

The background of the slide is a composite image of the cosmos. The top half features a dark blue field filled with numerous bright, multi-pointed stars. The bottom half shows a colorful nebula with swirling patterns of orange, red, and yellow, set against a dark blue background with scattered stars.

# **Detección en radio de rayos cósmicos**

Radio detection from Air Shower Plasmas using  
IAR's antenna.

Lourdes Anduaga

Matías Borghi

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Esta investigación se realizó bajo la supervisión y ayuda del Dr. Matías Tueros, a quien se le agradece especialmente.

*Primera edición, Noviembre 2014*



# Contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>4</b>
1.1	Introducción a los rayos cósmicos	4
1.2	Proyecto de estudio	5
<b>2</b>	<b>Software Aires</b> .....	<b>8</b>
2.1	Instalación y puesta a punto	8
2.2	Algo de información sobre los datos simulados por Aires	11
<b>3</b>	<b>Simulación de la cascada y su posición</b> .....	<b>13</b>
3.1	Tratamiento de los datos de Aires	13
<b>4</b>	<b>Simulación de la antena</b> .....	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>Simulación de la emisión y propagación</b> .....	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Simulación de electrónica</b> .....	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>Futuras mejoras</b> .....	<b>42</b>



# 1. Introducción

## 1.1 Introducción a los rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas que llegan desde el espacio y bombardean constantemente la Tierra desde todas direcciones. En su mayoría, estas partículas son protones o núcleos de átomos. Algunas de ellas son más energéticas que cualquier otra partícula observada en la naturaleza. Debido a su velocidad (cercana a la de la luz) son ultraenergéticos [Aug09; KW12] .

La principal incógnita que presentan es de dónde provienen. Es posible que la mayor parte sean protones provenientes de fuentes externas a nuestra galaxia, pero suficientemente cercanas como para que el efecto GZK [RP11] no los frene. Por otro lado sus direcciones de arriba no apuntarían a sus verdaderas fuentes pues sus trayectorias se habrían desviado debido al campo magnético de nuestra galaxia y al existente entre galaxias.

Si fuese así, sin embargo, estos campos deberían ser más intensos de lo que actualmente se cree. Una alternativa es que no se trate de protones sino de núcleos con mucha mayor carga eléctrica; a mayor carga más desviación, por lo que el campo magnético galáctico alcanzaría para modificar sus direcciones de arriba incluso a energías muy altas. O podrían ser neutrino (partículas sin carga) cuyas trayectorias no sufren desviaciones al atravesar campos magnéticos y que tampoco son frenados por los fotones de la radiación cósmica de fondo, por lo cual sus fuentes podrían estar a distancias arbitrariamente grandes.

Acelerar rayos cósmicos hasta energías tan altas como las que se observan, requiere condiciones astrofísicas muy extremas, en el límite de lo que se cree son capaces de producir fenómenos más violentos en las galaxias más activas. Esto ha llevado a especular que tal vez los rayos cósmicos no fueron acelerados hasta energías tan altas sino que son el producto del decaimiento de hipotéticas partículas de masas muy grandes formadas cuando el universo era enormemente denso y caliente, en las primeras etapas después del Big Bang.

Otra posibilidad que no puede descartarse, es que se esté cometiendo sistemáticamente algún error que hasta hoy haya pasado inadvertido y que cause una sobreestimación de la energía del rayo cósmico. Mediciones recientes realizadas en un experimento llamado HiRes [Vog+94] están en conflicto con los resultados de otros observatorios. Si efectivamente existiera una abrupta caída en el número de rayos cósmicos a energías cercanas al umbral de 1020 eV predicha por el efecto GZK, sería muy importante medirla en detalle pues confirmaría su origen cosmológico.

Estas incógnitas son la motivación al estudio de los rayos cósmicos en mayor detalle del conocido. Develar el origen de los rayos cósmicos de alta energía permitirá comprender cuáles son las fuentes astrofísicas más energéticas del universo.

Resumiendo cuantitativamente, las partículas con energías por debajo del GeV ( $10^9$  eV) que se detectan, lo más probable es que vengan del viento solar o de la galaxia, y las de energía de  $10^9$  a  $10^{21}$  son emitidas desde fuera de nuestro sistema solar.

El flujo de energías varía en 20 órdenes de magnitud. A bajas energías el flujo de partículas que llegan es mayor. Se necesitan telescopios que abarquen menos espacio respecto a los que se usan para altas energías. Estos últimos suelen colocarse en el suelo para ocupar un área mayor y así obtener un número de eventos significativo para el estudio. Esto se puede observar en la Figura 1.1 [Sta10] .

Cuando un rayo cósmico de alta energía llega a la atmósfera terrestre interactúa con átomos de ésta ionizando las moléculas de aire, colisiona con los gases y libera electrones. Este proceso excita los átomos y genera nuevas partículas. Éstas, a su vez, colisionan contra otras y provocan una serie de reacciones nucleares, que originan nuevas partículas que repiten el proceso en cascada. Las características de las cascadas es que permiten obtener información sobre la energía, dirección y composición del rayo cósmico primario [Lon11] .

## 1.2 Proyecto de estudio

En este proyecto se propone como objetivo a largo plazo conocer en mayor detalle el origen y composición de los rayos cósmicos. Cuántos son posibles de detectar, en qué rangos de energía, con qué precisión, con qué instrumentos, etc. Para ello se realizará una simulación que consiste en varias etapas cada una detallada con sus correspondientes gráficos en los capítulos que siguen:

- **Simulación de la cascada:** se simulan cascadas de rayos cósmicos con el software Aires [Sci99] el cual se detalla en el capítulo 2.
- **Simulación de la posición de la cascada:** se ubica la cascada en posiciones aleatorias dentro de una porción del espacio que se considera la región de visión de la antena.
- **Simulación de la antena:** se agrega una antena con dos pixeles apuntando en diferentes direcciones. Luego se considerará un arreglo de varias antenas cada una con un número mayor de pixeles.

- **Simulación de la emisión y propagación:** se simula el tiempo de emisión y el de recepción de la antena, y se estudia su diferencia debido a efectos relativistas.
- **Simulación de la electrónica:** se simula la electrónica de la antena, el "trigger" y el ruido.
- **Análisis:** se calcula la apertura del instrumento y de la tasa de detecciones, se estudia la dirección de apuntamiento óptimo, y en caso de no detectar nada, se calcula un límite en la emisión.

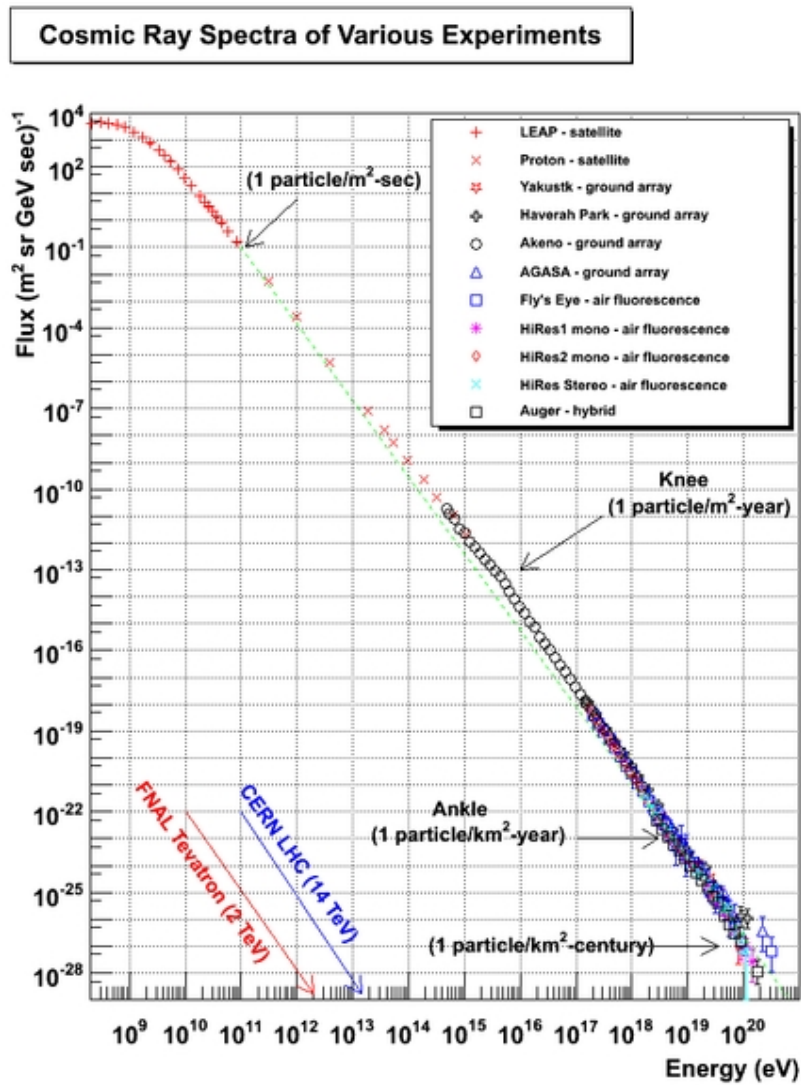


Figura 1.1: Espectro de rayos cósmicos. Flujo de partículas vs Energía.(10 veces menos energía 500 veces mas flujo, pendiente 2.7)



## 2. Software Aires

### 2.1 Instalación y puesta a punto

Para simular las cascadas se utilizó el software **Aires v2.8.4a**. Dicho programa puede descargarse de la url [http://www2.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires/eg\\_Aires.html](http://www2.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires/eg_Aires.html). A sí mismo la documentación pertinente se puede obtener de la misma dirección.

Se extrajeron los archivos en una carpeta, luego se descomentó la línea del archivo *config* que corresponde al sistema operativo en el que se va a ejecutar el programa, en nuestro caso fue

```
Platform=Linux
```

Luego se ejecutó el comando

```
./doinstall 0
```

en la terminal para instalar el software. Por último se agregó Aires a las variables de entorno (PATH) modificando el archivo *.bashrc* en la carpeta **Home**:

```
export PATH="$PATH:/home/user/aires/2-8-4a/bin"
```



Se creó el archivo **WorkingLibrary.inp** que contiene la información de las cascadas que se van a simular, ya sea energía de la partícula que inicia la cascada, altitud de la generación, etc. El código del archivo se muestra a continuación:

```
1
2 ##Task Related
3 #####
4 # Set the task name
5 Task Prueba1
6 TotalShowers 1000
7
8 ##Primary Related
9 #####
10 # Set 50% Proton 50% Iron
11 PrimaryParticle Proton 0.5
12 PrimaryParticle Iron 0.5
13
14 # Set a uniform distribution of cascades in energy (see eq. 3.2 manual,  $P(E)$ 
15    $dE = E^{-(\gamma + 1)}$ , so  $\gamma = -1$  means uniform distribution
16 PrimaryEnergy 10 PeV 10 EeV -1
17
18 # Set a uniform distribution in the sin of zenith angles
19 # This will set automatically the azimuths to be sampled uniformly between 0
20   and 360
21 # all this put together means that we are sampling uniformly in solid angle
22   in the sky.
23 PrimaryZenAngle 0 deg 72 deg S
24
25 ##Site Related
26 #####
27 # we add the iar site
28 AddSite IAR -34.86 deg 58.14 deg 30 m
29 # and tell it to use it
30 Site IAR
31 # We set the date to 2010 to use the correct magnetic field value. Its kind
32   of irrelevant.
33 Date 2010
34 # We set the standard linsley atmosphere
35 Atmosphere 1
36
37 ##Simulation Handling
38 #####
39 #Set thinning level
40 ThinningEnergy 1.0e-4 Relative
41
42 #Set Cut Energies
43 ElectronCutEnergy 1 MeV
44 ElectronRoughCut 1 MeV
45 GammaCutEnergy 1 MeV
46 GammaRoughCut 1 MeV
47 MesonCutEnergy 100 MeV
48 MuonCutEnergy 100 MeV
49 NuclCutEnergy 100 MeV
```

```

49 MaxCpuTimePerRun 60 min
50 ShowersPerRun 100
51
52
53 ##Output Handling
54 #####
55 # Observing Levels (510 entre 100km de altura y 40m. Level 0 will be the
    injection (100km), and level 511 will be the ground (30m))
56 # we wont be looking so high in the sky, it might be usefull to put less than
    90km (we will see).
57 ObservingLevels 510 90 km 40 m
58 # Dont Store particles crossing observing levels
59 RecordObsLevels None
60 SaveInFile lgtpcles None
61 # Dont Store particles at ground
62 SaveInFile grdpcles None
63
64
65 # set the program to store the tables of individual showers
66 PerShowerData Full
67 # set the program to export one table per shower (this might generate a lot
    of files!)
68 #ExportPerShower On
69 #export number of e+/e-
70 ExportTables -s 1205
71 #export energy deposit
72 ExportTables -s 7991
73 #export angles per shower
74 ExportTables 5513
75 #export energies per shower
76 ExportTables 5511
77 #export Xmax and Nmax
78 ExportTables 5501
79
80
81 End

```

Para compilar el archivo de Aires *\*.inp* hay que ingresar en la terminal

```
$ Aires < Archivo.inp
```

donde archivo es el nombre del archivo, en nuestro caso WorkingLibrary.

Las últimas líneas de código, como se puede notar, exportan tablas con las que se va a trabajar. Esto lo permite el comando:

```
ExportTables [-s] tablenumber
```

donde *tablenumber* es el código de columna que se quiere exportar (los mismos se encuentran en el manual de Aires) y *-s* es un parámetro opcional que permite exportar la información de cada lluvia en una tabla por separado. Si estas líneas no se agregan, las tablas se pueden exportar en terminal utilizando

```
AiresExport [-s] [-O] [X] taskname tablenumber
```

donde *-OX* es un parámetro opcional que agrega el nivel del suelo a las tablas como puntos,

*taskname* es el nombre de la tarea que se define en el programa. Las tablas exportadas y el código utilizado para ello fue:

- **AiresExport -s -O X Prueba1 1205:** Exporta el número de  $e^-/e^+$  en función de la profundidad. Se generan *TotalShowers* tablas. Una para cada cascada simulada.
- **AiresExport -s -O X Prueba1 7991:** Energía depositada en función de la profundidad en cada punto del espacio. Se generan *TotalShowers* tablas. Una para cada cascada simulada.
- **AiresExport Prueba1 5513:** Ángulos azimutal y zenital para cada cascada simulada.
- **AiresExport Prueba1 5511:** Energía primaria de la partícula generadora de la cascada, para cada una de ellas.
- **AiresExport Prueba1 5501:** Profundidad máxima y número máximo de partículas para cada cascada.

## 2.2 Algo de información sobre los datos simulados por Aires

El software **Aires** simula todos los procesos que intervienen cuando un rayo cósmico incide en la atmósfera terrestre hasta formar la cascada de partículas.

Los rayos cósmicos con energías mayores a 100 TeV deben ser estudiados en la actualidad, usando instrumentos en la superficie terrestre. Esto implica que este tipo de rayos cósmicos no pueden ser detectados directamente, en lugar de esto, es necesario medir los productos de las cascadas de partículas en la atmósfera inicializadas por una partícula primaria o incidente.

Una cascada de partículas atmosféricas comienza con una partícula cósmica primaria que interactúa con la atmósfera. Esto es, en general, una colisión nuclear inelástica que genera un número de partículas secundarias. Estas partículas continúan interactuando y generando más partículas secundarias y así sucesivamente. Este proceso de multiplicación continúa hasta que un máximo es alcanzado (Figura 2.1 ). Luego la cascada se atenúa a medida que más y más partículas caen por debajo del umbral para una mayor producción de partículas.

Las partículas de alta energía ionizan las moléculas del aire de la atmósfera calentándolas y excitando sus electrones. Esto forma un plasma de electrones que se desexcitan por colisiones con las moléculas del aire que permanecieron frías (Ya que no todas las moléculas del aire se ionizan). Al desexcitarse se emite radiación conocida como radiación de frenado o Bremsstrahlung [Gai90] . Esta es la radiación que se mide en los detectores terrestres. (Ver figura descriptiva del proceso en 2.2)

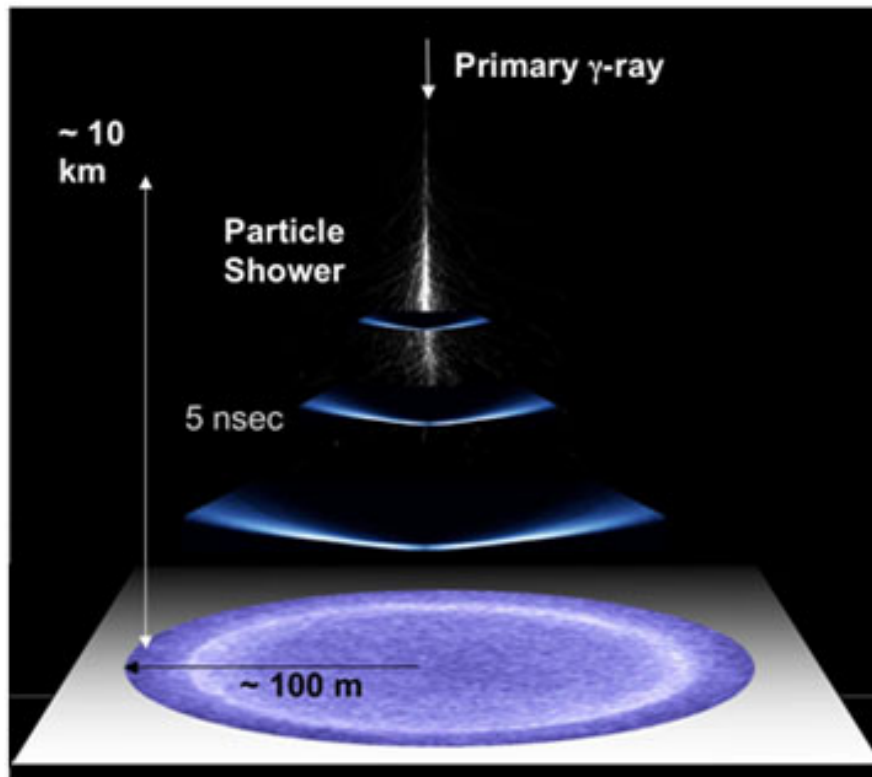


Figura 2.1: Multiplicación de partículas a través de una partícula primaria, generación de cascada.

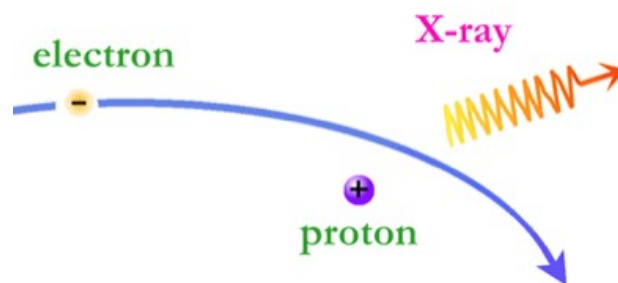


Figura 2.2: Efecto Bremsstrahlung: El fotón resultante de este proceso es de importancia en el trabajo.



## 3. Simulación de la cascada y su posición

### 3.1 Tratamiento de los datos de Aires

Se generó un archivo binario con la información obtenida de las mil cascadas simuladas con el programa Aires explicado en el capítulo anterior.

```
1 struct Shower
2 {
3     int I_shower_ID; //Shower's identification
4     int I_type_particle; //Iron=(944) of Proton=(31)
5
6     double AD_depth_np[bin_num_depth]; //Deph of # of part
7     double AD_deposited_energy[bin_num_depth]; //Deposited energy
8     double AD_number_particles[bin_num_depth]; //Number of e+ and e-
9
10    double D_primary_energy; //Primary particle energy
11    double D_azimuth, D_zenith; //Shower's angles
12    double D_XMax; //Vertical depth of shower maximum
13    double D_NMax; //Number of particles at shower maximum
14
15 }; Shower Struct_Shower[number_showers];
```

Donde,

- **I\_Shower\_ID**: es un entero que contiene un número identificador de cada cascada.
- **I\_type\_particle**: es un entero que proporciona información acerca de la partícula que originó la cascada. La misma puede ser un protón (31) o un hierro (944).
- **AD\_deposited\_energy**: es un array de numeros reales que almacenan la energía depositada por la cascada a una altura dada determinada por **AD\_depth\_np**.
- **AD\_number\_particles**: es un array de numeros reales que almacenan el número de partículas generados por la cascada a una altura dada por **AD\_depth\_np**.
- **D\_primary\_energy**: se almacena la energía primaria de la partícula que genera la cascada.
- **D\_azimuth** y **D\_zenith**: ángulos azimutal y cenital desde donde se genera la cascada respecto del suelo 3.1 .
- **D\_XMax** y **D\_NMax**: profundidad y número de partículas máximas.

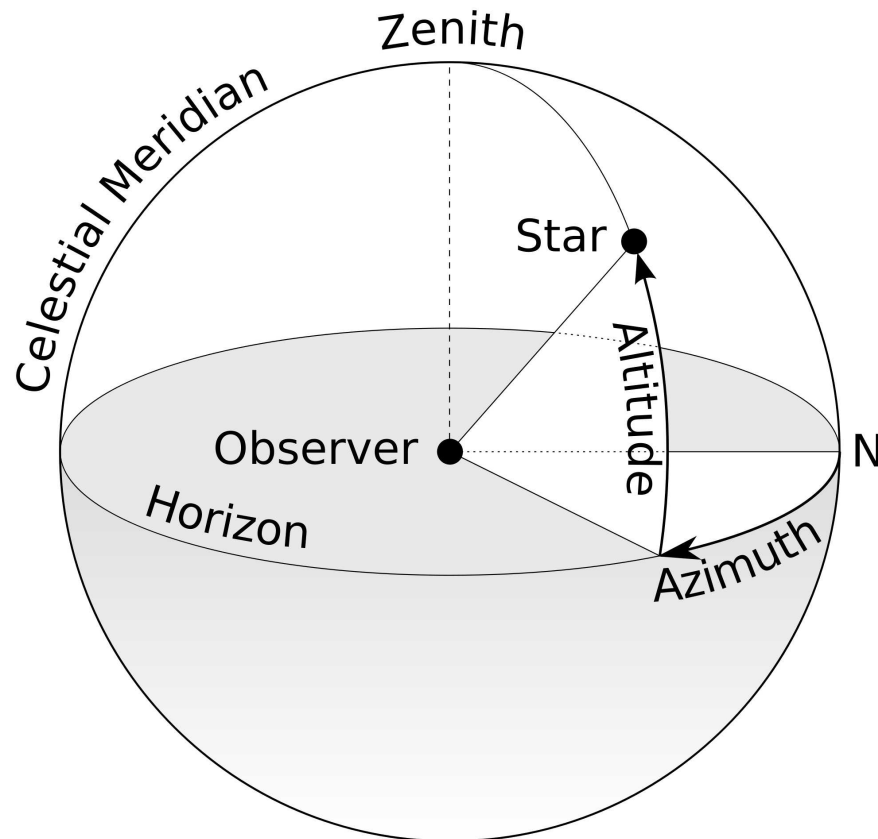


Figura 3.1: Ángulos azimutal y cenital que definen un punto en una esfera de radio  $R$ .

El programa lee las tablas obtenidas del software Aires, las aloja en memoria en

una estructura `Struct_Shower` y éstas son almacenadas en un archivo binario llamado `Shower_Data.bin`.

De esta manera los archivos generados por Aires no son necesarios. De aquí en adelante se trabajó con el archivo binario creado.

Lo siguiente que se hizo fue, dados los ángulos azimutal y cenital, y la profundidad en cada punto del espacio se obtuvieron los puntos coordenados  $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  de la cascada. Dado que las tablas estan en función de profundidad, fue necesario hacer un cambio de profundidad a altura ( $h$ ). Esto se realizó con la función escalón descrita en el manual del Aires que está de acuerdo con el modelo de Linsley [Lin83] ,

$$h(x) = \begin{cases} -C_{02} * \log\left(\frac{x-C_{00}}{C_{01}}\right) & \text{si } 1036.1 \text{ m} \geq x > 631.1 \text{ m}, \\ -C_{12} * \log\left(\frac{x-C_{10}}{C_{11}}\right) & \text{si } 631.1 \text{ m} \geq x > 271.7 \text{ m}, \\ -C_{22} * \log\left(\frac{x-C_{20}}{C_{21}}\right) & \text{si } 271.7 \text{ m} \geq x > 3.039 \text{ m}, \\ -C_{32} * \log\left(\frac{x-C_{30}}{C_{31}}\right) & \text{si } 3.039 \text{ m} \geq x > 0.00128 \text{ m}, \\ -C_{42} * \log\left(\frac{x-C_{40}}{C_{41}}\right) & \text{si } 0.00128 \text{ m} \geq x > 0 \text{ m}. \end{cases} \quad (3.1)$$

Donde los elementos  $C_{ij}$  están definidos de acuerdo a la tabla ?? .

<b>C</b>	[0]	[1]	[2]
[0]	-186.5562	1222.6562	9941.8638
[1]	-94.9199	1144.9069	8781.5355
[2]	0.61289	1305.5948	6361.4304
[3]	0.0	540.1778	7721.7016
[4]	0.01128292	1	10000000

Table 3.1: Elementos de  $C_{ij}$  utilizados para hacer la conversión de profundidad a altura según el modelo de Linsley.

La relación entre profundidad atmosférica y altura se muestra en la Figura 3.2.

Luego, dada la altura  $h$  o, equivalentemente  $z$ , se determinaron  $x$  e  $y$  con relaciones geométricas en esféricas (ver ecuación 3.2 ). Como los mismos no tienen un sistema de referencia, se les asignó aleatoriamente una posición alrededor del telescopio y se los trasladó. A las posiciones en el suelo de las cascadas se las llamó posiciones base, y se incluyeron parámetros de radio mínimo y máximo y de ángulo azimutal mínimo y máximo de forma que el usuario pueda definir qué porción del espacio es alcanzado por el telescopio. Luego se detallará los valores usados de estos parámetros.

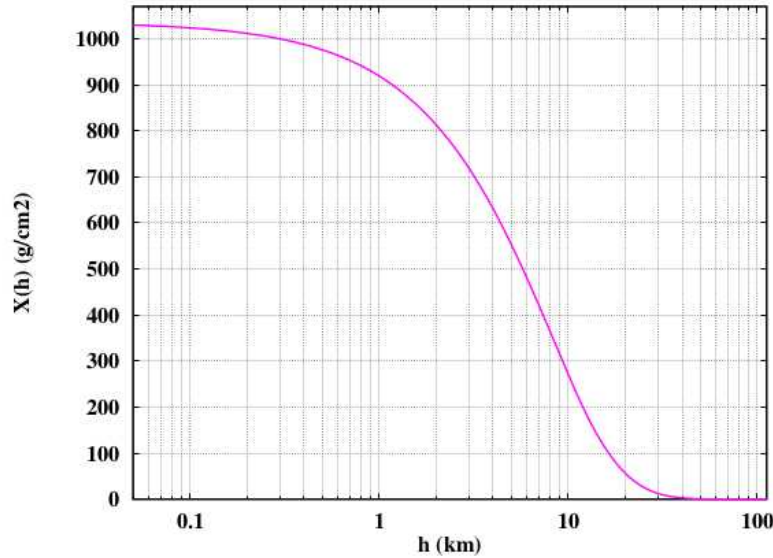


Figura 3.2: Profundidad vertical atmosférica  $X_v$  vs altura vertical  $h$  respecto del nivel del mar, de acuerdo con el modelo de Linsley.

Dado que

$$z = r \cos(\text{zenith}) \Leftrightarrow r = \frac{z}{\cos(\text{zenith})},$$

entonces

$$\begin{aligned} x &= r \cos(\text{azimuth}) \sin(\text{zenith}) = z \cos(\text{azimuth}) \tan(\text{zenith}) + \text{posición "x" en el suelo,} \\ y &= r \sin(\text{azimuth}) \sin(\text{zenith}) = z \sin(\text{azimuth}) \tan(\text{zenith}) + \text{posición "y" en el suelo,} \\ &\text{donde Azimuth y Zenith son los ángulos cenital y azimutal.} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Estos datos fueron ploteados usando **ROOT** [Tea14].

Los mismos datos fueron modificados para incluir opciones de filtrado en energía de partícula primaria, tipo de partícula generadora de la cascada, ángulos, etcétera.

En los gráficos 3.3 - 3.6 se presentan los histogramas realizados con y sin filtro de las variables correspondientes.

Por otra parte, se realizará un histograma de la distribución de posiciones (ver Figura 3.7), un histograma de las posiciones en el suelo, el cual se muestra en la Figura 3.8 y un gráfico 3D de la trayectoria de las cascadas en la Figura 3.9.

En las Figuras 3.8 y 3.9 se observa que las posiciones en el suelo de las cascadas simuladas son, efectivamente, aleatorias en un espacio de radio  $R = 10$  mil metros y  $\theta : [0, 2\pi]$  alrededor del telescopio. También puede notarse una distribución relativamente uniforme, aunque con preponderancia a ángulos cenitales de 70 grados, por ser esta variable uniforme en el seno según la simulación hecha en Aires.



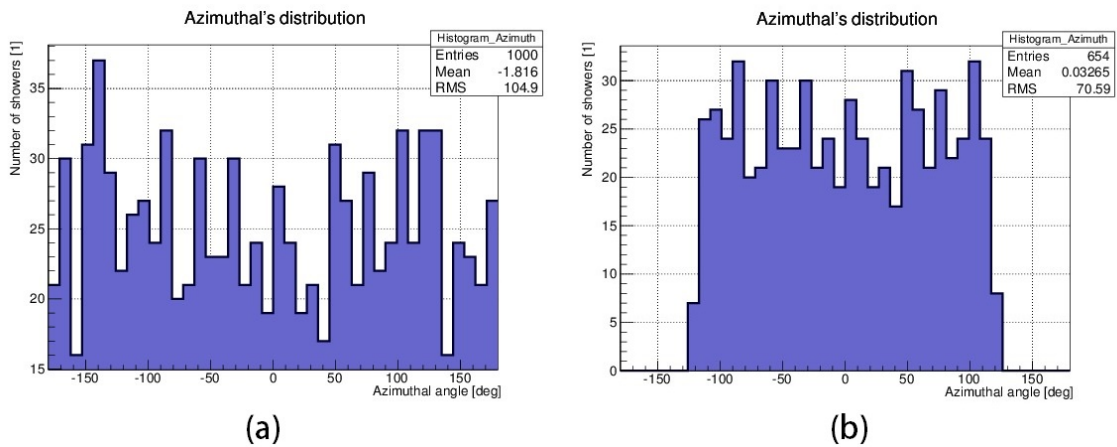


Figura 3.3: (a) Histograma del ángulo azimutal sin filtro. Se observan las mil entradas correspondientes a las mil lluvias graficadas. El rango del ángulo es de  $[-180^\circ, 180^\circ]$ . (b) Histograma del ángulo azimutal filtrado para ángulos mayores a  $120^\circ$  y menores a  $-120^\circ$ . Se observa un número menor de entradas en el histograma debido a las lluvias que no cumplieron con el filtro. El rango del ángulo es de  $[-180^\circ, 180^\circ]$ .

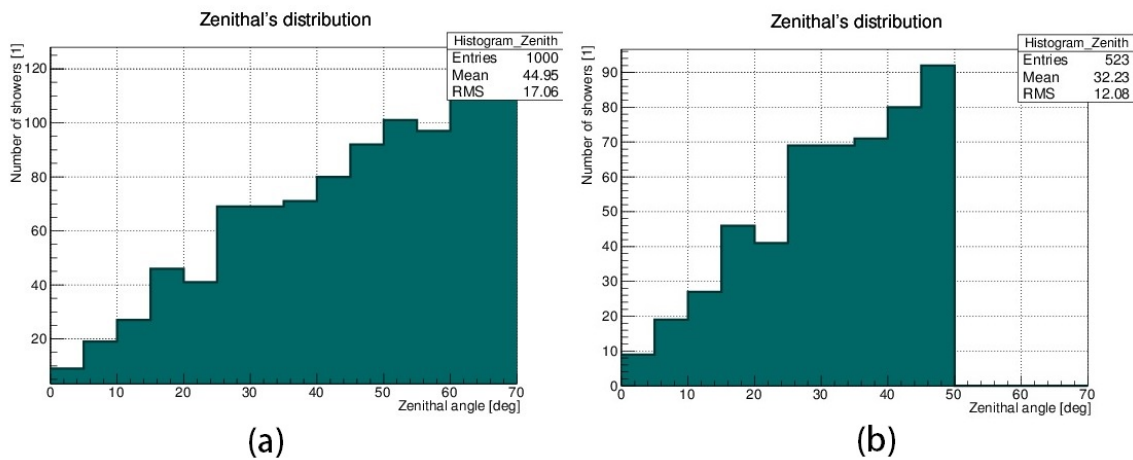


Figura 3.4: (a) Histograma del ángulo cenital sin filtro. Se observan las mil entradas correspondientes a las mil lluvias graficadas. El rango del ángulo es de  $[0^\circ, 72^\circ]$ . (b) Histograma del ángulo cenital filtrado para ángulos mayores a  $50^\circ$ . Se observa un número menor de entradas en el histograma debido a las lluvias que no cumplieron con el filtro. El rango del ángulo es de  $[0^\circ, 72^\circ]$ .

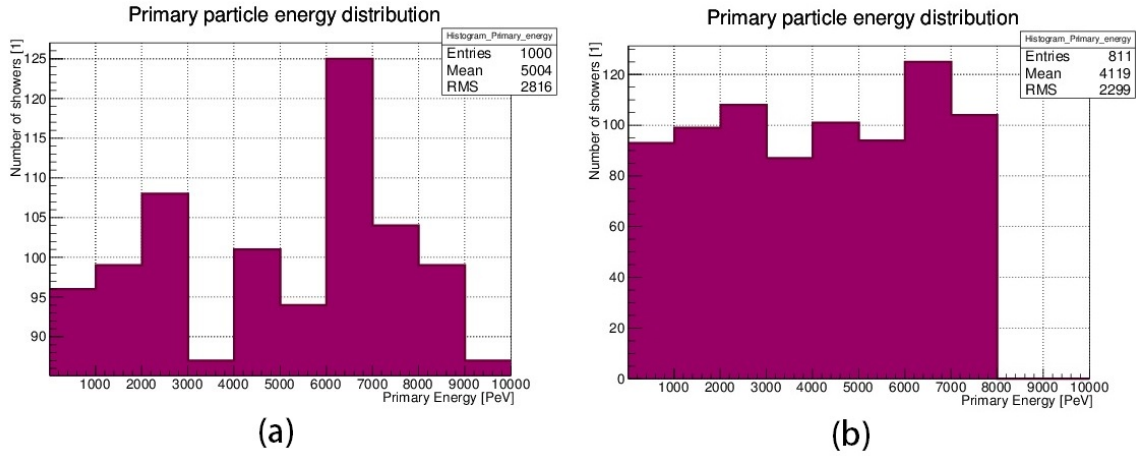


Figura 3.5: (a)Histograma de la energía de la partícula primaria sin filtro. Se observan las mil entradas correspondientes a las mil lluvias graficadas. El rango de energía es de  $[10\text{PeV}, 10\text{EeV}]$ . (b)Histograma de la energía de la partícula primaria filtrada para energías entre 0 y 80mil PeV. Se observa un número menor de entradas en el histograma debido a las lluvias que no cumplieron con el filtro. El rango de energía es de  $[10\text{PeV}, 10\text{EeV}]$ .

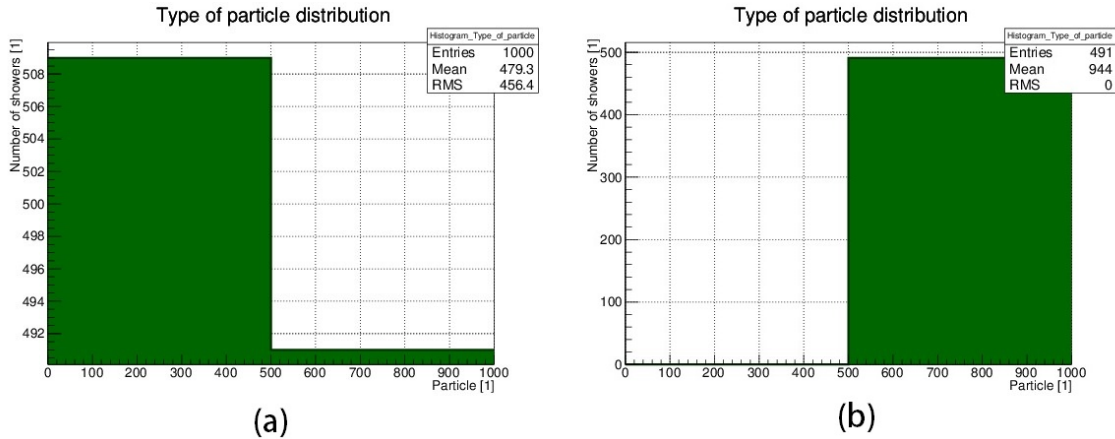


Figura 3.6: (a)Histograma del tipo de partícula primaria sin filtro. Se observan las mil entradas correspondientes a las mil partículas de las lluvias graficadas. El valor 31 se corresponde con los protones y el 944 con los hierros. El histograma se dividió en dos porciones que se corresponden a estas dos diferentes partículas. La primer porción o bin representa la cantidad de protones, mientras que la segunda la cantidad de hierros. (b)Histograma del tipo de partícula primaria filtrada en protones. Se observan las entradas correspondientes sólo a las cascadas provenientes de un hierro. El valor 31 se corresponde con los protones y el 944 con los hierros. El histograma se dividió en dos porciones que se corresponden a estas dos diferentes partículas. La primer porción o bin representa la cantidad de protones, mientras que la segunda la cantidad de hierros.

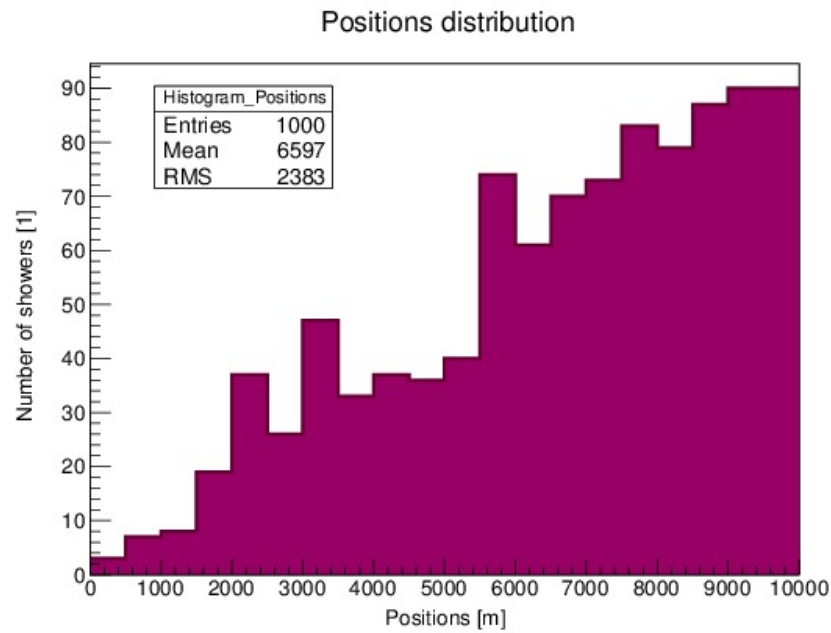


Figura 3.7: Histograma de la distribución de posiciones de las cascadas simuladas.

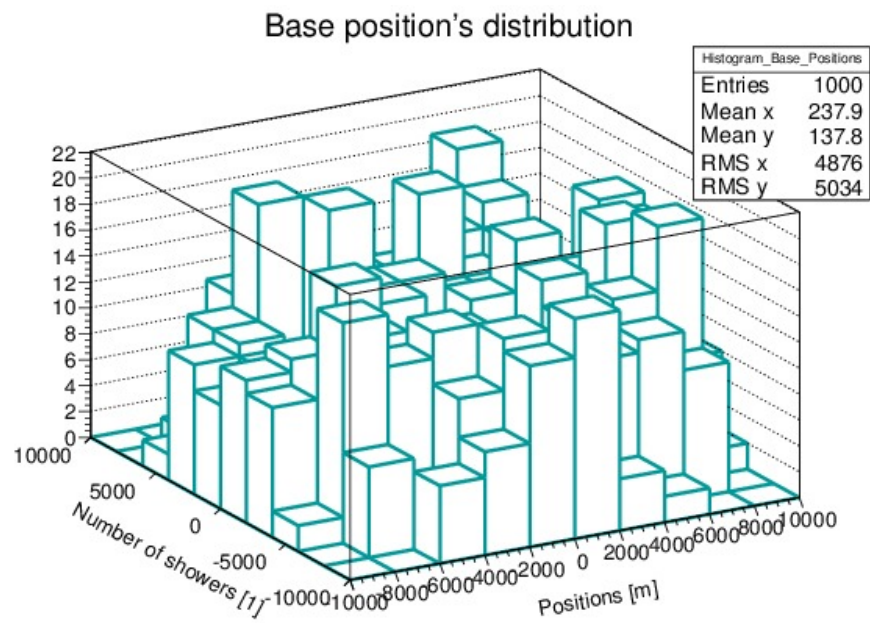


Figura 3.8: Histograma tipo “lego” de las posiciones en el suelo de las cascadas simuladas.

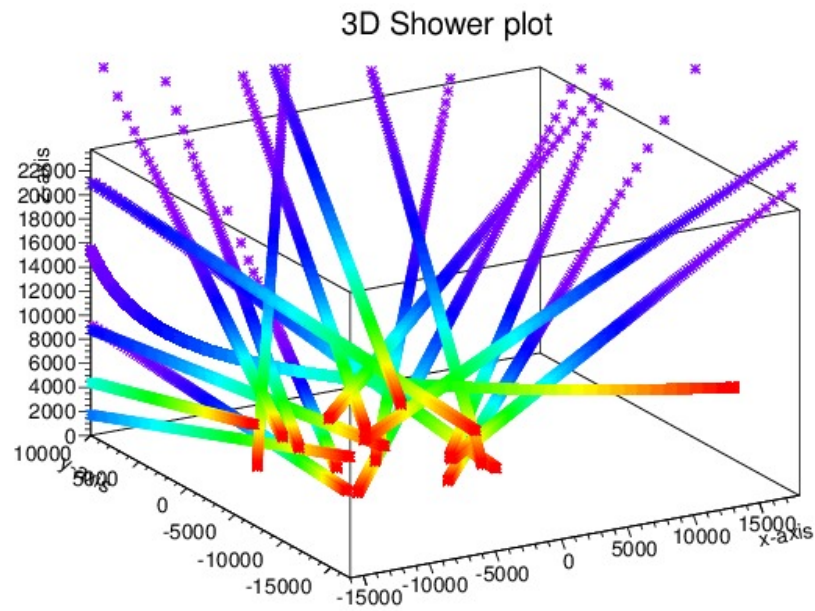


Figura 3.9: Gráfico 3D de la trayectoria de las cascadas simuladas.

## 4. Simulación de la antena

En esta etapa del trabajo se incluyeron dos telescopios cada uno con 5 píxeles. Un telescopio ubicado en posición  $(0, 0, 30\text{ m})$  y otro en posición  $(100\text{ m}, 0, 30\text{ m})$  respecto al anterior. Los píxeles fueron ubicados a distancias de un grado entre sí. El primer píxel (Pixel 0) se ubicó en paralelo al eje del telescopio, esto es, con vector director  $(0, 0, 1)$ . Luego se ubicaron dos en paralelo al eje x pero con diferente dirección de apuntamiento; y por último, dos en paralelo al eje y, también con diferente dirección de apuntamiento. Esto puede ser visto en el esquema 4.1 .

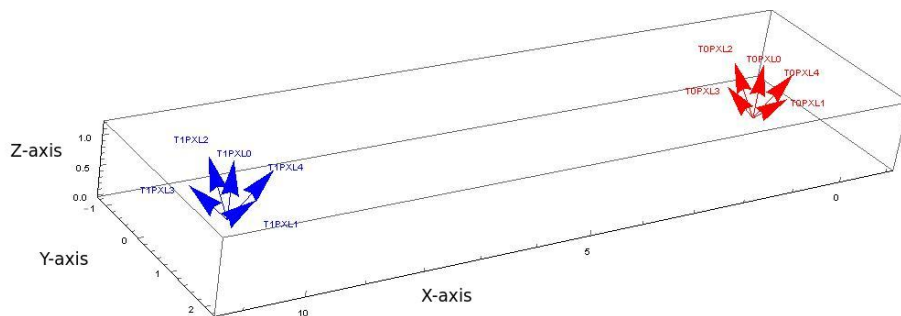


Figura 4.1: Esquema de la distribución de los dos telescopios y los cinco píxeles de cada uno en el espacio. Las flechas indican la dirección de apuntamiento de cada píxel, mientras que el origen del mismo indica la posición en el espacio de los telescopios.

Se creó una función que rota el telescopio y como consecuencia, los píxeles pertenecientes a él, simultáneamente. De esta manera se tiene en cuenta una dirección de visión del telescopio diferente en un futuro, definida por el usuario.

Se estableció que cada píxel tendría una función ganancia de tipo gaussiana entre el ángulo director del mismo y algún punto del espacio  $(\theta)$ . Esta se muestra en siguiente

ecuación

$$G(\theta) = Ae^{-\frac{(\theta-B)^2}{2C^2}} + D, \quad (4.1)$$

dónde A,B,C y D son parámetros que dependen de cada pixel y se explican a continuación. A su vez la ganancia está definida de tal forma que pueda ser modificada fácilmente por el usuario, ya que las funciones se incluyen como un puntero en la estructura. Sin embargo para la antena considerada, se considera una buena aproximación a la realidad.

Para el cálculo de ganancia, se definieron los siguientes parámetros de gaussiana para cada telescopio y cada píxel:

- $A = 4\pi d^2/\lambda^2$ : amplitud de la gaussiana,
- $B = 0$ : corrimiento del ángulo,
- $C = \sigma = 0.5$  deg: ancho de gaussiana en grados,
- $D = 0$ : constante de la función,
- $\lambda = 0.21$  m: longitud de onda que emite la antena en metros y
- $d = 30$  m: diámetro de la antena en metros.

Luego se calculó el ángulo correspondiente a cada punto de profundidad calculado. Este se refiere al ángulo formado entre el vector unitario relacionado con la dirección de apuntamiento del píxel estudiado y el vector de la posición correspondiente de la lluvia. Esto se realizó para cada nivel de profundidad.

Con estos resultados se calculó la ganancia a partir de la expresión 4.2 evaluada en el angulo encontrado.

Dado que para dos telescopios con sólo cinco píxeles cada uno la estadística de lluvias con ganancia no nula es muy baja, se procedió a forzar el punto de la cascada en el suelo, es decir se parcheó el código para que todas las cascadas pasen exactamente por encima del telescopio central. Esto se hizo sólo para lograr tener mayor estadística en el estudio de las cascadas, aunque en un futuro, para tener un estudio realista, esto se eliminó. En vez de tomar una posición aleatoria, se ubicó a la cascada con coordenada  $x$  de tal forma que siempre atravesara el telescopio. Además, se utilizó azimuth cero, con lo cual la coordenada  $y$  siempre se anula como se puede notar en la expresion 3.2.

Con estos cambios se graficó la ganancia en un mapa de colores como muestra la Figura 4.2. El gráfico muestra en cada uno de los primeros 5 recuadros la ganancia para cada pixel en un punto del espacio. Mientras que en el restante se muestran todas las ganancias sumadas, es decir, la ganancia para todo el telescopio.

Luego se calculó la señal para cada píxel y cada telescopio. Para ello primero se encontró la distancia del telescopio al punto considerado de la cascada. A esta distancia se la denominó “showerdistance”. Se tomó la señal como sigue:

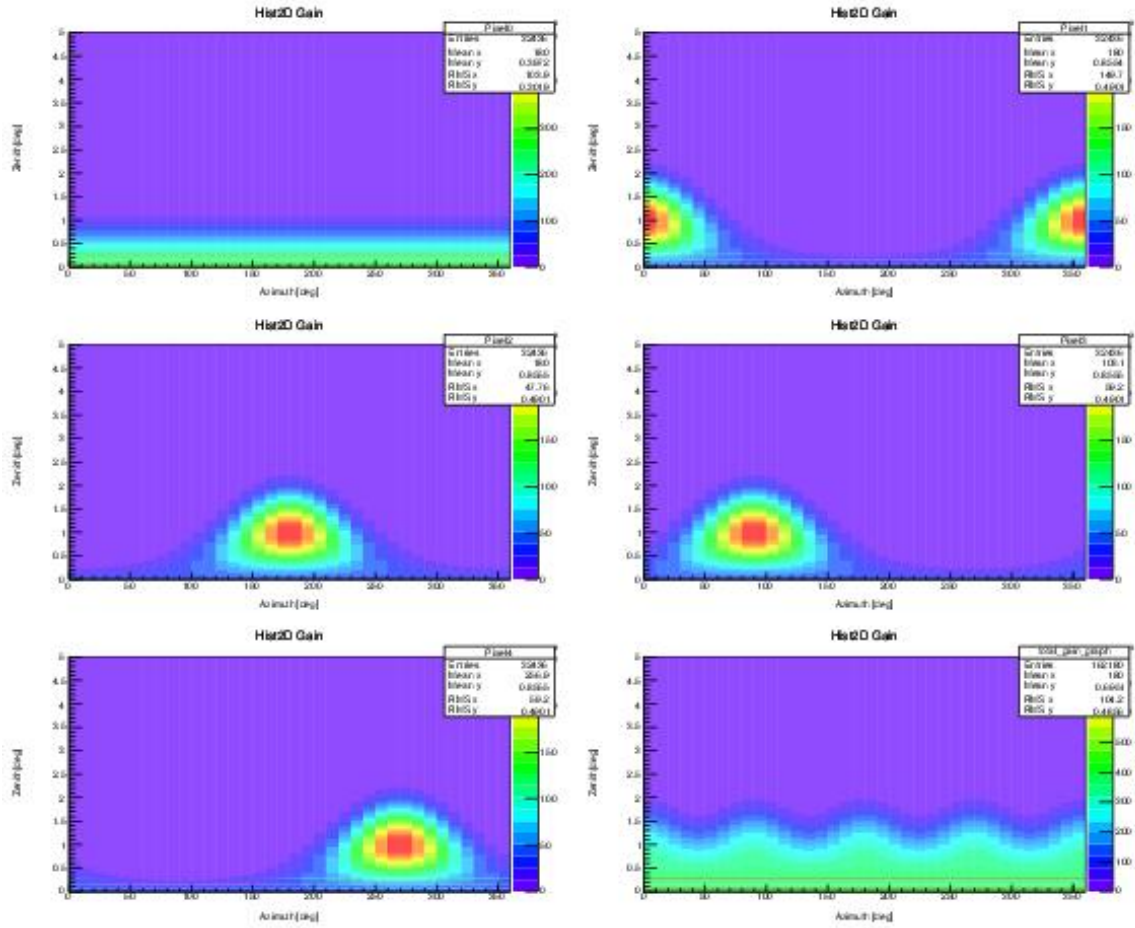


Figura 4.2: Mapa de colores de la ganancia para cada pixel en cada punto del espacio, como así también de todos los pixeles juntos. Los puntos rojos representan las regiones donde hay mayor ganancia mientras que los azules donde hay menor.

$$\text{Señal} = S_0 * (\text{número de partículas}) * \frac{(\text{ganancia})}{(\text{showerdistance})^2}, \quad (4.2)$$

donde dado que la señal se calcula para un dado punto del espacio, el número de partículas corresponde a ese dado lugar. Lo mismo para la ganancia y la distancia a la lluvia. Por último  $S_0$  es un factor constante que tiene que ver con una extensión de un experimento desarrollado en SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) [Gor+08]. Básicamente proponen una ecuación que relaciona el flujo que se mide con el que se espera medir con otras condiciones dadas por

$$S_0 = I_0 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) \frac{d^2}{N_{ref}}, \quad (4.3)$$

donde  $I_0 = 4 \times 10^{10} Jy$  es la densidad de flujo de referencia,  $\rho/\rho_0 = 6$  es una fracción que tiene en cuenta el cambio de densidad desde donde se realiza el experimento y la atmósfera,

$d = 0.5 m$  es el detector del experimento y  $N_{ref} = 2 \times 10^9$  es el número de partículas promedio que se obtiene a una energía del primario de  $3000 GeV$ . Este último valor se obtuvo de hacer un gráfico como se muestra en la figura 4.3 .

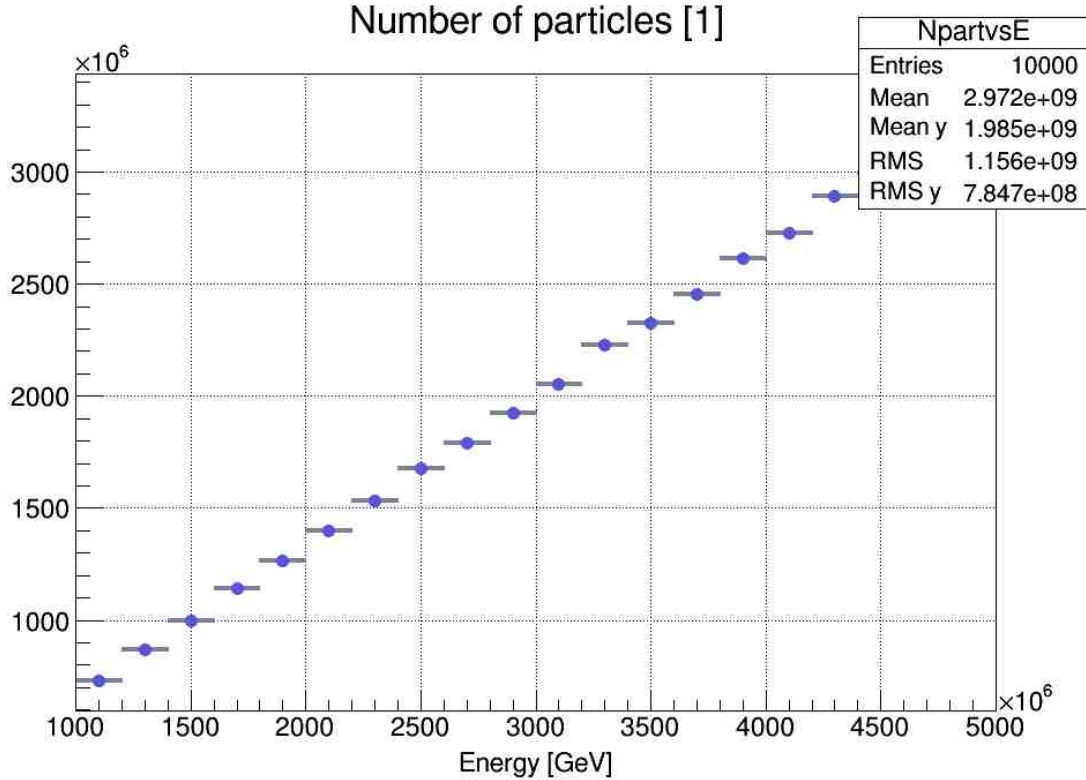


Figura 4.3: Número de partículas promedio en función de la energía de la partícula primaria.

Se graficaron histogramas de distribución de posiciones en el suelo para todas las lluvias, filtradas por señal, y filtradas por ganancia. Esto se muestra en la Figura 4.4. El gráfico se realizó de forma que el usuario pueda insertar el número de píxeles y telescopios que desea estudiar. También se graficaron las posiciones en el suelo para los cinco píxeles, filtrados de la misma forma. Esto último se presenta en la Figura 4.5

Los mismos gráficos se realizaron para geometrías no forzadas, es decir, con posiciones en el suelo aleatorias, y los ángulos originales de las cascadas. En primera instancia se graficó con la dirección de visión del telescopio en  $(1, 0, 0)$ , y dado que en esta dirección tiene una simetría azimutal, la porción que alcanza el telescopio es de  $\theta : [0, 2\pi]$  y  $R : [0, 20000 m]$ . Estos gráficos son la Figura 4.6 y 4.7. En segunda instancia se realizaron los mismos gráficos pero con una rotación del telescopio ( $0$  en azimuth y  $45^\circ$  en zenith) y, por lo tanto, de sus píxeles. Al rotar el telescopio su rango de visión quedó acotado a  $\theta : [-20^\circ, 20^\circ]$  y  $R : [0, 20000 m]$ . Esto se muestra en las Figuras 4.8 y 4.9.



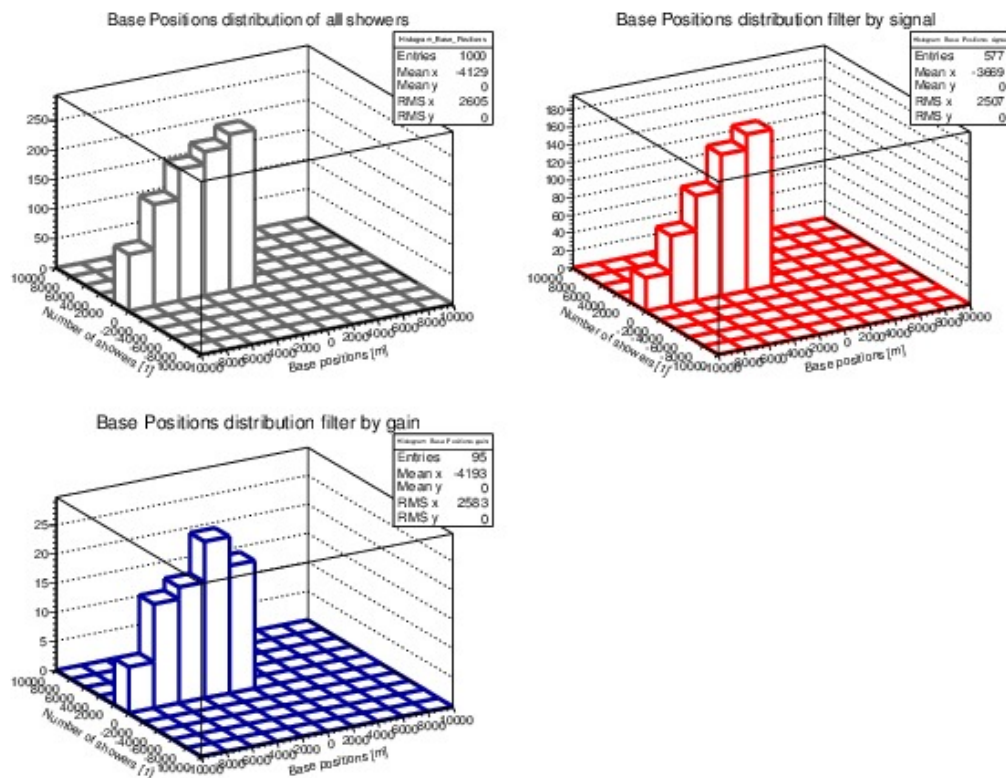


Figura 4.4: Se presenta en gris el histograma de todas las cascadas, en rojo las cascadas filtradas por señal, y en azul por ganancia. Los gráficos son del píxel 1 y con una geometría forzada. Notar que de las mil cascadas el píxel únicamente ve la mitad.

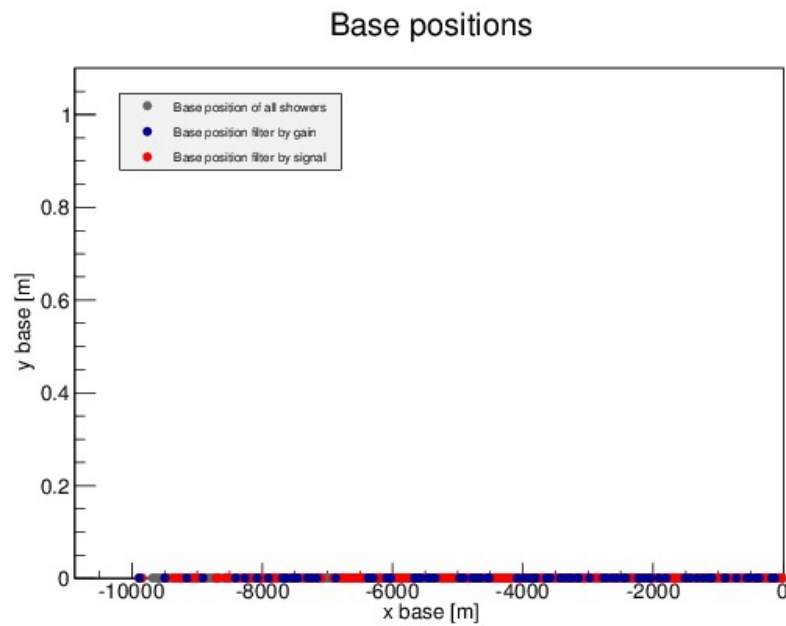


Figura 4.5: Se presenta en gris las posiciones en el suelo de todas las cascadas, en rojo las cascadas filtradas por señal, y en azul por ganancia. Los gráficos son del píxel 1 y con una geometría forzada. Se observa como era de esperar, posiciones cero en la coordenada "y" de las cascadas, esto se corresponde a azimuth cero. Notar la diferencia con 4.7 .

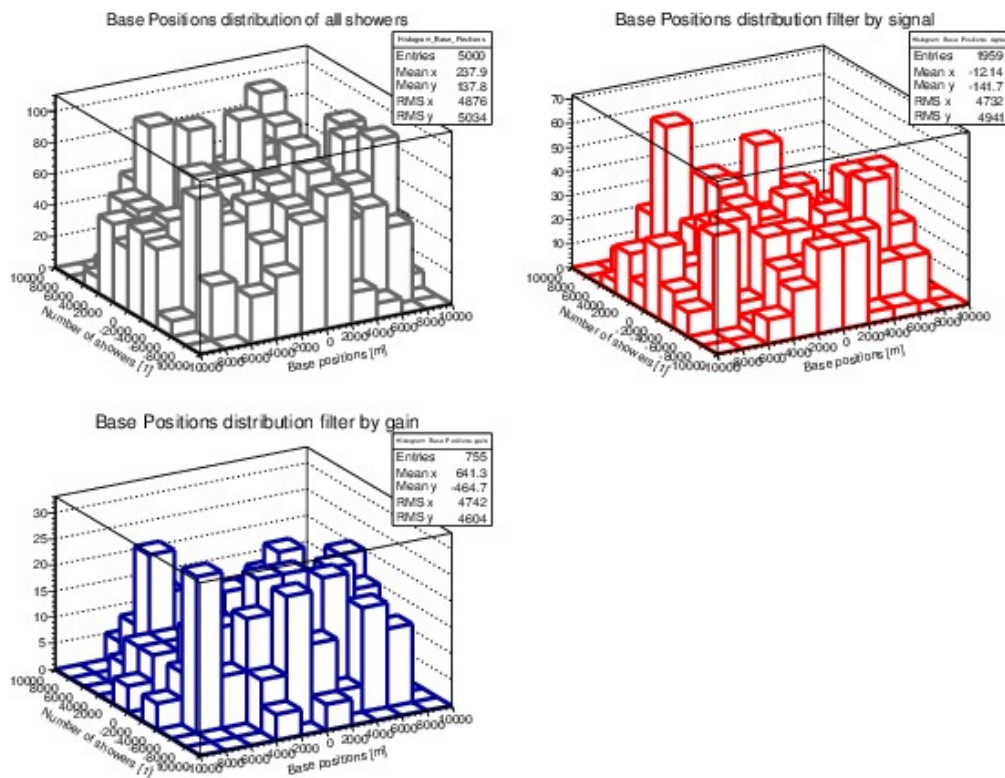


Figura 4.6: Se presenta en gris el histograma de todas las cascadas, en rojo las cascadas filtradas por señal, y en azul por ganancia. Los gráficos son de los cinco píxeles y con una geometría no forzada. El telescopio apunta en dirección (0,0,1) y tiene un rango de visión del espacio completo. Por ello se observa que la señal y ganancia son altas en todo el círculo donde caen las lluvias

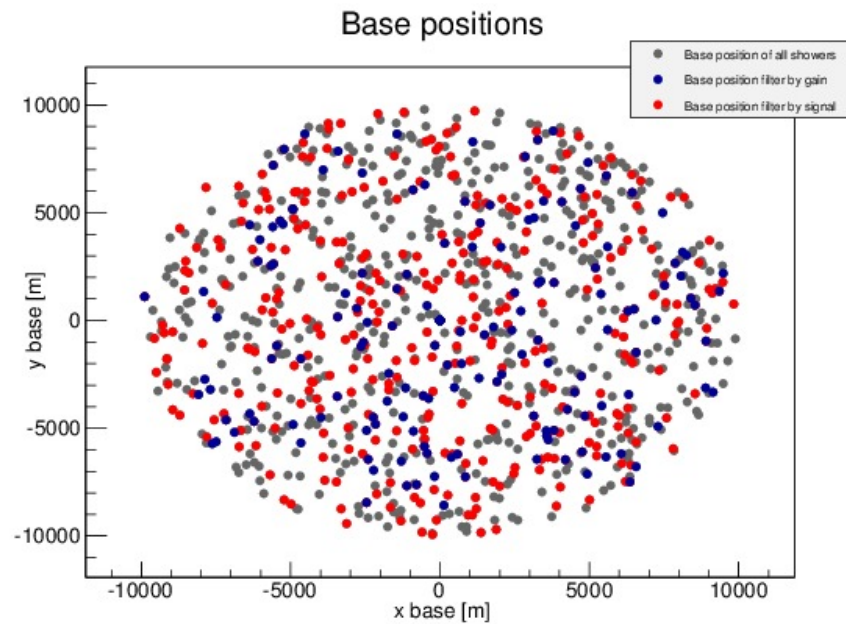


Figura 4.7: Se presenta en gris las posiciones en el suelo de todas las cascadas, en rojo las cascadas filtradas por señal, y en azul por ganancia. Los gráficos son de los cinco píxeles y con una geometría no forzada. El telescopio apunta en dirección  $(0,0,1)$  y tiene un rango de visión del espacio completo. Por ello se observa señal y ganancia en todo el círculo donde caen las lluvias

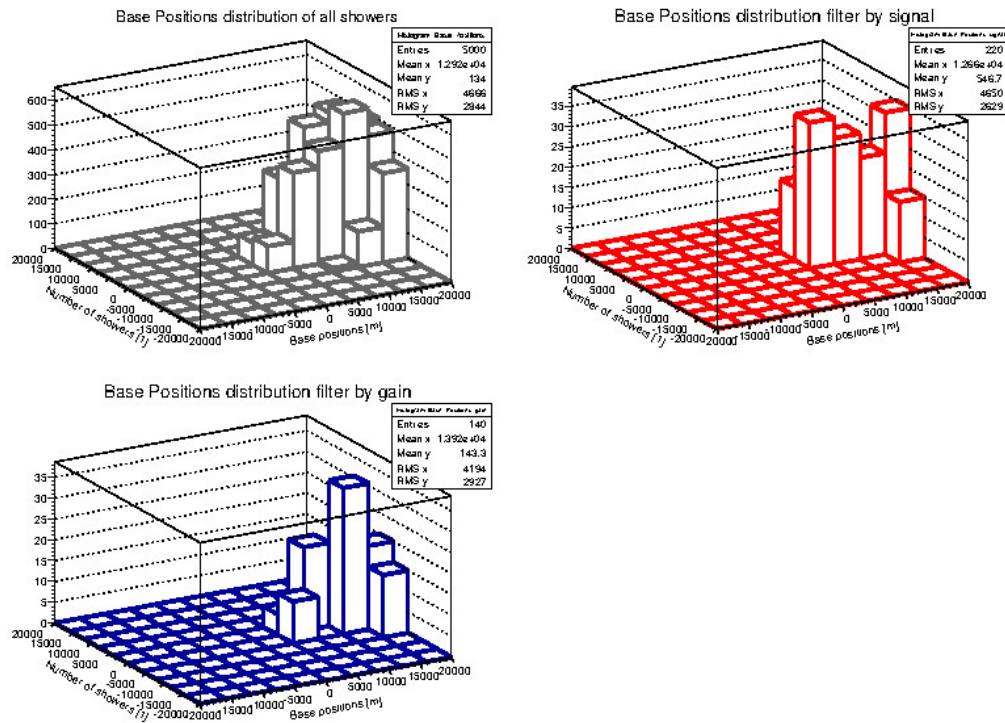


Figura 4.8: Se presenta en gris el histograma de todas las cascadas, en rojo las cascadas filtradas por señal, y en azul por ganancia. Los gráficos son de los cinco píxeles y con una geometría no forzada. El telescopio apunta en dirección  $(0,0,45^\circ)$  y tiene un rango de visión del espacio acotado en  $\theta : [-20^\circ, 20^\circ]$ .

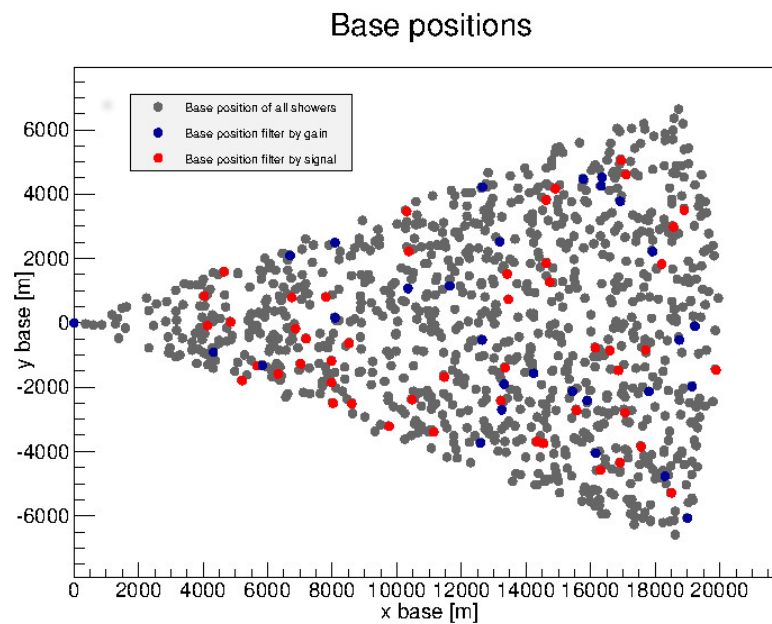


Figura 4.9: Se presenta en gris las posiciones en el suelo de todas las cascadas, en rojo las cascadas filtradas por señal, y en azul por ganancia. Los gráficos son de los cinco píxeles y con una geometría no forzada. El telescopio apunta en dirección  $(0,0,45^\circ)$  y tiene un rango de visión del espacio acotado en  $\theta : [-20^\circ, 20^\circ]$ .

## 5. Simulación de la emisión y propagación

En esta sección, se calcularon los tiempos de emisión y recepción de la antena. Para ello se usó la distancia “showerdistance” calculada en el capítulo anterior. Luego se encontró la distancia del primer punto de la cascada (a 90mil metros de altura, con azimut y cenit correspondiente a cada cascada) al punto considerado de la cascada. A esta otra distancia se la llamó “injectiondistance”. Con estos resultados y mediante las expresiones

$$t_{emission} = \frac{injectiondistance}{velocity\_emission} \quad y \quad (5.1)$$

$$t_{reception} = t_{emission} + \frac{showerdistance}{velocity\_reception}, \quad (5.2)$$

fue posible realizar el cálculo. Donde  $t_{emission}$  es el tiempo de emisión,  $t_{reception}$  el de recepción,  $velocity\_emission$  es la velocidad de emisión (o velocidad de la luz); y  $velocity\_reception$  la velocidad de recepción (velocidad de la luz/índice de refracción, donde el índice de refracción del aire fue considerado 1.0003).

Se muestra a continuación un gráfico de estos tiempos para la cascada número 998.

Por otra parte, se graficaron tanto para un telescopio como para dos, gráficos de número de partículas, ganancia y señal vs tiempo de emisión para una lluvia determinada. Estos se muestran en las Figuras 5.2 y 5.3.

También se realizaron gráficos de el ángulo que forma la lluvia y el píxel en cuestión. Uno de ellos se muestra en la Figura 5.4

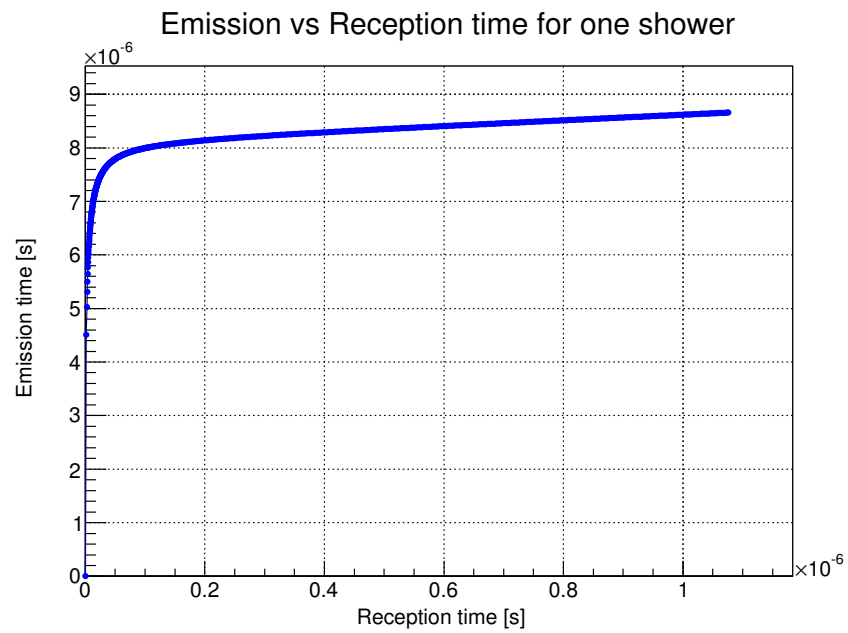


Figura 5.1: Gráfico de tiempo de emisión versus tiempo de recepción para la cascada 998. Se observa que los primeros puntos de la cascada llegan al mismo tiempo al telescopio, esto es debido a que la geometría de la cascada es bastante vertical y por lo tanto los primeros puntos recorren la misma distancia hasta el telescopio.



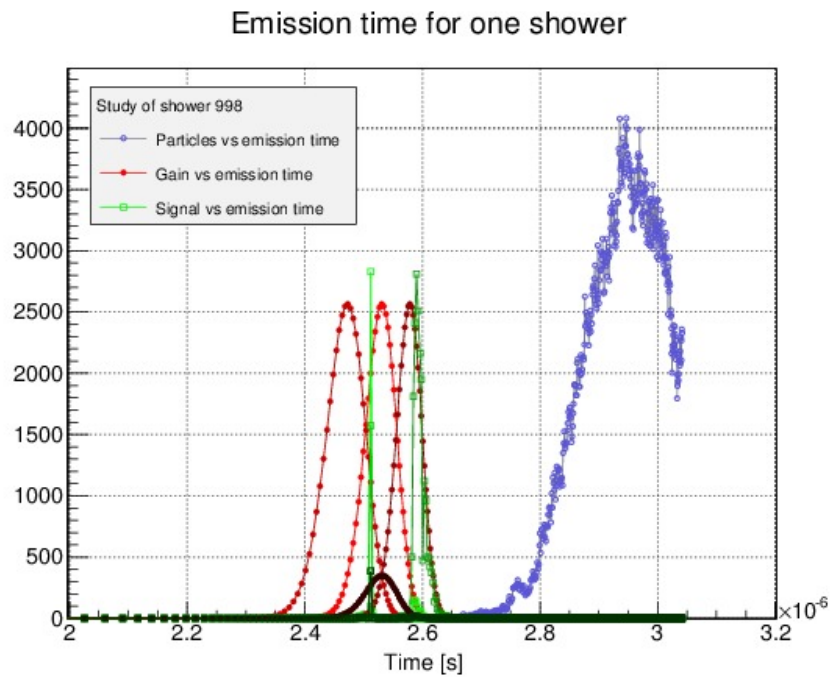


Figura 5.2: Gráfico número de partículas, ganancia y señal en función del tiempo de emisión para para la cascada 998, un telescopio, y cinco píxeles. El telescopio en este caso tiene una dirección de apuntamiento en  $(0,0,1)$ . Se observa una superposición en la ganancia de dos píxeles (píxel 1 y 2). Por otro lado se observan tres picos en la ganancia, el central se corresponde al píxel paralelo al telescopio, los otros a los píxeles 3 y 4 respectivamente.

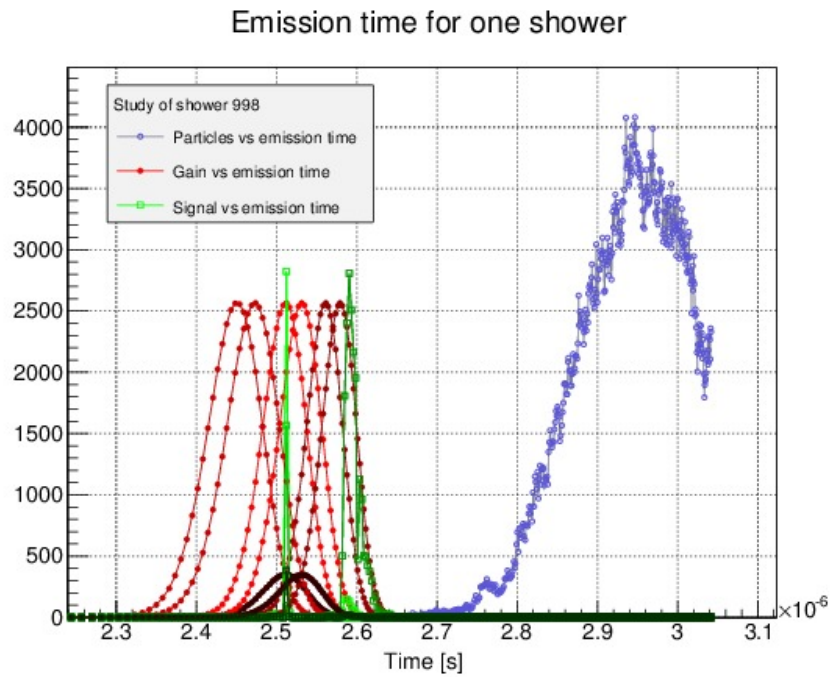


Figura 5.3: Gráfico número de partículas, ganancia y señal en función del tiempo de emisión para para la cascada 998, dos telescopio, y cinco píxeles cada uno. Los telescopios en este caso tiene una dirección de apuntamiento en  $(0,0,1)$  y están separados 100 metros. Se observa una superposición en la ganancia de dos píxeles (píxel 1 y 2). Por otro lado se observan tres picos en la ganancia, el central se corresponde al píxel paralelo al telescopio, los otros a los píxeles 3 y 4 respectivamente.

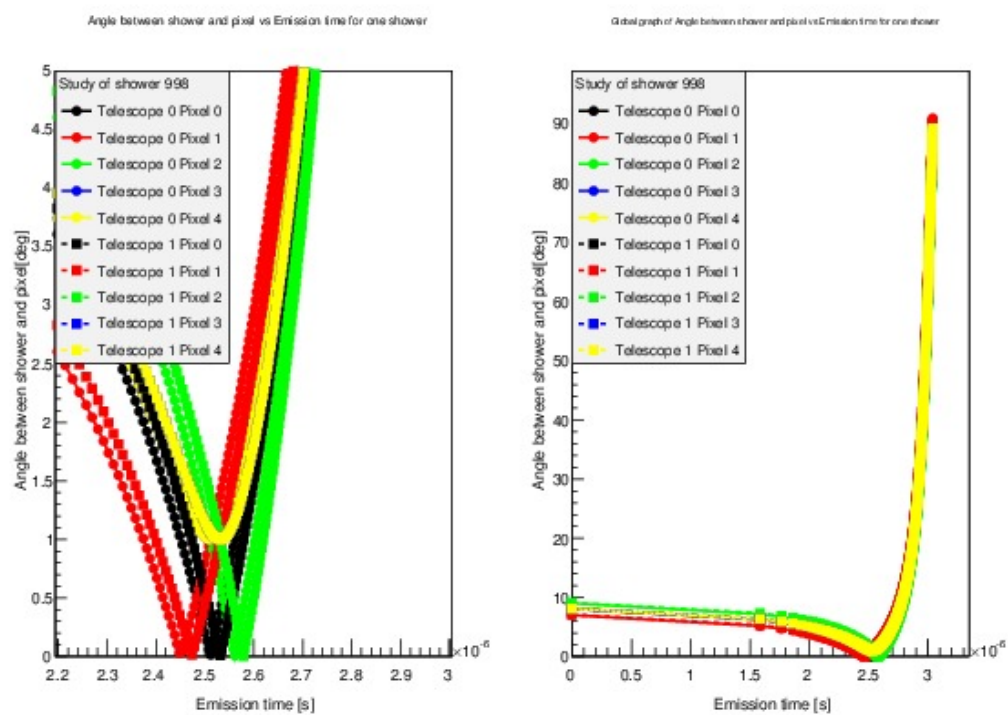


Figura 5.4: Ángulo entre la lluvia y el píxel en cuestión versus tiempo de emisión.



## 6. Simulación de electrónica

Como se nombró anteriormente la distribución de puntos de Aires viene dada por el modelo de Linsley [Lin83] . Debido a que puede suceder que a medida que una cascada pase por arriba de un pixel los puntos más cercanos no caigan en el campo de visión del mismo, se procedió a interpolar los puntos para tener mayor estadística entre los mismos. Es decir, se pasó de tener 511 puntos distribuidos uniformemente de acuerdo a la masa atmosférica a una distribución uniforme de puntos en la altura con 10.000 puntos. Es decir que como máximo se puede interpolar desde los 90 km de altura que es donde empieza la cascada, es decir que se tiene un punto cada 9 metros. Pero en el caso de interpolar desde más cerca, debido a que no tiene sentido guardar información de la cascada desde puntos a tanta altitud, el número de puntos será menor a 9 metros. Se puede notar en la figura 6.1 el tiempo de emisión de la cascada hasta un cierto pixel en el espacio. A diferencia del modelo anterior donde no se interpolaron los puntos, se obtendrían menos puntos, más equiespaciados. Ahora dado este nuevo método, se usará para recorrer cascadas y por ende calcular señales al tiempo de emisión. <sup>1</sup>.

En la figura 6.2 se puede ver el número de partículas, la ganancia y señal **interpolados** para la cascada 998 utilizando dos telescopios y cinco píxeles cada uno. Notar la diferencia con la figura del capítulo anterior sin interpolar 5.3 , la densidad de puntos es claramente superior.

De la misma manera en la figura 6.3 se muestra el tiempo de emisión vs el tiempo de recepción interpolado para la lluvia 998 como se hizo en 5.1 sin interpolar.

En este punto se tiene para cada lluvia la señal que mide cada telescopios y todos sus pixeles desde que la misma se genera a 90km de altura hasta que la misma toca el suelo. Pero la intención no es almacenar toda la información. Es por ello que si una cascada disparaba,

---

<sup>1</sup>Idealmente hubiera sido preferible trabajar con el tiempo de recepción 5.1 en lugar del tiempo de emisión ya que las antenas lo que miden es el tiempo de recepción. Pero esta es una modificación para hacer a futuro.

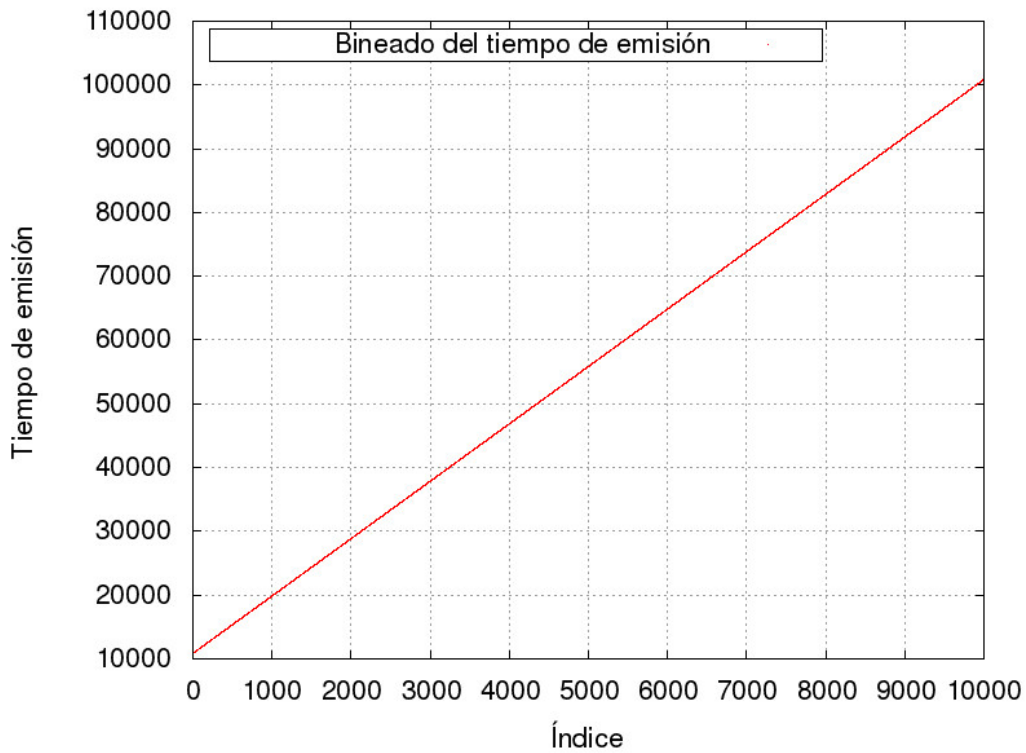


Figura 6.1: A diferencia anterior donde se tenían 511 puntos distribuidos uniformemente en masa atmosférica según el modelo de Linsley [Lin83], ahora se tienen puntos distribuidos uniformemente desde que la cascada toca el suelo hasta alguna altura en el espacio que se quiera estudiar, siendo como máximo donde inicia la cascada a  $90\text{ km}$  de altura.

es decir que si la cascada era detectada o, lo que es equivalente, su señal era mayor a un cierto valor mínimo conocido como “threshold”, se almacenaba una cantidad de tiempo antes y después de cuando disparó el detector. Esta cantidad está determinada por la electrónica y es el buffer del sistema.

El threshold está definido como

$$T = \frac{k_B T_{SYS}}{A_{eff}}, \quad (6.1)$$

donde  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  es la constante de Boltzmann,  $T_{SYS} = 35 \text{ K}$  es la sensibilidad del telescopio y  $A_{eff} = \pi(d/2)^2$  es el área efectiva del telescopio, con  $d = 30 \text{ m}$  la dimensión del plato.

A continuación, en la tabla ?? se muestra para 1.000 lluvias sin forzar el número de cascadas que dispararon y el número de eventos detectados para ciertas configuraciones. Se graficaron las posiciones de las lluvias simuladas filtradas por ganancia y señal y las distribuciones de las mismas respectivamente, para lluvias cayendo para cualquier ángulo sin inclinación de los telescopios y equivalen a filtrar las figuras 4.8 y 4.9 con un filtro en señal que equivale al threshold.

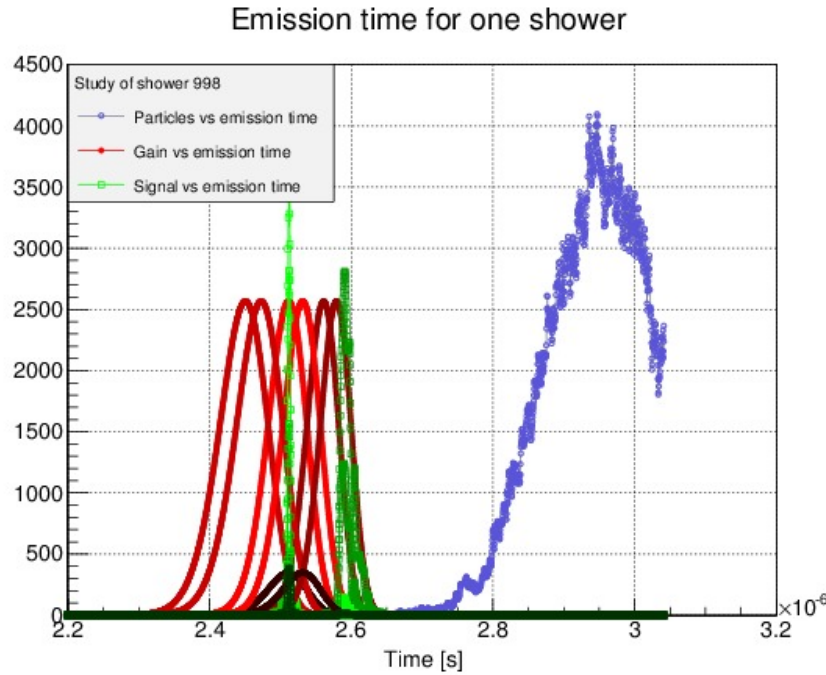


Figura 6.2: Gráfico número de partículas, ganancia y señal en función del tiempo de emisión para para la cascada 998, dos telescopio, y cinco píxeles cada uno. Los telescopios en este caso tiene una dirección de apuntamiento en  $(0,0,1)$  y están separados 100 metros. Se observa una superposición en la ganancia de dos píxeles. Por otro lado se observan tres picos en la ganancia, el central se corresponde al píxel paralelo al telescopio.

Distribución angular	Inclinación telescopios	Lluvias disparadas	Eventos detectados
$\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$	No	9	34
$\theta : [-20^\circ, 20^\circ]$	Ambos $45^\circ$ en cenit	12	90

Table 6.1: Configuración de los telescopios y del sistema con el número de lluvias y eventos detectados con 1.000 simulaciones.

Se hizo un tratamiento análogo para 10.000 lluvias simuladas sin forzar la posición por la que pasan. Las distintas configuraciones simuladas se muestran en la tabla ?? . En las figuras 6.5 y 6.4 se muestran las posiciones de las lluvias simuladas filtradas por ganancia y señal y las distribuciones de las mismas respectivamente, cayendo en el suelo para cualquier ángulo y sin inclinar los telescopios. Mientras que en las figuras 6.7 y 6.6 se muestran los mismos gráficos pero inclinando los telescopios  $45^\circ$  en cenit para un telescopio y en el sentido contrario para el otro. Se puede notar que a medida que los telescopios se rotan en sentido opuesto yendo desde la no inclinación (cenit = 0) hasta el máximo (cenit = 45) el número de lluvias incrementa considerablemente.

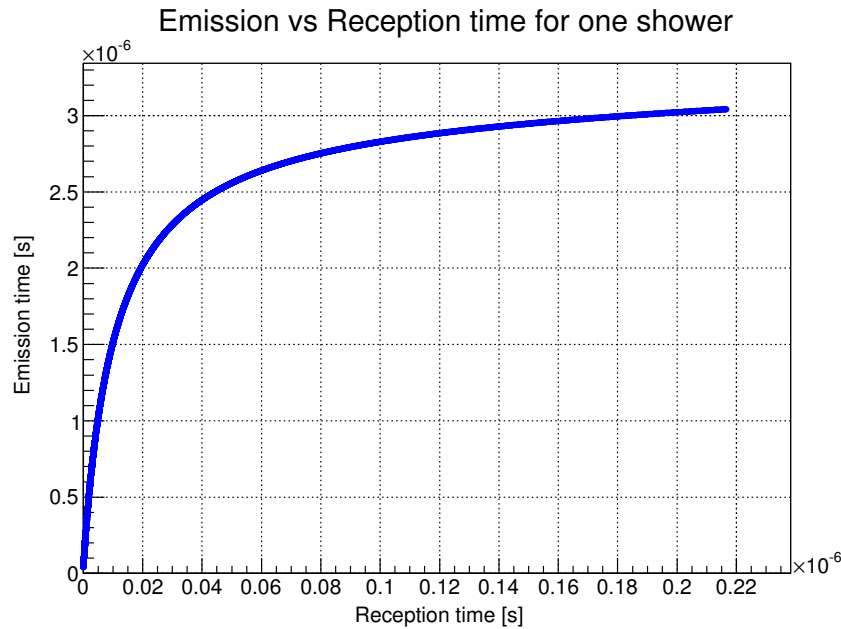


Figura 6.3: Gráfico de tiempo de emisión versus tiempo de recepción para la cascada 998. Se observa que los primeros puntos de la cascada llegan al mismo tiempo al telescopio, esto es debido a que la geometría de la cascada es bastante vertical y por lo tanto los primeros puntos recorren la misma distancia hasta el telescopio.

Distribución angular	Inclinación telescopios	Lluvias disparadas	Eventos detectados
$\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$	No	94	605
$\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$	Ambos $45^\circ$ cenit	153	953
$\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$	Tel0 $45^\circ$ y Tel1 $-45^\circ$ en cenit	261	875
$\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$	Tel0 $20^\circ$ y Tel1 $-20^\circ$ en cenit	175	618
$\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$	Tel0 $30^\circ$ y Tel1 $-30^\circ$ en cenit	187	668

Table 6.2: Configuración de los telescopios y del sistema con el número de lluvias y eventos detectados con 10.000 simulaciones.

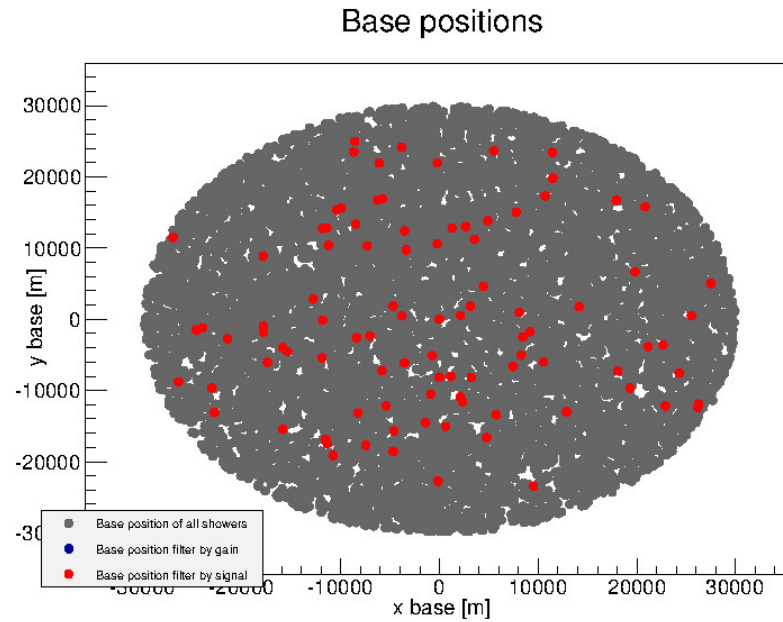


Figura 6.4: Gráfico de las posiciones en el espacio de las lluvias totales simuladas, las filtradas por ganancia y las disparadas con una distribución angular de  $\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$  y ambos telescopios sin inclinar.

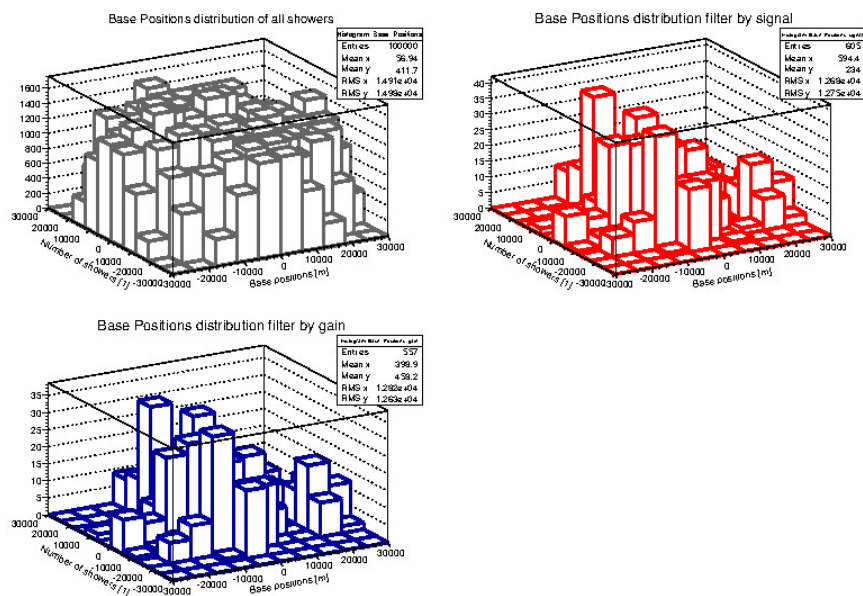


Figura 6.5: Gráfico de la distribución de las posiciones de las lluvias totales simuladas, las filtradas por ganancia y las disparadas con una distribución angular de  $\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$  y ambos telescopios sin inclinar.



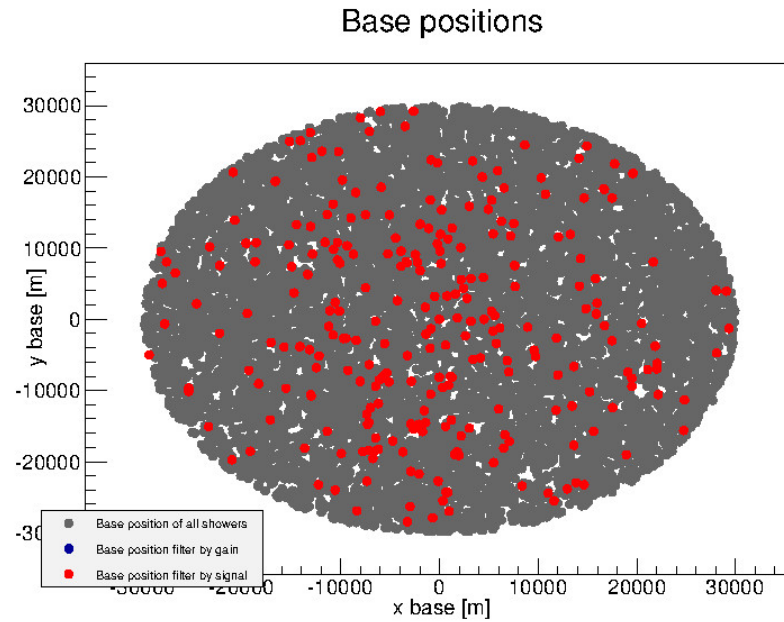


Figura 6.6: Gráfico de las posiciones de las lluvias totales simuladas, las filtradas por ganancia y las disparadas con una distribución angular de  $\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$  y el telescopio 0 inclinado en  $45^\circ$  de cenit, mientras que el 1 inclinado en el sentido opuesto.

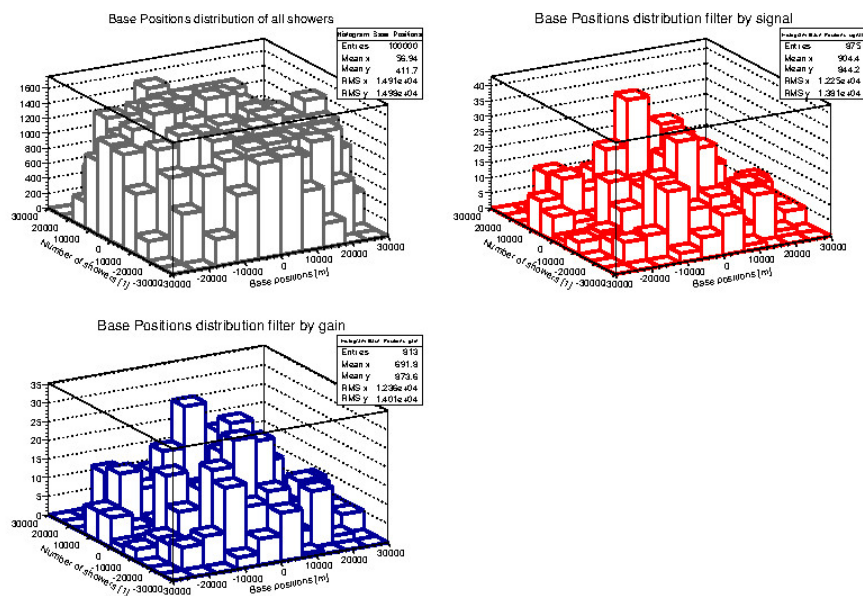


Figura 6.7: Gráfico de la distribución de las posiciones de las lluvias totales simuladas, las filtradas por ganancia y las disparadas con una distribución angular de  $\theta : [-180^\circ, 180^\circ]$  y el telescopio 0 inclinado en  $45^\circ$  de cenit, mientras que el 1 inclinado en el sentido opuesto.



## 7. Futuras mejoras

En lo que respecta a mejoras de la simulación aún quedan muchas cosas por hacer que van desde tener un código más eficiente y rápido hasta cuestiones que tienen que ver con el análisis de datos. Las mismas se enumeran a continuación:

1. Implementar un archivo de configuración para que el usuario pueda modificar parámetros referentes a la simulación sin necesidad de tener que ingresar al código.
2. Realizar un gráfico 3D de las lluvias disparadas que no deforme la información y los ejes. Una alternativa es hacerlo con R [Tee11] .
3. Realizar un gráfico que muestre la trayectoria de una lluvia que disparó y mostrando qué píxeles lo hicieron [Sta09].
4. Leer de manera más eficiente los archivos binarios generados, ya que se cargan enteramente en estructuras en memoria.
5. Mejorar la función ganancia dado que una gaussiana no es la mejor aproximación. Una mejora podría ser la función  $\sin x/x$ .
6. Agregar ruido a la señal.
7. Simular los datos para tener más estadística, del orden del millón de lluvias.
8. Cuando se tenga suficiente estadística y muchos pixeles y telescopios que disparen, se podría integrar la señal de cierta lluvia y obtener la energía de la partícula que la creó.
9. Analizar como varían la detección de lluvias con la distancia al telescopio para encontrar el mejor método de detección.



## Referencias

- [Aug09] Pierre Auger. *Los rayos cósmicos*. June 2009. URL: <http://visitantes.auger.org.ar/index.php/los-rayos-cosmicos.html> (cited on page 4).
- [Gai90] Thomas K Gaisser. *Cosmic rays and particle physics*. Cambridge University Press, 1990 (cited on page 11).
- [Gor+08] Peter W Gorham et al. “Observations of microwave continuum emission from air shower plasmas”. In: *Physical Review D* 78.3 (2008), page 032007 (cited on page 23).
- [KW12] Karl-Heinz Kampert and Alan A Watson. “Extensive air showers and ultra high-energy cosmic rays: a historical review”. In: *The European Physical Journal H* 37.3 (2012), pages 359–412 (cited on page 4).
- [Lin83] John Linsley. “Spectra, anisotropies and composition of cosmic rays above 1000 GeV”. In: *International Cosmic Ray Conference*. Volume 12. 1983, pages 135–191 (cited on pages 15, 36, 37).
- [Lon11] Malcolm S Longair. *High energy astrophysics*. cambridge university Press, 2011 (cited on page 5).
- [RP11] Gustavo E Romero and Josep M Paredes. *Introducción a la astrofísica relativista*. Volume 365. Edicions Universitat Barcelona, 2011 (cited on page 4).
- [Sci99] Sergio J Sciutto. “Air Shower Simulations with the aires system”. In: *arXiv preprint astro-ph/9905185* (1999) (cited on page 5).
- [Sta09] Todor Stanev. *Cosmic Rays and Extensive Air Showers*. June 2009. URL: <http://indico.cern.ch/event/41547/session/10/contribution/6/material/slides/0.pdf> (cited on page 42).
- [Sta10] Todor Stanev. *High energy cosmic rays*. Springer, 2010 (cited on page 5).
- [Tea14] The ROOT Team. *ROOT*. June 2014. URL: <http://root.cern.ch/drupal/> (cited on page 16).
- [Tee11] Paul Teeter. *R cookbook*. " O'Reilly Media, Inc.", 2011 (cited on page 42).

- [Vog+94] Steven S Vogt et al. “HIRES: the high-resolution echelle spectrometer on the Keck 10-m Telescope”. In: *1994 Symposium on Astronomical Telescopes & Instrumentation for the 21st Century*. International Society for Optics and Photonics. 1994, pages 362–375 (cited on page 5).