5. Análisis de los datos

Los datos tomados por los detectores de HEGRA y guardados en cinta son posteriormente procesados para determinar las características de los rayos cósmicos registrados, esto es, su dirección de llegada, su energía y si es posible, su naturaleza. Este análisis tiene lugar en las diversas instituciones que forman la colaboración y no en el propio sitio de observación porque el proceso es complejo y requiere ordenadores dedicados. En las siguientes secciones se describe brevemente el método de reconstrucción empleado con los datos de la matriz de centelleadores y de AIROBICC que son los únicos que afectan a este trabajo. Todo el proceso de análisis se realiza automáticamente con una serie de programas escritos en C y ejecutados bajo UNIX en ordenadores DECstation, inicialmente, y ALPHA en la actualidad.

5.1 Calibración

La primera parte del proceso de análisis consiste en calibrar o normalizar los datos de las distintas estaciones, que son independientes, para que puedan ser comparados unos con otros. El primer paso es obtener la pendiente de respuesta de los TDCs (ns por cuenta de TDC), ya que son lineales en muy buena aproximación, con los datos de las calibraciones que se describieron en la sección anterior. Este valor nos permite obtener el tiempo de activación de las casetas salvo una constante irrelevante como se verá a continuación. El siguiente paso es tomar las calibraciones de los LEDs, convertir las cuentas de los TDCs a ns con la calibración anterior (falta la constante) y restarles el retraso debido a los cables de los LEDs (medidos con el reflectómetro). Cada valor de TDC de las casetas activadas por una cascada atmosférica es convertido a ns (falta la constante) y a éste se le resta el resultado de la calibración anterior. Este valor de tiempo sigue sin ser absoluto, puesto que el origen de tiempos es arbitrario, pero este origen ahora sí es el mismo para todas las casetas ya que la única incertidumbre, el origen de tiempos de cada canal de TDC, ha desaparecido en la resta anterior al estar implícita en ambos miembros.

La normalización de los valores de ADC comienza con la resta de los pedestales, que fueron obtenidos al mismo tiempo que la calibración de los TDCs. El siguiente paso es distinto según se trate de la matriz de centelleadores o de AIROBICC. En el caso de los centelleadores se realiza un histograma de los valores de ADC para cada caseta a lo largo de un *run*, máximo periodo de toma de datos independiente, es decir, el mayor intervalo de tiempo en el que se garantiza que no ha cambiado nada en la electrónica del experimento. Estos histogramas tienen un máximo claro que se debe al suceso más probable en caso de activación de la caseta, que es la detección de una sola partícula o MIP. Así las cuentas de ADC de cada caseta son divididas por su valor del MIP y por tanto el resultado es comparable entre las distintas casetas al estar todos en unidades de MIP o partículas detectadas. El caso de AIROBICC es mucho más complejo, ya que es muy difícil obtener una calibración absoluta cuentas de ADC - fotones detectados para todas las casetas en un momento dado. Se ha pensado en utilizar los LEDs para calibrar también los ADCs, pero el problema actual es que el color de los LEDs (amarillo) es muy distinto del correspondiente a la luz Cherenkov (azul - ultravioleta). Esta es la razón por la que se va a cambiar a LEDs azules que son mucho más convenientes, no obstante aún persistirán problemas para realizar una calibración ya que no se puede garantizar que todos los LEDs depositen la misma cantidad de luz, además este procedimiento no incluye la transmisión del protector de plástico y del filtro y la reflectividad del cono de Winston. El procedimiento empleado actualmente no obtiene una calibración absoluta de la luz, pero sí relativa entre las casetas a fin de poder ser comparadas unas con otras. Se denomina el método del anillo y se basa en la simetría axial de las cascadas atmosféricas. Primero se determina la posición del *core* o núcleo (intersección del eje de la cascada con el plano de los detectores) con los valores de ADC del centelleador, y después se toman anillos concéntricos alrededor de ese punto. La cantidad de luz vista por los detectores de un mismo anillo es en promedio la misma para todos, por tanto calculando el cociente entre las cuentas de ADC de cada caseta y la media del anillo promediado para todos los anillos de todas las cascadas de un *run* se tiene la respuesta relativa de cada detector con una precisión del 10% [24].

5.2 Reconstrucción

Después de calibrar los detectores y corregir los datos originales se procede a reconstruir las cascadas atmosféricas, que es el segundo paso del análisis de los datos. Éste comienza con la determinación de la posición del *core* por separado para el centelleador y AIROBICC. Para ello se elige la caseta con la máxima señal de ADC y se realiza una media de las posiciones de las casetas de dos filas y dos columnas alrededor de la de máxima señal, pesada con la intensidad de la señal recibida (partículas o luz). La caseta de máxima señal y las que están más allá de dos filas o columnas no entran en la media para minimizar el efecto de señales espurias. Cuando la caseta de máxima señal se encuentra cerca del borde faltan algunas casetas de las que deberían entrar en la media y para evitar errores sistemáticos son creadas virtualmente con posiciones simétricas respecto a la de máxima señal y con valores iguales a la media de las demás casetas, aunque este procedimiento aún tiende a agrupar los *cores* en el borde cuando realmente están fuera. La posición final del *core* que será utilizada en los ajustes de la dirección y de la distribución lateral se obtiene con una media pesada de los valores obtenidos con el centelleador y AIROBICC. Los pesos son escogidos empíricamente como una función de la intensidad media de las casetas y de la intensidad de la caseta con el máximo [24], de tal forma que para cascadas pequeñas (menos de 10 partículas en la caseta de centelleador con máxima señal) domine AIROBICC y para las grandes domine el centelleador que tiene una distribución lateral que disminuye mucho más rápidamente con la distancia al *core* (ver Figura 5.1). El error en la localización del *core* se estima mediante la comparación de las posiciones dadas por el centelleador y AIROBICC y sus pesos, resultando un valor conservador de 18 metros cuando el *core* está dentro de los límites de la matriz de detectores [24].

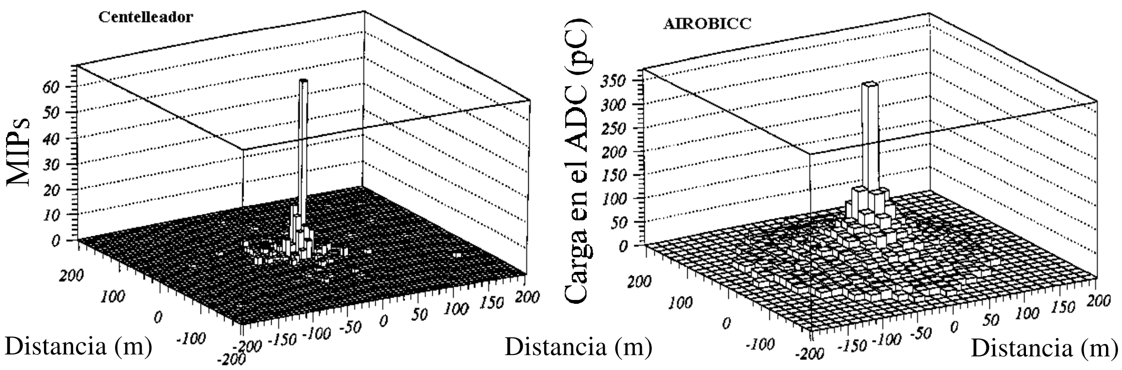

Figura 5.1: Simulación por ordenador de las señales inducidas en los ADCs del centelleador y de AIROBICC por una cascada iniciada por un protón de 200 TeV. Figura tomada de [25].

Una vez se tiene el punto de corte del eje de la cascada con el plano de los detectores se procede a calcular la orientación de dicho eje con el centelleador y AIROBICC independientemente. Para ello se hace un ajuste χ^2 no lineal de los tiempos de activación de las casetas al frente de las partículas y al de fotones Cherenkov (ver Figura 5.2a). Se ha encontrado empíricamente y también con simulaciones de Monte Carlo que este frente se ajusta razonablemente a un cono hasta una distancia de unos 120 m desde el eje de la cascada (ver Figura 5.2b). El complementario del semiángulo de apertura del cono es aproximadamente 50 mrad (2°9) para las partículas y 18 mrad (1°0) para los fotones Cherenkov, aunque depende de la energía y naturaleza del primario así como de fluctuaciones en el desarrollo de la cascada [24]. Los datos de tiempo de las casetas son pues ajustados a un cono cuya pendiente y punto de corte de su eje con el plano de los detectores son fijos, y se deja como parámetros libres los dos ángulos que lo orientan (altura y acimut) y la distancia del cono al suelo en el origen de tiempos. El procedimiento es iterativo (normalmente consta de 3 repeticiones) y en cada paso se eliminan del ajuste aquellas casetas que se alejan más de 3 σ del cono obtenido.

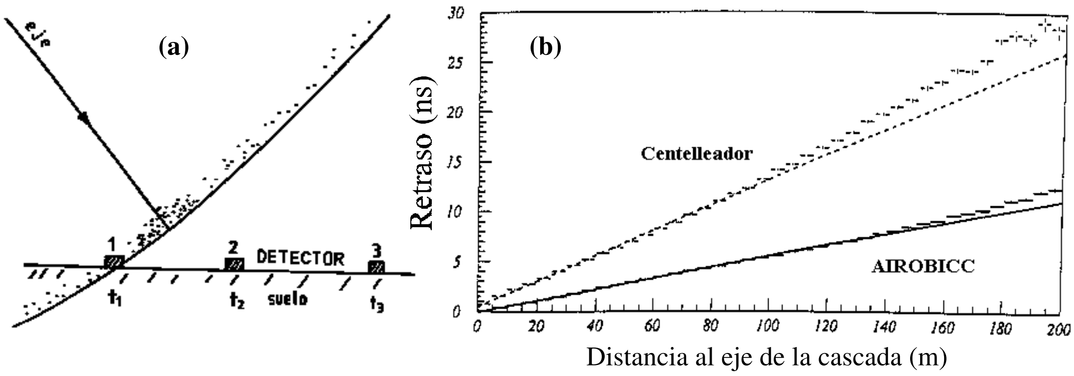

Figura 5.2: **(a)** Esquema que ilustra el procedimiento de reconstrucción del frente de partículas de una cascada para obtener su dirección a partir de los tiempos de llegada a distintos detectores. Figura tomada de [13]. **(b)** Retraso en el tiempo de activación de las casetas en función de la distancia al eje de la cascada promediado para 50000 sucesos. Desviaciones sistemáticas del cono aparecen sólo a partir de 100 m para el centelleador y 140 m para AIROBICC. Figura tomada de [24].

El error típico cometido en la reconstrucción de la dirección del primario o resolución angular suele definirse como la distancia angular que contiene el 63% de los sucesos emitidos por una fuente puntual ($\sigma_{63\%}$). Si la respuesta del detector a una fuente puntual es una gaussiana bidimensional de desviación σ, entonces se tiene que $\sigma_{63\%} = 2^{1/2}\ \sigma$. Para determinar la resolución angular se recurre a dos métodos, uno es el del tablero de ajedrez y el otro el de Monte Carlo. El primero consiste en considerar la matriz de detectores como dividida en dos submatrices intercaladas, en la que las casetas pertenecen alternativamente a una u otra submatriz de forma que simulan un tablero de ajedrez en el que las casillas blancas pertenecen a una submatriz y las negras a la otra. Se puede demostrar entonces que la resolución angular del detector viene dada por la diferencia angular entre la reconstrucción de las dos submatrices de la siguiente forma: $\sigma_{63\%} = \delta\theta_{63\%}/2$ [24], donde $\delta\theta_{63\%}$ es el ángulo que contiene el 63% de las diferencias angulares de las dos submatrices. El método de Monte Carlo consiste en la generación de cascadas simuladas por ordenador, reconstruirlas de la misma forma que los datos reales y comparar la dirección real con la reconstruida.

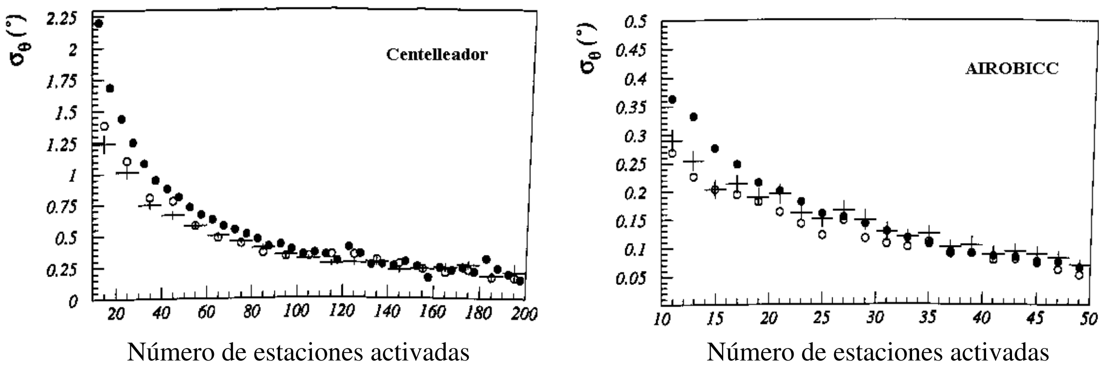

Figura 5.3: Resolución angular del centelleador y de AIROBICC frente al número de casetas activadas calculada con diferentes métodos: las cruces representan los resultados obtenidos con el método de Monte Carlo, consistente en comparar la dirección reconstruida con la real, que corresponde a sucesos simulados (hadrones incidiendo con una ángulo cenital de 10º). Los puntos negros son los resultados del método del tablero de ajedrez con sucesos reales y los puntos blancos corresponden al mismo método pero sobre los datos de Monte Carlo. En general se observa un buen acuerdo salvo cuando el número de casetas activadas es pequeño, efecto que se explica en el texto. Nótese la excelente resolución angular de AIROBICC comparada con la del centelleador. Figura tomada de [25].

Los resultados obtenidos con uno y otro método aparecen en la Figura 5.3, donde se muestra la resolución angular del centelleador y de AIROBICC en función del número de casetas activadas. Varias conclusiones pueden extraerse de la figura, por una parte indica que el comportamiento de la resolución angular en función del número de casetas (*n*) sigue una ley 1/*n* y por otra parte prueba que la resolución angular de AIROBICC es mucho mejor que la del centelleador, un factor 3 para una cascada del mismo tamaño. Esto se debe a que el frente de luz es mucho más estrecho y mejor definido que el de partículas como ya se explicó en la Sección 3.2. Este detalle puede apreciarse perfectamente en la Figura 5.4, que muestra la dispersión de los valores de tiempo alrededor del cono para una cascada detectada por el centelleador y AIROBICC. En los resultados de la resolución angular mostrados en la Figura 5.3 se ve que los valores predichos por el Monte Carlo son mejores que los obtenidos experimentalmente, especialmente para cascadas pequeñas. Esto se debe probablemente a algunas fuentes de error no simuladas en el Monte Carlo, como los *cores* fuera del área detectora, errores sistemáticos, cascadas de pequeña energía (< 10 TeV) que tienen cierta probabilidad de disparar los detectores, $e^{\pm}$ con energía < 10 MeV, etc. En cualquier caso los datos proporcionados por la simulación de Monte Carlo son interesantes porque predicen que la resolución angular de AIROBICC para una cascada iniciada por un γ es un 10% mejor que la de un hadrón [24], aspecto que en principio no es posible derivar de los datos experimentales ya que se basan en un fondo mayoritariamente hadrónico con una pequeña componente electromagnética difícil de distinguir. Esta mejor resolución angular de los γ se debe a una mayor uniformidad del frente de luz Cherenkov porque las fluctuaciones en el desarrollo de la cascada son menores que en el caso de los hadrones, como ya fue expuesto en la Sección 3.2.

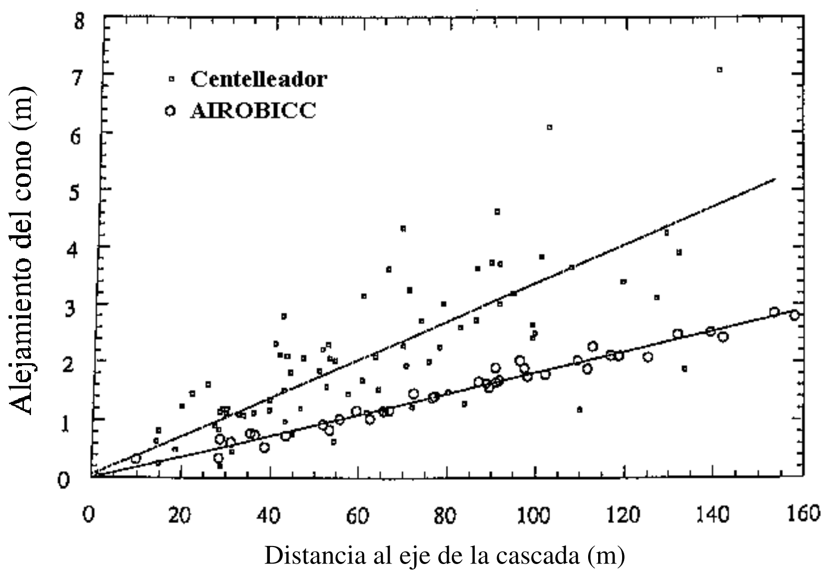

Figura 5.4: Dispersión de los valores de activación de las casetas del centelleador y de AIROBICC alrededor del cono ajustado para un suceso cualquiera. Se comprueba que el frente de fotones Cherenkov está mucho mejor definido que en el caso de las partículas. Figura tomada de [24].

Un factor importante en la determinación de la resolución angular, especialmente cuando es tan buena como en el caso de AIROBICC, es la orientación absoluta del detector o error sistemático de apunte. La incertidumbre en la orientación es debida a errores en la medida de la posición de las casetas, de la longitud de los cables, etc., y se estima que puede producir errores del orden de 0º1. El problema que surge es que no hay ninguna fuente estándar en el rango de trabajo de la matriz de centelleadores y AIROBICC donde comprobar el error en la localización absoluta de la dirección. Este problema se soluciona parcialmente mediante dos métodos, la observación de la sombra del Sol y de la Luna en los rayos cósmicos y la comparación con los telescopios Cherenkov de HEGRA, cuya orientación absoluta es conocida hasta 0º05. La matriz de centelleadores es la única componente que puede operar cuando el Sol y la Luna están por encima del horizonte y por tanto sólo a ella es aplicable el primer método. Con él se ha podido comprobar la resolución angular del centelleador y determinar su orientación absoluta, habiéndose encontrado que es mejor que 0º2 [31]. AIROBICC no puede observar la sombra del Sol ni de la Luna, pero puede compararse la dirección de muchas cascadas obtenidas en coincidencia con el centelleador y con los telescopios Cherenkov. La comparación con el centelleador indica que éste se encuentra desplazado en 0º14 ± 0º02 en la dirección norte - noreste (210º ± 20º) con respecto a AIROBICC y la comparación con el telescopio prototipo de HEGRA lleva a un desplazamiento de 0º18

± 0°.1 en la dirección este - noreste (245°) respecto de AIROBICC [24]. Usando una media pesada de las diversas desviaciones se ha obtenido que la dirección proporcionada por AIROBICC debe ser corregida en +0°.08 de declinación (δ) y +0°.076/cos(δ) en ascensión recta, lo cual supone un error absoluto de 0°.10 [32].

La reconstrucción de las cascadas continúa con el ajuste de la distribución de las señales de ADC alrededor del eje de la cascada (ver Figura 5.1) a una función conocida. En el caso del centelleador se utiliza la función NKG dada por las Ecuaciones (3.2). Se hace un ajuste χ^2 no lineal de la densidad de partículas de los detectores en la que los parámetros libres son N_e y s. En realidad el número auténtico de $e^{\pm}$ en tierra es un factor ~ 3 menor debido a que N_e incluye los γ convertidos en pares por la capa de plomo de las casetas de centelleador (ver Sección 4), además ésta también afecta a s, haciéndolo un poco diferente del real. Estas desviaciones de la NKG pueden ser fácilmente corregidas mediante los estudios realizados con simulaciones de Monte Carlo, de modo que el error en la estimación del número de $e^{\pm}$ suele estar comprendido entre el 10 y el 35% [25]. En el caso de AIROBICC el ajuste χ^2 se realiza a una función empírica dada por:

$$N_{ph}(r) = A \exp(-r/r_L), \qquad 10 \text{ m} < r < 90 \text{ m}$$

$$N_{ph}(r) = B \exp(-r/r_{Lo}), \qquad 90 \text{ m} < r < 160 \text{ m}$$

$N_{ph}(r)$ es la densidad de fotones Cherenkov a una distancia r del eje de la cascada y A, B, r_L (radio de luz) y r_{Lo} (radio de luz exterior) son los parámetros del ajuste. El paso de cuentas de ADC a densidad de fotones Cherenkov es realizado con la información proporcionada por una simulación del detector AIROBICC y su electrónica asociada [25]. El cambio del perfil lateral de la luz alrededor de los 90 m del eje de la cascada se denomina "el hombro" y es producido por un fenómeno de focalización de la luz Cherenkov en el desarrollo de la cascada [33]. La posición del "hombro" depende del nivel de observación y en el caso de AIROBICC éste se encuentra a una distancia del eje de la cascada de entre 80 y 100 m. El "hombro" es más prominente en las cascadas electromagnéticas que en las hadrónicas, lo que se ha propuesto como un medio de discriminación γ/hadrón [34].

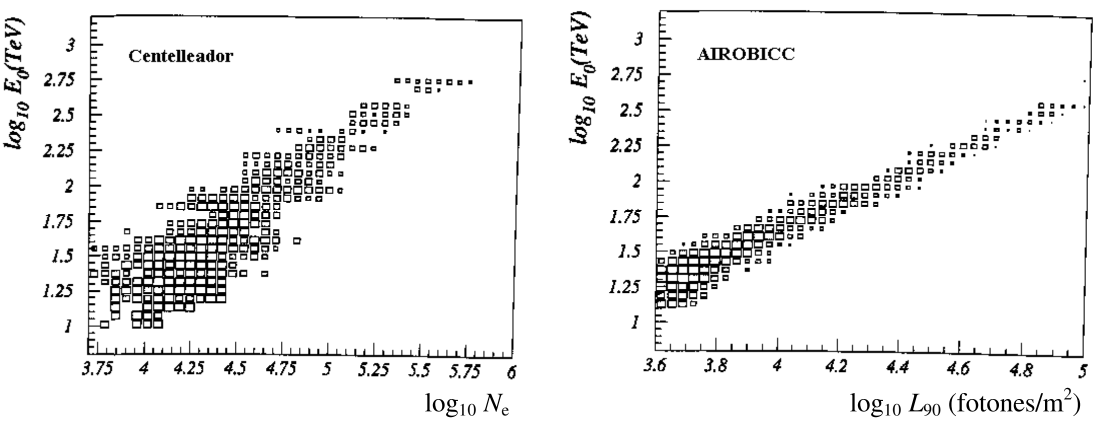

Figura 5.5: Relación entre la energía del primario y N_e y L_{90} encontrada a partir de la simulación de cascadas iniciadas por fotones con un ángulo cenital de 10°. Figura tomada de [25].

La energía de la partícula primaria se determina a partir de los ajustes laterales anteriores, ya que a través de simulaciones de Monte Carlo se ha encontrado una relación casi lineal entre la energía y N_e y la luz Cherenkov (ver Figura 5.5). En particular esta relación se ha parametrizado de la siguiente forma [25]:

$$E_0 = \alpha_s N_e^{\beta_s}$$

$$E_0 = \alpha_c L_{90}^{\beta_c}$$