estadísticas esperadas para una muestra del tamaño de la de datos reales. La significancia de una fluctuación que sobrepase el rango cubierto por la muestra aleatoria no podría, en principio, ser estudiada con este procedimiento. Lo ideal sería generar una muestra 100, 1000 ó 10000 veces más numerosa que la de datos reales, pero el largo tiempo de proceso lo impide y además siempre puede aparecer una fluctuación en los datos reales lo suficientemente improbable (y por tanto un buen candidato a GRB) como para exceder el intervalo abarcado por la muestra aleatoria. Así pues para estimar la significancia de una fluctuación cuya probabilidad sea más pequeña que la mínima cubierta por el Monte Carlo, se procederá a extrapolar la distribución de probabilidad observada a valores mayores.

El método seguido para la generación de los sucesos ficticios [38] se basa en replicar la distribución observada de sucesos reales asumiendo que llegan aleatoriamente (rayos cósmicos cargados), salvo por la posible existencia de fuentes **débiles** de radiación gamma. Para ello se realiza un histograma de las posiciones de todos los sucesos registrados en una misma noche en coordenadas locales (ángulo cenital θ y acimut φ) con un espaciado de 0º.5 x 0º.5. Entonces, para cada suceso de la muestra se genera un cierto número de sucesos ficticios (en nuestro caso 10), cuyas coordenadas locales son aleatorias siguiendo como distribución de probabilidad el histograma anterior (correspondiente a la noche en la que llegó el suceso). Como tiempo de llegada de los sucesos ficticios se toma el mismo tiempo que el del suceso original, con este dato y las coordenadas aleatorias θ y φ obtenemos las coordenadas en el sistema ecuatorial (declinación δ y ascensión recta α). Este procedimiento tiene pues en cuenta la distribución temporal y espacial de los sucesos reales, que viene determinada por el funcionamiento del experimento y las condiciones meteorológicas. Cualquier anisotropía causada por hipotéticas fuentes débiles desaparece completamente, mientras que fuentes intensas que pudieran perturbar el método son fácilmente detectables (no existiendo hasta ahora).

El proceso de búsqueda fue llevado a cabo en 1995 con un programa escrito en C. El programa que genera los sucesos aleatorios fue escrito también en C. Los programas fueron ejecutados bajo UNIX en un ordenador ALPHA, ocupando aproximadamente un mes de proceso, y los resultados se guardaron en cinta magnética de 8 mm EXABYTE.

7. Análisis de los resultados

Una vez que se dispone del número de sucesos en las ventanas ON y OFF para toda la muestra de datos, es necesario obtener cual es la probabilidad de ver N_{ON} sucesos o más en la ventana de señal observando N_{OFF} sucesos en la ventana de fondo, y poder así estimar la significancia de los posibles excesos. Para ello usaremos una distribución de probabilidad que tiene en cuenta las fluctuaciones *poissonianas* de la señal y del fondo [38]. Ésta se consigue calculando la probabilidad de observar N_{ON} sucesos o más, dado por una distribución de Poisson, y pesándola con la probabilidad de todas las posibles fluctuaciones del fondo N_{OFF}, también dadas por una distribución de Poisson; así pues:

$$p(\geq N_{ON} | N_{OFF}) = \int_{n_{OFF}=0}^{\infty} \sum_{n_{ON}=N_{ON}}^{\infty} \mathcal{P}(\alpha n_{OFF}, N_{ON}) \mathcal{P}(n_{OFF}, N_{OFF}) \mathrm{d}n_{OFF}$$

En esta fórmula $\mathcal{P}(N_1, N_2)$ representa la probabilidad de observar N_2 sucesos dada una distribución de Poisson de parámetro igual a N_1 y α es el cociente entre los ángulos sólidos de las zonas ON y OFF. Realizando la integración y operando, finalmente tenemos:

$$p(\geq N_{ON} | N_{OFF}) = 1 - \sum_{n_{ON}=0}^{N_{ON}-1} \frac{\alpha^{n_{ON}}}{(1+\alpha)^{n_{ON}+N_{OFF}+1}} \frac{(n_{ON}+N_{OFF})!}{n_{ON}!\,N_{OFF}!}$$

Según esta distribución de probabilidad, el valor esperado de N_{ON} dado N_{OFF} es $\alpha\cdot(N_{OFF} + 1)$ y su varianza es $\sigma^2 = \alpha\cdot(1 + \alpha)\cdot(N_{OFF} + 1)$. Si a $p(\geq N_{ON} | N_{OFF})$ lo consideramos como la probabilidad de éxito, entonces la probabilidad de observar al menos un éxito en N intentos (pares de ventanas ON - OFF) independientes viene dado por la distribución de probabilidad binomial:

$$P = \sum_{r=1}^{N} \frac{N!}{r!(N-r)!} p^r (1-p)^{N-r} = 1 - (1-p)^N$$

La distribución binomial dice que el número esperado de fluctuaciones de probabilidad p (éxitos) para una muestra de N pares de ventanas ON - OFF (intentos) es $N\cdot p$ y su varianza es $\sigma^2 = N\cdot p\cdot(1 - p)$. Por tanto si representamos el número de pares de ventanas ON - OFF con probabilidad $p(\geq N_{ON} | N_{OFF})$ o menor observadas en una muestra de datos puramente aleatoria en función de p, obtendremos una línea recta de pendiente igual a 1 que pasa por el origen. No obstante, debido al gran número de ventanas observadas y al extenso rango de probabilidades implicadas, es más conveniente hacer esta representación en escala logarítmica, usando $-\log_{10}(p)$ en lugar de p. En este caso tenemos una recta de pendiente igual a -1 que corta el eje de ordenadas en el valor $\log_{10}(N)$.

Este comportamiento teórico es, sin embargo, sólo aproximado debido a que no todos los pares de ventanas ON - OFF son independientes y a que la distribución de probabilidad de los sucesos es discreta, lo que produce discontinuidades. El comportamiento esperado para una distribución puramente aleatoria será el observado en la muestra de sucesos ficticios generados con el Monte Carlo descrito en la sección anterior. Con esta distribución será comparada la de los datos reales, en busca de desviaciones significativas.

El resultado de la búsqueda en todo el cielo dentro del campo de visión de AIROBICC ($-6° < \delta < 64°$, $0° \leq \alpha < 360°$) durante un año aparece en la Figura 7.1 para los tres intervalos de tiempo empleados. La línea continua muestra el comportamiento de los datos reales, la discontinua el de los datos de Monte Carlo y la de puntos y rayas y la de puntos muestran el comportamiento del Monte Carlo $\pm$ 2 σ respectivamente, donde σ es la correspondiente a la distribución binomial que cada intervalo (o *bin*) del histograma sigue aproximadamente (ver más arriba). Las desviaciones observadas no son significativas ya que tienen una probabilidad ≥ 0.1 de aparecer, y en consecuencia se puede concluir que no hay evidencia de emisión de corta duración (segundos a minutos) procedente de fuentes puntuales o GRBs en la muestra registrada por AIROBICC en su primer año de funcionamiento. Este resultado nos permite calcular el flujo máximo por encima de unos 20 TeV que un hipotético GRB incluido en la muestra pudiera tener y haber pasado desapercibido en la búsqueda. El cálculo será mostrado en la Sección 7.2.

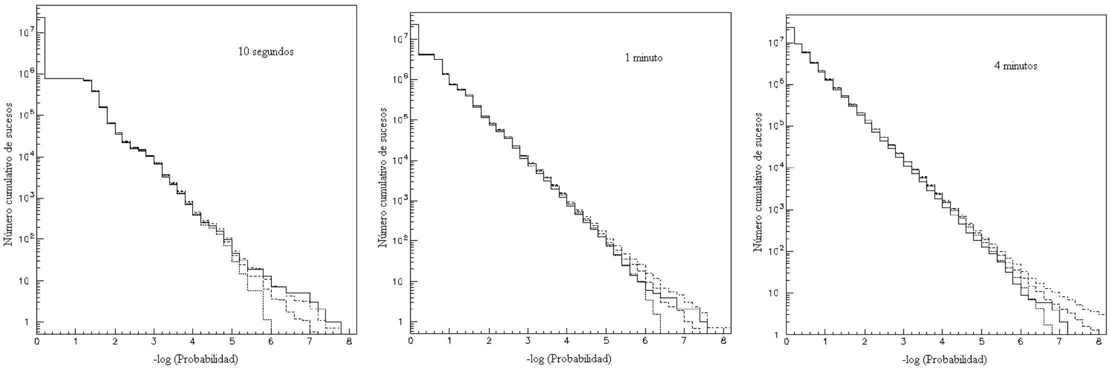


Figura 7.1: Número cumulativo de pares de ventanas ON - OFF observadas en función de su probabilidad para los tres intervalos de tiempo de la búsqueda de GRBs durante una año en todo el campo de visión de AIROBICC. La línea continua representa los datos reales y la discontinua los de Monte Carlo. La línea de puntos y rayas y la de puntos muestran el comportamiento del Monte Carlo ± 2 σ respectivamente. No se observan desviaciones significativas entre los datos reales y el Monte Carlo.

7.1 Coincidencias con BATSE

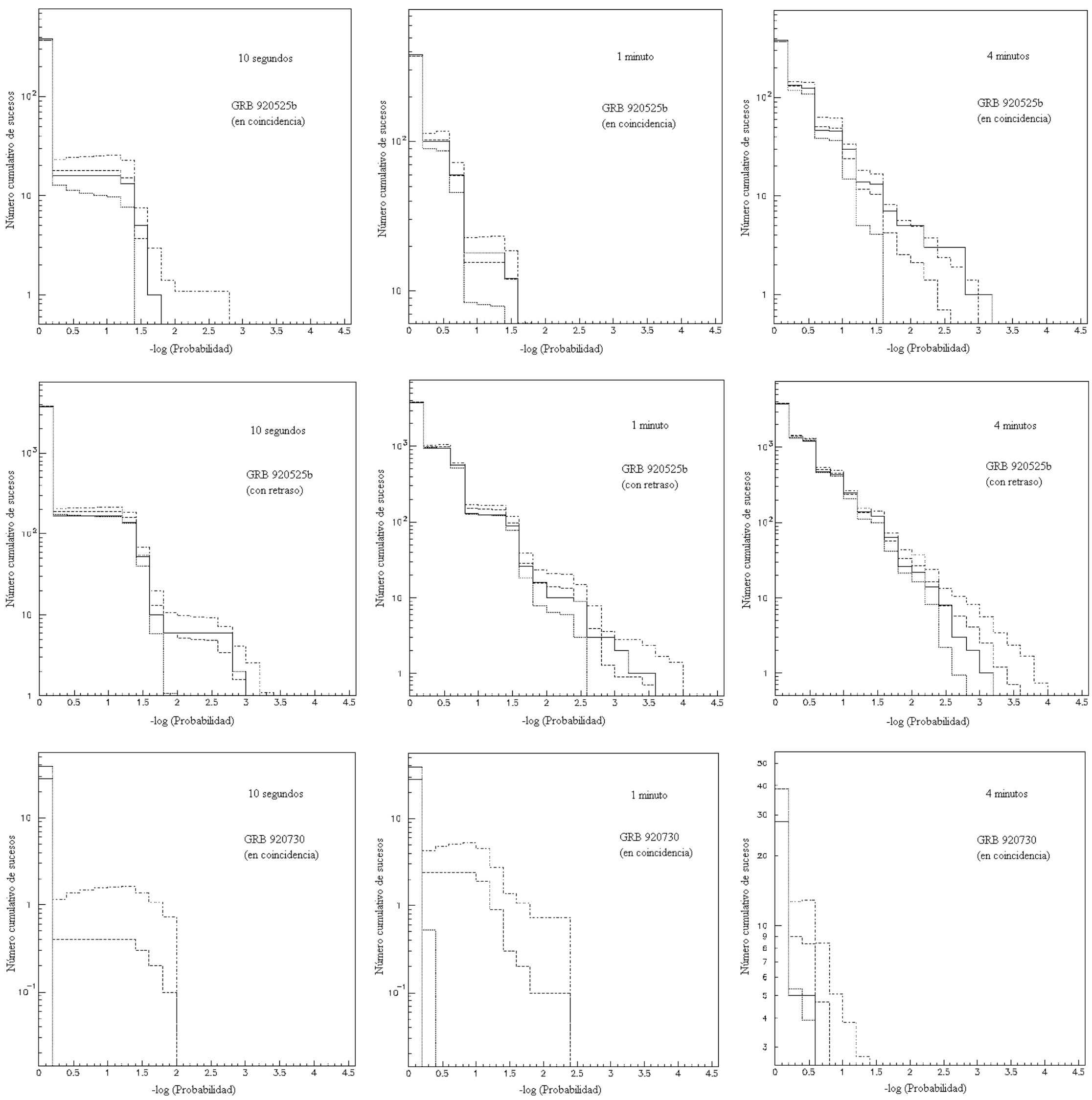
La ausencia de desviaciones significativas en la muestra de datos reales respecto de lo esperado para una distribución aleatoria de los sucesos (Monte Carlo), no significa que AIROBICC no haya observado ningún GRB. En realidad significa que no hay ningún GRB lo suficientemente intenso (o varios más débiles) como para destacar nítidamente sobre las fluctuaciones estadísticas esperadas para una muestra tan grande como la utilizada en este trabajo (40 millones de sucesos). Añadiendo una restricción razonable, como es la coincidencia con un GRB de BATSE, que reduzca la muestra, es posible que todavía aparezca una desviación significativa sobre lo esperado para una muestra aleatoria reducida.

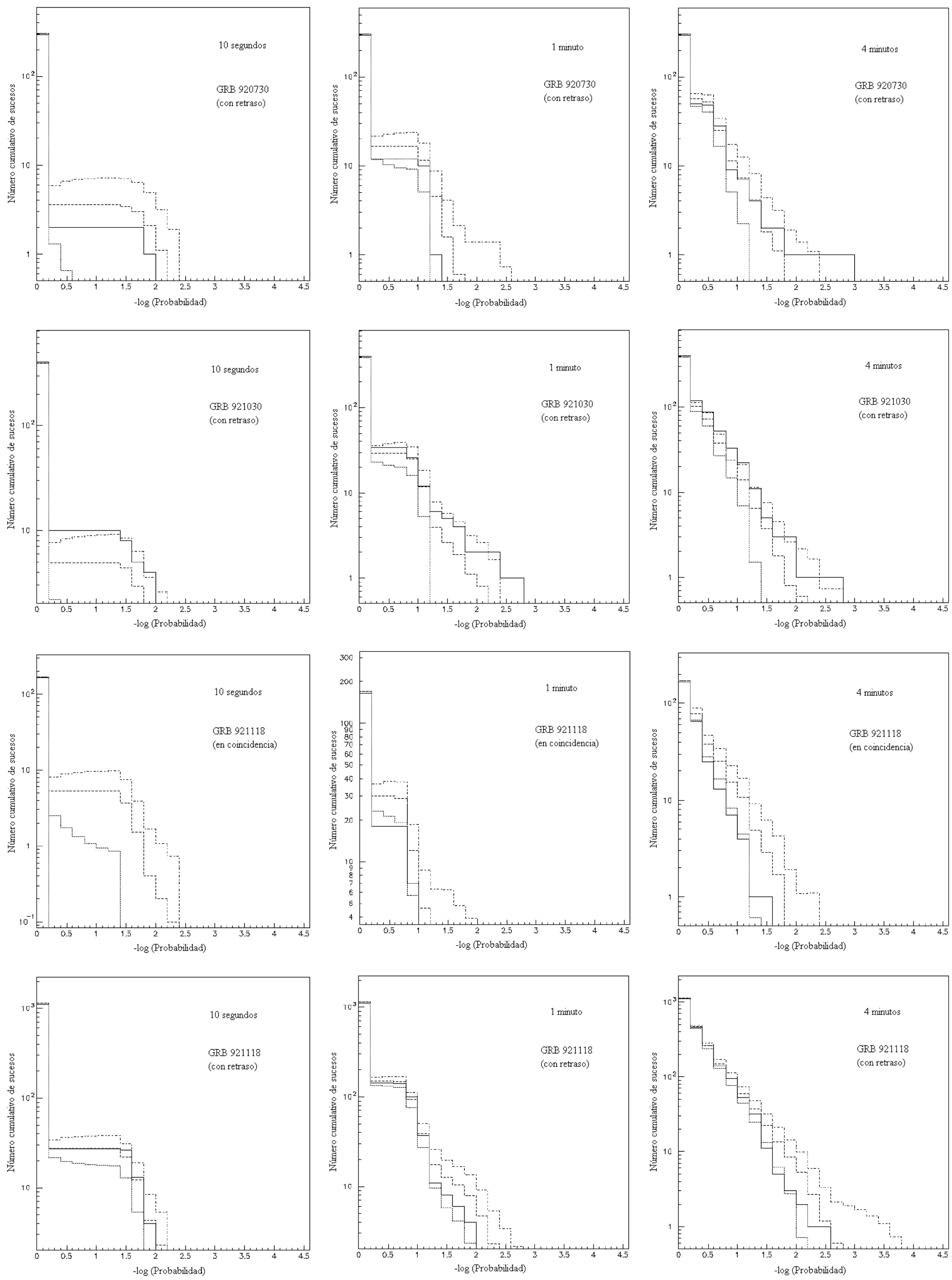
Tabla 7.1: Lista de los GRBs detectados por BATSE que estaban dentro del campo de visión de AIROBICC (y éste tomando datos) en el momento de su aparición o hasta una hora después.

Día	Hora (UT)	α (J2000)	δ (J2000)	Ángulo cenital
25 MAY 92	00:41:44	233º7	32º5	4º0
30 JUL 92	21:31:34	242º6	-10º5	40º7
30 OCT 92	01:16:32	78º6	-0º8	47º4
18 NOV 92	22:11:44	349º6	49º6	27º5
3 ENE 93	03:50:13	195º8	22º0	48º3

Con este propósito se buscó en el segundo catálogo de BATSE [39] GRBs que estuvieran dentro del campo de observación de AIROBICC (y éste activo) en el momento de producirse la detección por BATSE. También se incluyeron aquellos GRBs que eran visibles en algún momento hasta una hora después, por si se produjera emisión retrasada. Los GRBs finalmente seleccionados se muestran en la Tabla 7.1. La incertidumbre en la localización de BATSE es grande, el radio del círculo con 1 σ de error tiene una componente sistemática de 4º más otra variable que depende del GRB (su posición, su intensidad, etc.), típicamente entre 1º y 6º. En este trabajo se ha tomado un intervalo de error fijo de ± 10º que es lo suficientemente grande como para cubrir un radio de al menos 2 σ para la mayor parte de los GRBs, pero al mismo tiempo es limitado para reducir la posibilidad de asociaciones aleatorias. Así pues el procedimiento de búsqueda en todo el cielo, descrito anteriormente, ha sido repetido con una muestra reducida a ± 10º alrededor de los GRBs listados en la Tabla 7.1 y alrededor de ± 3 minutos del disparo de BATSE. Este tipo de búsqueda es sensible a emisión de alta energía simultánea con la de baja energía en una escala de tiempo como la observada [2]. No obstante se ha comprobado que la emisión de alta energía no sólo puede llegar en coincidencia, sino incluso con retraso respecto de la de baja energía en escalas de hasta una hora [2], por esta razón la búsqueda también se ha repetido cambiando la restricción temporal al intervalo comprendido entre el disparo de BATSE y una hora después.

Los resultados obtenidos aparecen en la Figura 7.2. En ella se muestran los dos tipos de búsqueda (emisión en coincidencia y emisión retrasada) en los tres intervalos de tiempo (10 s, 1 min y 4 min) para los cinco GRBs de la Tabla 7.1. La línea continua representa los datos reales, la discontinua los datos de Monte Carlo y la de puntos y rayas y la de puntos muestran el comportamiento del Monte Carlo ± 2 σ respectivamente, donde σ corresponde a la binomial que cada intervalo del histograma sigue aproximadamente (ver sección anterior). El GRB 921030 no dispone de resultado en la búsqueda de emisión en coincidencia porque AIROBICC entró en funcionamiento algún tiempo después de su comienzo. Al igual que en la búsqueda en todo el cielo, no hay desviaciones significativas entre el comportamiento de los datos reducidos y el valor esperado para una muestra aleatoria, por tanto no hay evidencia de emisión, ni en coincidencia ni retrasada, de ninguno de los GRBs explorados. El resultado, análogamente a la búsqueda general, nos permite calcular un límite superior al flujo en el rango del TeV de estos GRBs, teniendo la ventaja de que estos límites son uno o dos órdenes de magnitud inferiores a los generales. Este cálculo es el objeto de la próxima sección.




10 segundos
GRB 920730
(con retraso)
1 minuto
GRB 920730
(con retraso)
4 minutos
GRB 920730
(con retraso)
10 segundos
GRB 921030
(con retraso)
1 minuto
GRB 921030
(con retraso)
4 minutos
GRB 921030
(con retraso)
10 segundos
GRB 921118
(en coincidencia)
1 minuto
GRB 921118
(en coincidencia)
4 minutos
GRB 921118
(en coincidencia)
10 segundos
GRB 921118
(con retraso)
1 minuto
GRB 921118
(con retraso)
4 minutos
GRB 921118
(con retraso)
Número cumulativo de sucesos
-log (Probabilidad)