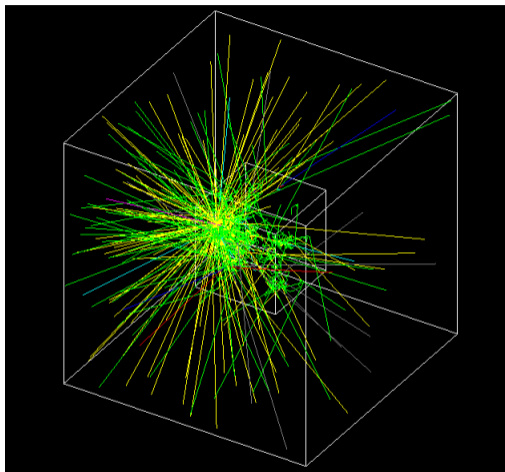


Figura: 100 N. a 500MeV en cubo de 1 metro de Agua Pura.



Universidad  
Industrial de  
Santander

# 2000000 N. a 100KeV en cubo de 10 metros de Agua Pura



```
List of generated particles:  
C14: 275 Emean = 404.22 keV ( 403.96 keV --> 404.57 keV)  
C15: 1442 Emean = 40.392 meV ( 0.10368 meV --> 2.3996 eV )  
O17: 850 Emean = 362.74 eV ( 1.1697 eV --> 8.9724 keV)  
O18: 9 Emean = 1.2515 keV ( 638.72 eV --> 1.9296 keV)  
O19: 52 Emean = 328.76 eV ( 38.05 eV --> 443.25 eV )  
alpha: 1717 Emean = 226.56 keV ( 0.035925 meV --> 1.4148 MeV)  
deuteron: 1997354 Emean = 1.3202 keV ( 21.245 eV --> 67.498 keV)  
deuteron: 1997354 Emean = 1.3202 keV ( 21.245 eV --> 67.498 keV)  
e+: 26800 Emean = 585.55 keV ( 174.89 eV --> 4.1171 MeV)  
e-: 31641008 Emean = 143.19 keV ( 100 eV --> 9.4394 MeV)  
gamma: 2344685 Emean = 1.9181 MeV ( 1.0001 keV --> 9.0468 MeV)  
proton: 1009 Emean = 98.253 keV ( 532.89 eV --> 100.05 keV)
```

List of generated particles:

```
C14: 260 Emean = 404.22 keV ( 403.93 keV -> 404.52 keV) // (E_min, E_max)  
C15: 1447 Emean = 0.049731 eV ( 0.00015825 eV -> 16.921 eV )  
O17: 914 Emean = 369.03 eV ( 0.29162 eV -> 7.175 keV)  
O18: 9 Emean = 1.0513 keV ( 564.33 eV -> 1.9022 keV)  
O19: 46 Emean = 272.95 eV ( 60.947 eV -> 441.49 eV )  
alpha: 1708 Emean = 215.33 keV ( 1.5916e-05 eV -> 1.4149 MeV)  
deuteron: 1997292 Emean = 1.3203 keV ( 35.126 eV -> 66.439 keV)  
e+: 26550 Emean = 581.14 keV ( 46.257 eV -> 4.532 MeV)  
e-: 28594917 Emean = 151.32 keV ( 100 eV -> 5.6362 MeV)  
gamma: 2001351 Emean = 2.2222 MeV ( 1.0044 keV -> 6.2574 MeV)  
proton: 958 Emean = 100.03 keV ( 100 keV -> 100.05 keV)  
triton: 1 Emean = 7.0052 keV ( 7.0052 keV -> 7.0052 keV)
```

Sidelnik, I. et al. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. 2019.

# Simulación en el rango térmico (1meV-1000meV)

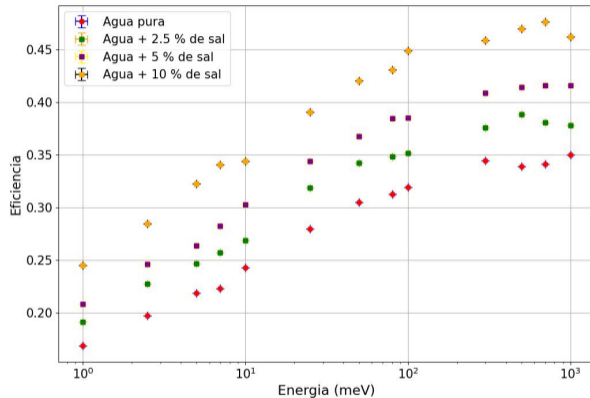


Figura: Eficiencia en la captura de neutrones en agua y diferentes concentraciones de sal.



# Simulación en el rango térmico (1meV-1000meV)

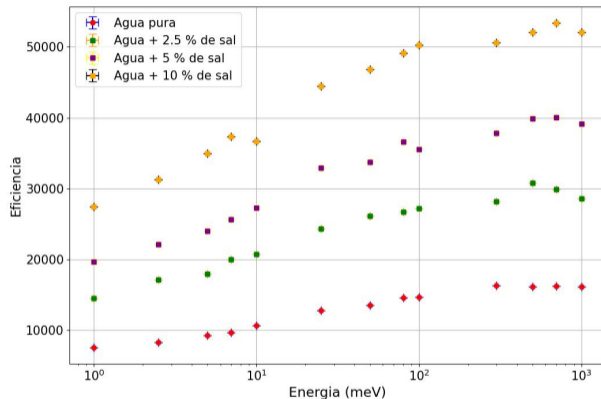


Figura: Eficiencia en la producción de radiación Cherenkov en el cilindro de agua y diferentes concentraciones de sal.

# Simulación en el rango térmico (1meV-1000meV)

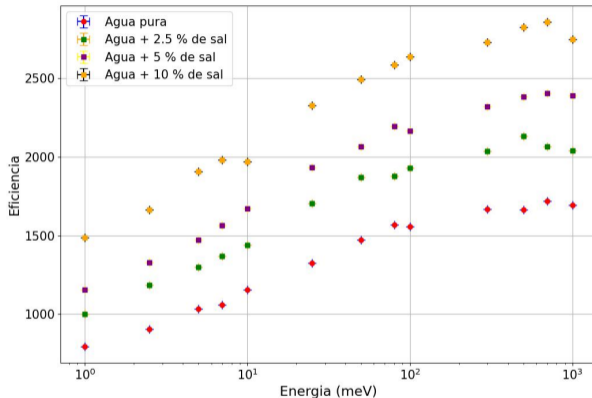
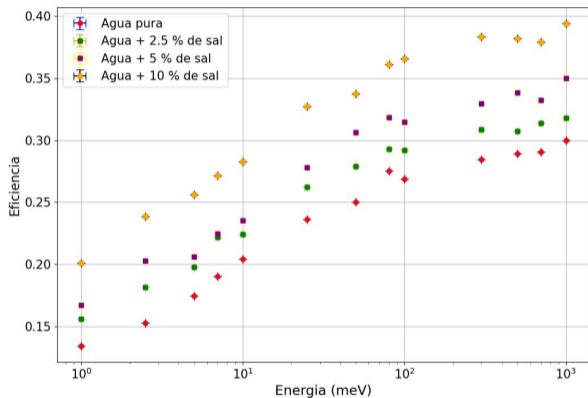


Figura: Eficiencia en detección de neutrones en el cilindro de agua y diferentes concentraciones de sal.

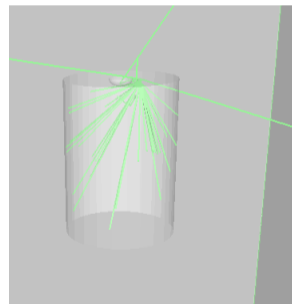
# PMT en el borde superior del bloque de agua



Universidad  
Industrial de  
Santander



(a) Eficiencia en la captura de neutrones

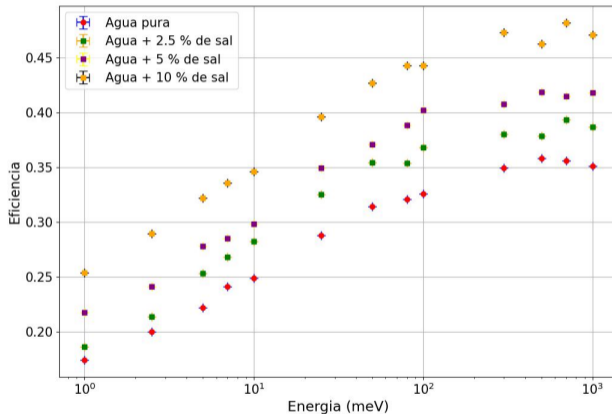


(b) Ubicación del PMT

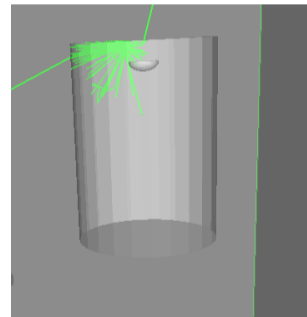
# PMT al 80 % de la mitad del cilindro de agua



Universidad  
Industrial de  
Santander



(a) Eficiencia en la captura de neutrones

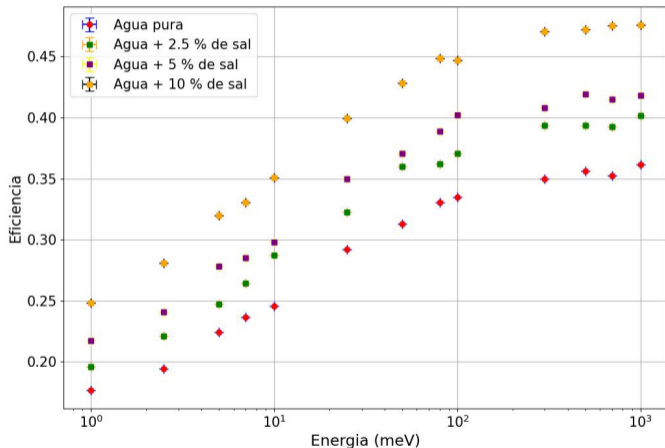


(b) Ubicación del PMT

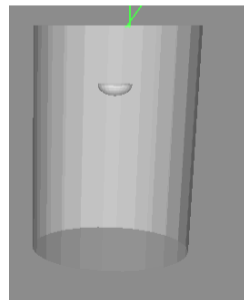
# PMT al 50 % de la mitad del cilindro de agua



Universidad  
Industrial de  
Santander



(a) Eficiencia en la captura de neutrones

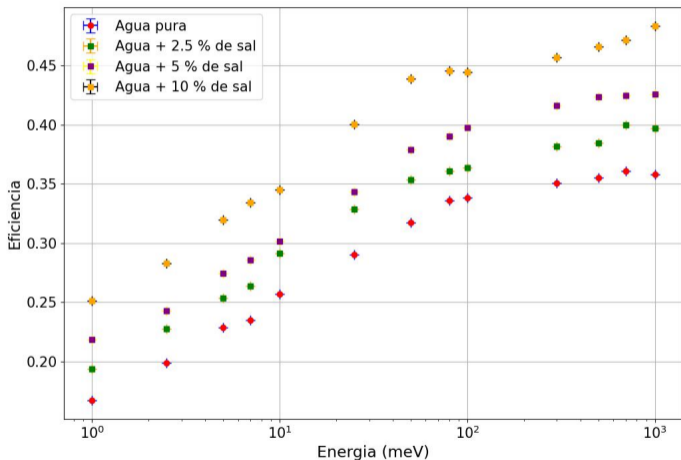


(b) Ubicación del PMT

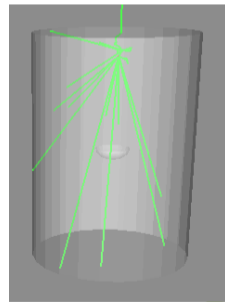
# PMT en la mitad del cilindro de agua



Universidad  
Industrial de  
Santander



(a) Eficiencia en la captura de neutrones



(b) Ubicación del PMT

# Número de neutrones capturados en agua pura y agua más diferentes concentraciones de sal.

Volumen	Sal(Kg)	$N^0$ n cap.	$N^0$ part. sec.	Tipo de p.	$\gamma$ compt
Agua pura	0	275485	551278	D.- $\gamma$	15898329
Agua + 0.5 % de sal	5	285769	626219	D- $\gamma$ -Cl36	17229959
Agua + 1 % de sal	10	284748	665395	D - $\gamma$ - Cl36	17610073
Agua + 2.5 % de sal	25	286769	758121	D- $\gamma$ -Cl36	18368015
Agua + 5 % de sal	50	290202	852723	D - $\gamma$ - Cl36	19004928

**Cuadro:** Número de partículas generadas por el ingreso de 200000 neutrones de 500 MeV en el volumen detector ( $1 m^3 \simeq 1000$  kg de agua).

# Neutrones transmitidos para un cubo de Agua pura de $1 \text{ m}^3$



$E_n$ (MeV)	n(Emergen)	% de n emergen
15	29167	14.5
1	194	0.9
$1 \times 10^{-6}$	189	0.9
$25 \times 10^{-9}$	172	0.8

Cuadro: Neutrones transmitidos para un cubo de Agua de  $1 \text{ m}^3$



# Gammas generados y transmitidos



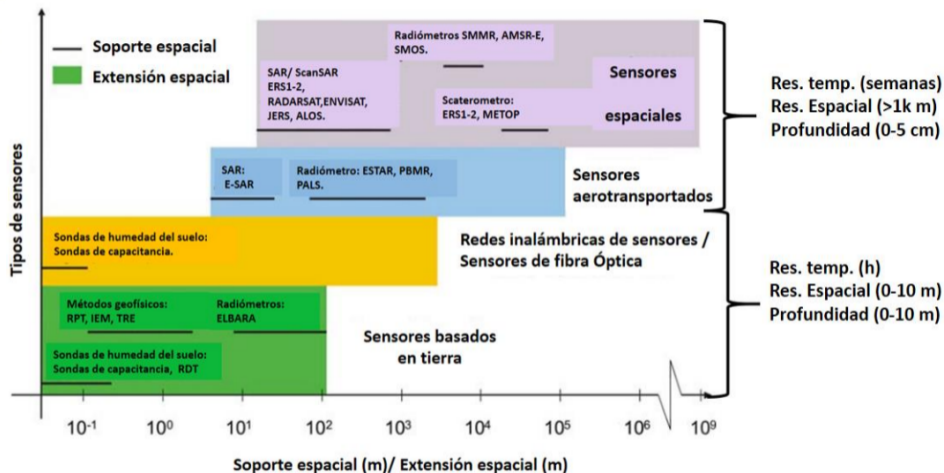
$E_n$ (MeV)	$\gamma$ Generados	$\gamma$ emergentes	% de $\gamma$ emergentes
15	511601	31645	6.1
1	233985	11374	4.8
$1 \times 10^{-6}$	234189	11217	4.7
$25 \times 10^{-9}$	234093	11211	2.3

Cuadro: Gammas transmitidos para un cubo de Agua de  $1 \text{ m}^3$  (200000 neutrones)

# Métodos de medición de la humedad del suelo



Universidad Industrial de Santander

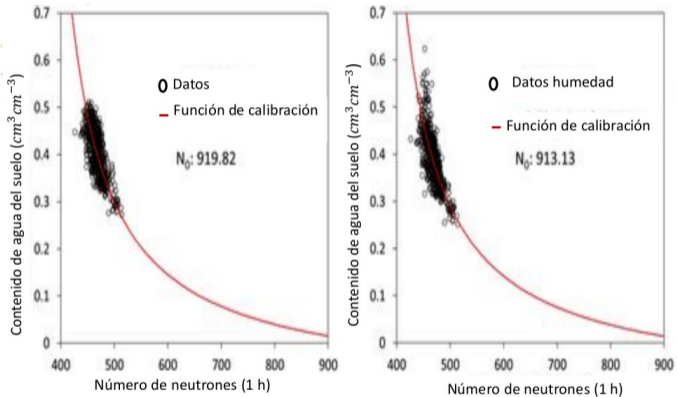


Edward, C. et al. College of Agriculture University of Arizona. 2017.

Vereecken, H. et. al. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 44. 2008.

Ochsner, T. et al. Soil Science Society of American Journal. 2013.

# Humedad del suelo y los neutrones cósmicos



$$\theta(N) = \frac{a_0}{\frac{N_{corr}}{N_0} - a_1} - a_2$$

$$\theta_v = \theta(N)\rho_{aparente}$$

**Función de calibración:**

$$a_0 = 0,0808$$

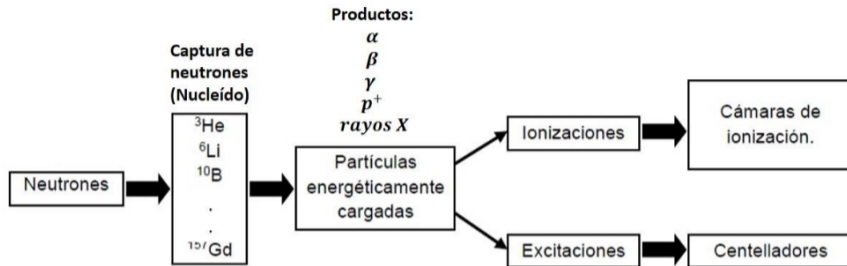
$$a_1 = 0,372$$

$$a_2 = 0,115$$

↑  
Parámetros de calibración

Pelowitz, D. B. et al. Los Alamos National Laboratory. 2005.  
Zreda, M. et al. Earth System Science. 2012.

# Detección de neutrones



Nucleído Abundancia Isotópica	Tipo de reacción	$\sigma_{absorcion}$ (barns)	Energía de la (MeV)
${}^3_2\text{He}$ (0,000137 %)	${}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{p}$	5333	0,764
${}^6_3\text{Li}$ (7,4 %)	${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + 2\alpha$	940	4,78
${}^{10}_5\text{B}$ (19,8 %)	${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + 2\alpha$ (6 %)	3835	2,79
${}^{10}_5\text{B}$ (19,8 %)	${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^7_3\text{Li}^* + 2\alpha + \gamma$ (0,48MeV) (94 %)	3835	2,31
${}^{157}_{64}\text{Gd}$ (15,7 %)	${}^{157}_{64}\text{Gd} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{158}_{64}\text{Gd} + \gamma$	259000	7,94

B. Fisher et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.

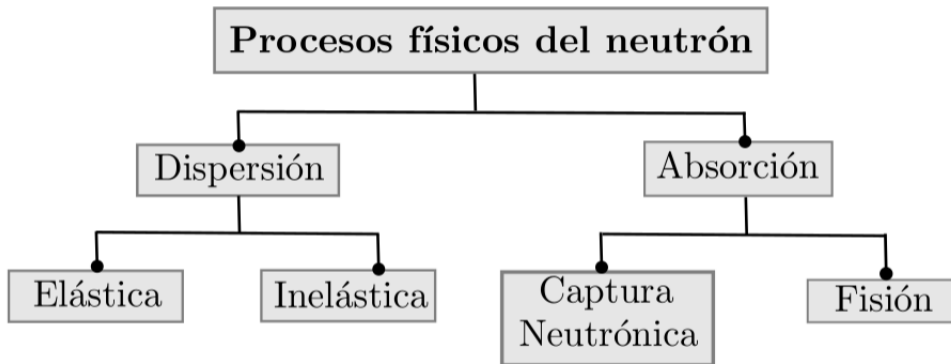
[Kouzes, R. et al. Pacific Northwest National Lab. \(PNNL\), Richland, WA \(U.S.A.\). 2009.](#)

# Cherenkov como detector de neutrones

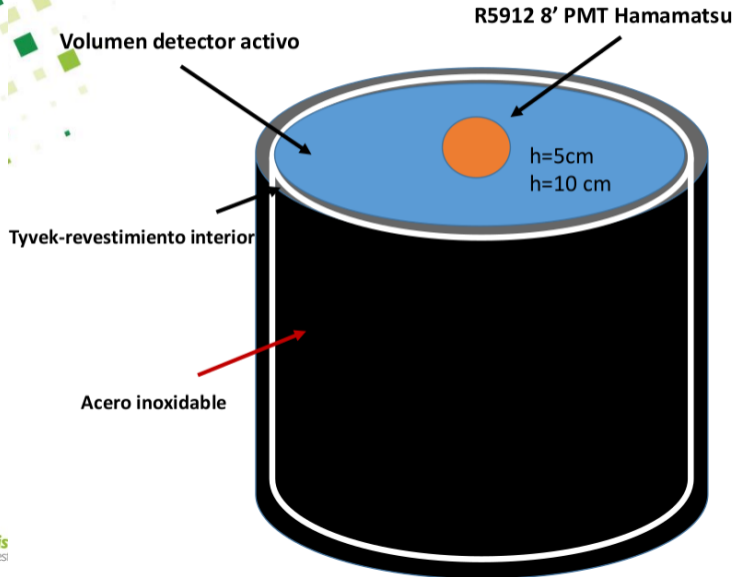


Tipo de reacción	$\sigma_{absorción}$ (barns)	Energía (KeV) de la reacción
${}^1_1H(99,99\%) + {}^1_0n \rightarrow {}^2_1D + \gamma$	$0,3326 \pm 0,0007$	$2223,245 \pm 0,003$
${}^{23}_{11}Na(100\%) + {}^1_0n \rightarrow {}^{24}_{11}Na^+ + \gamma$	$0,517 \pm 0,004$	$472,2023 \pm 0,0014$
${}^{16}_8O(99,76\%) + {}^1_0n \rightarrow {}^{17}_8O + \gamma$	$0,000189 \pm 0,000008$	$870,76 \pm 0,04$
${}^{35}_{17}Cl(75,78\%) + {}^1_0n \rightarrow {}^{36}_{17}Cl + \gamma$	$43,6 \pm 0,4$	$1020,57 \pm 0,04$
${}^{37}_{17}Cl(75,78\%) + {}^1_0n \rightarrow {}^{38}_{17}Cl + \gamma$	$43,6 \pm 0,4$	$755,425 \pm 0,011$

<https://www.nndc.bnl.gov/capgam/byTarget/>



# Simulación del WCD



Materiales:

Polietileno:

$$\rho = \frac{0.935g}{cm^3}$$

Acero inoxidable:

$$\rho = 8 \frac{kg}{m^3}$$

Dimensiones:

$$V = 2.4m^3$$

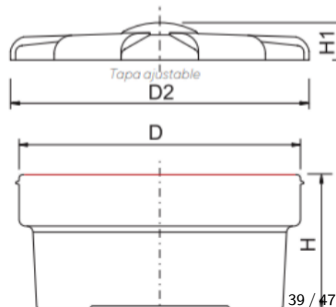
$$A = 1.91m^2$$

$$h = 1.25m$$

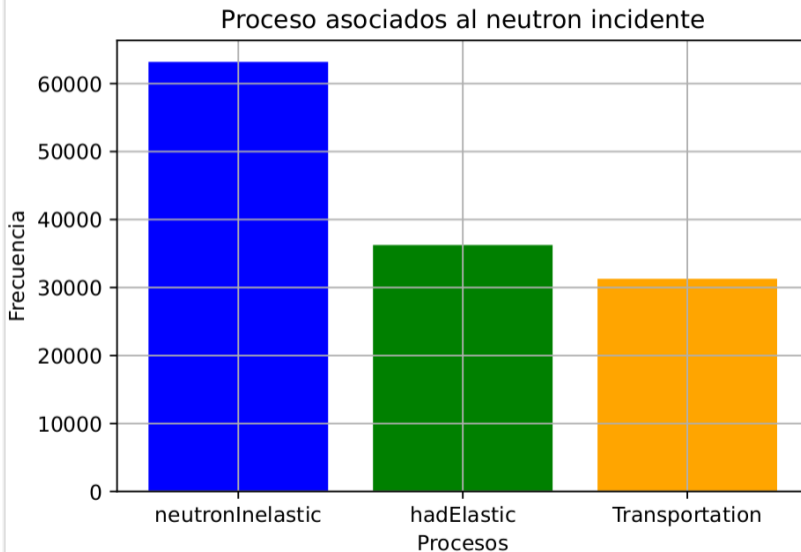
$$Esp = 3.2 mm$$

$$EsA = 1.5 mm$$

Tyvek->0.12 mm



# Neutrones a 500 MeV en Agua Pura



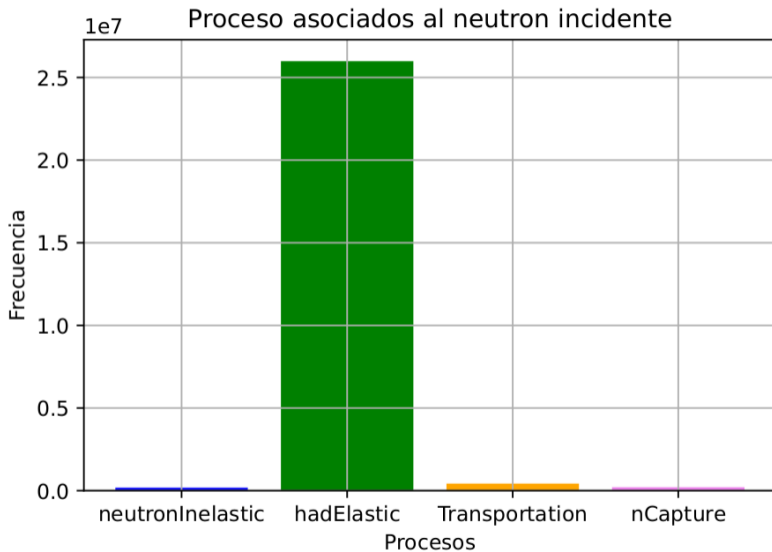
Universidad  
Industrial de  
Santander



# Procesos de neutrones detectados



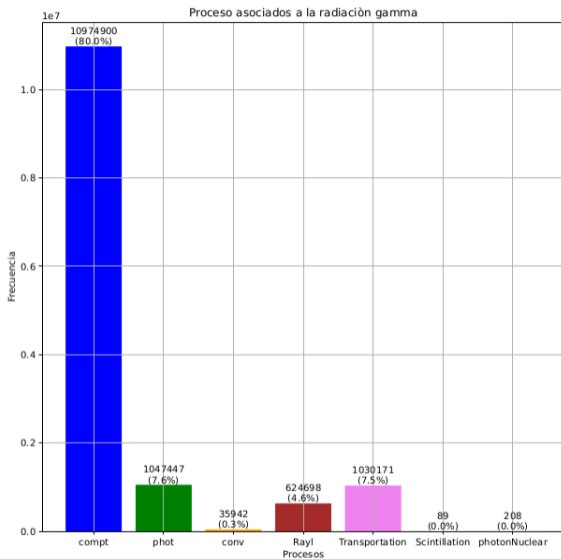
Universidad  
Industrial de  
Santander



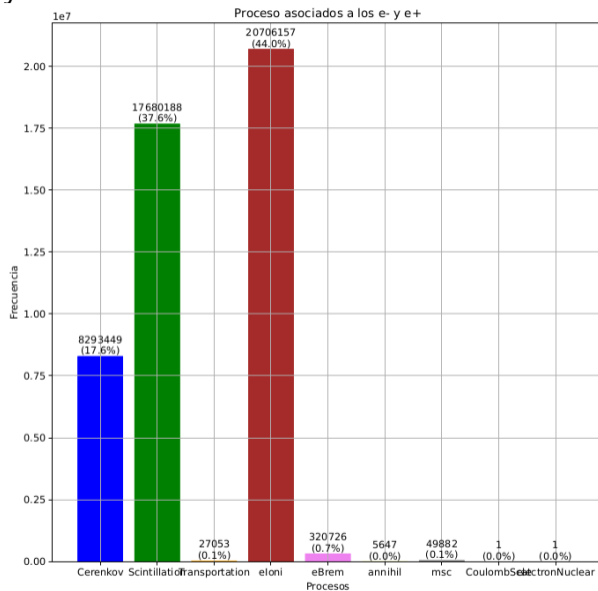
# Procesos gamma



Universidad  
Industrial de  
Santander

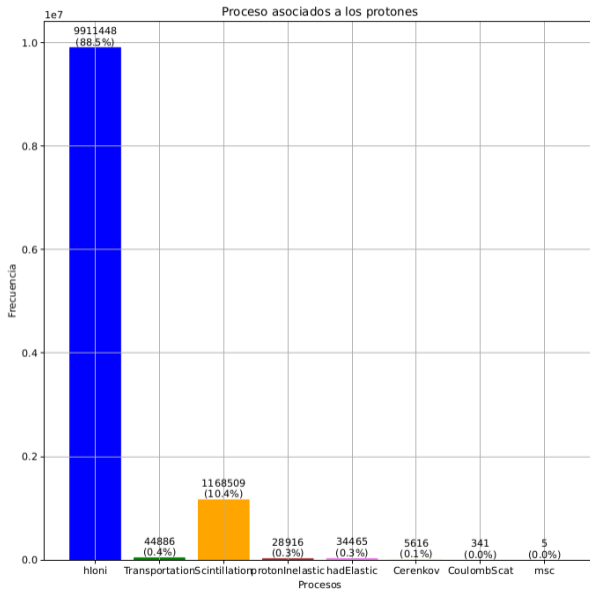


# Procesos $e^-$ y $e^+$



Universidad  
Industrial de  
Santander

# Procesos $p^+$

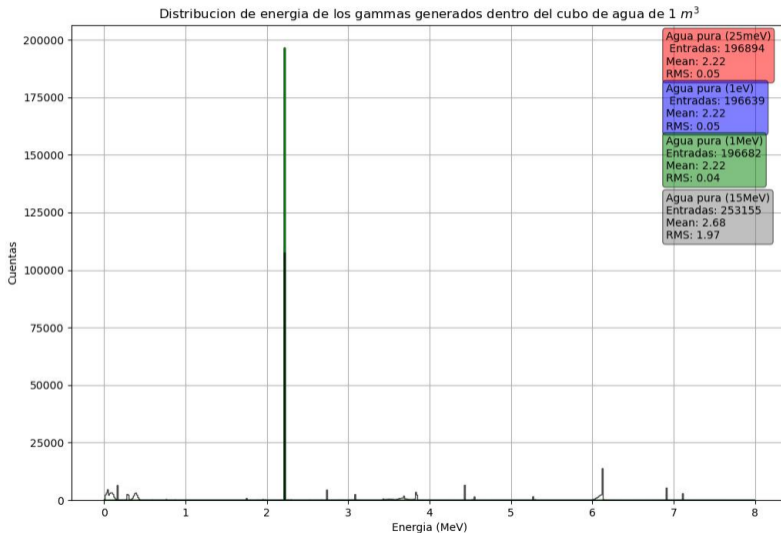


Universidad  
Industrial de  
Santander

# Histograma de energía de los gammas



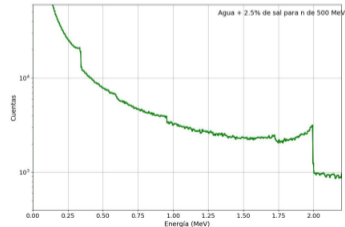
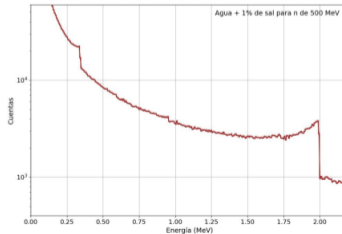
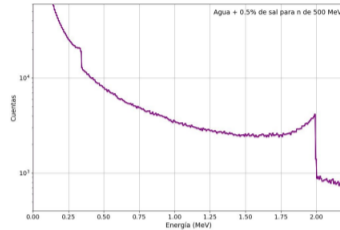
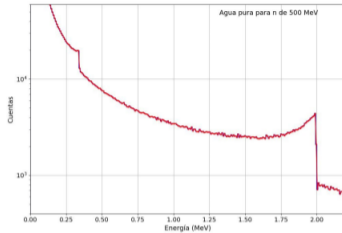
Universidad  
Industrial de  
Santander



# Histograma de energía de electrones Compton



Universidad  
Industrial de  
Santander



# Montaje WCD-USQ



Universidad  
Industrial de  
Santander



Densidad	0.935 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de flexión	593 (86.000) MPa (psi)
Esfuerzo de tensión máximo	17.2 (2.500) MPa (psi)
Temperatura de deformación:	a 0.47MPa (68psi) 54°
	a 1.82MPa (264psi) 40°

