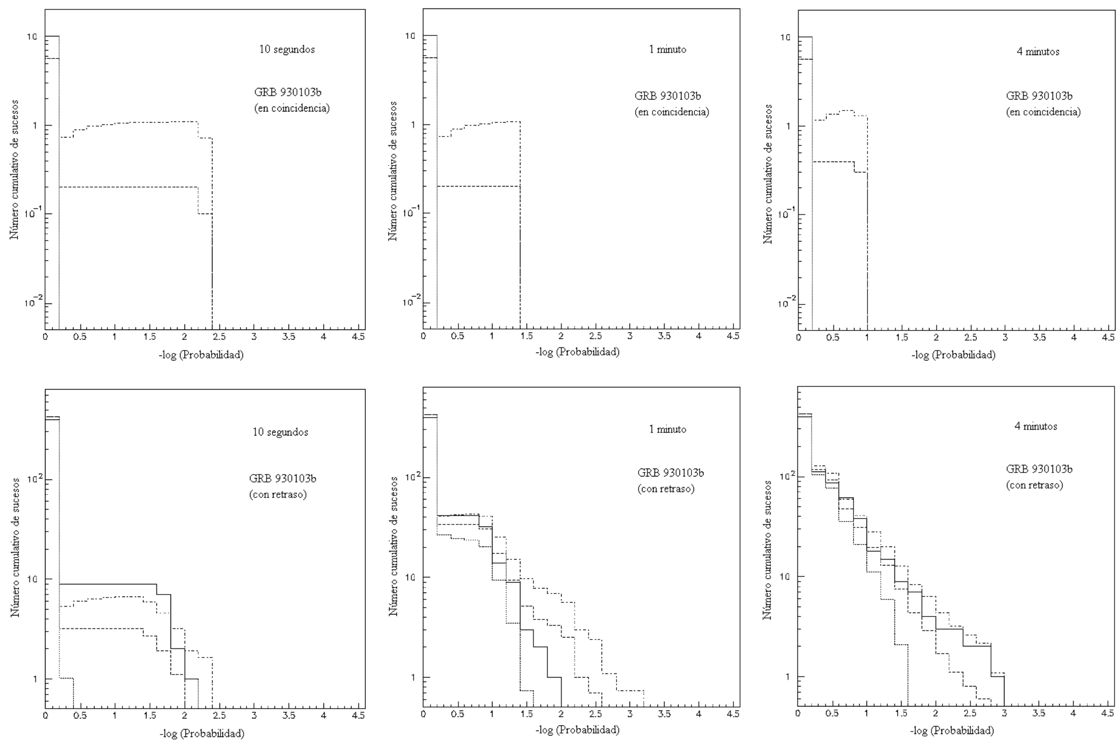

Figura 7.2: Número cumulativo de pares de ventanas ON - OFF observadas en función de su probabilidad para los tres intervalos de tiempo de la búsqueda de GRBs detectados por BATSE y las dos estrategias, búsqueda de emisión en coincidencia y retrasada. La línea continua representa los datos reales y la 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.

7.2 Límite superior al flujo

Los resultados negativos proporcionados por la búsqueda de GRBs descrita en las secciones previas nos permiten establecer un límite máximo al flujo que un GRB pudiera haber tenido y aun así pasar desapercibido en la búsqueda. Para ello seguimos el método dado en [40], por el cual el flujo integral máximo que sería detectado a lo sumo con un 10% de probabilidad (≥ 90% nivel de confianza) viene dado por:

$$F_{\mathrm{UL}}(E > E_{\mathrm{th}_\gamma}) = \frac{N_{\mathrm{UL}}\Omega_{\mathrm{ON}}}{\alpha(N_{\mathrm{OFF}}+1)\beta} F_{\mathrm{CR}}(E > E_{\mathrm{th}_{\mathrm{had}}}) \tag{7.1}$$

F_{CR} es el flujo integral de rayos cósmicos y es estimado con la extrapolación del ajuste de los datos experimentales medidos por globos y satélites: F_{CR} (> E) = $1.8{\cdot}10^{-5}$ $E(\mathrm{TeV})^{-1.76}$ cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} [40][117]. N_{UL} es el mayor parámetro de Poisson que tiene como mucho un 10% de probabilidad de producir N_{ON} sucesos en combinación con el fondo, el cual es estimado por el número de cuentas N_{OFF}. N_{UL} es calculado según el procedimiento descrito en [41]. Ω_{ON} es el ángulo sólido subtendido por la zona ON, β es la fracción de sucesos provenientes de una fuente puntual que serían recogidos por la ventana ON y α es el cociente entre los ángulos sólidos de las zonas ON y OFF. $E_{\mathrm{th}\,\gamma}$ y $E_{\mathrm{th\,had}}$ son el umbral de energía de AIROBICC para fotones y hadrones respectivamente.

Este método de cálculo del límite superior del flujo asume que el espectro de los GRBs y el de los rayos cósmicos siguen una ley de potencias con el mismo índice espectral y que la emisión es constante durante el intervalo de tiempo considerado (Δt = 10 s, 1 min ó 4 min). Se basa en considerar que el detector responde en primera aproximación de la misma forma a los fotones y a los hadrones, por lo que debe existir la misma proporcionalidad entre los flujos y los sucesos detectados en las ventanas de señal y de fondo. Esto permite eliminar ciertas incertidumbres o parámetros difíciles de determinar que aparecen en el cálculo del flujo con un método directo, como por ejemplo el área efectiva del detector y el tiempo muerto. De todas formas también se ha obtenido el límite superior del flujo con un método directo para estimar los errores de cálculo. En este caso el límite superior al flujo integral viene dado por:

$$F_{\mathrm{UL}}\ (E > E_{\mathrm{th}\,\gamma}) = N_{\mathrm{UL}}/[\beta \cdot A \cdot \Delta t \cdot (1 - f_{\mathrm{t}}) \cdot f_{\mathrm{r}}]$$

A es el área efectiva de detección de AIROBICC, f_{t} es la fracción de tiempo muerto y f_{r} es la eficiencia de reconstrucción. Comparando los valores proporcionados por uno y otro método se estima que la incertidumbre en el cálculo del límite superior al flujo integral es aproximadamente un 40%.

Por cada par de ventanas ON - OFF disponemos de un valor F_{UL}, pero para poder dar un límite genérico se ha tomado el mayor valor encontrado entre todos los pares de ventanas que forman la muestra. En este trabajo se han tomado cuatro muestras distintas para calcular el límite del flujo en otras tantas situaciones diferentes. Las dos primeras conciernen a la búsqueda general de GRBs en todo el campo de visión de AIROBICC, el cual se ha dividido en dos partes según su distinto umbral de energía. Una de ellas abarca la banda de declinación 9º < δ < 49º que posee un ángulo cenital medio θ < 20º y un umbral de energía para fotones $E_{\mathrm{th}\,\gamma}$ = 16 TeV y la otra corresponde a -6º < δ < 9º y 49º < δ < 64º que tienen 20º < θ < 35º y $E_{\mathrm{th}\,\gamma}$ = 25 TeV. Las dos muestras restantes corresponden a la búsqueda del GRB 920525b que es el único completamente cubierto (en localización y tiempo) por nuestros datos, y por tanto el único para el que tiene sentido calcular un límite al flujo. Las ventanas que forman las dos muestras son aquellas en coincidencia espacial (± 10º) y temporal en coincidencia (± 3 minutos) y retrasada (desde el comienzo hasta una hora después) con respecto a BATSE. Los resultados para el límite superior al flujo integral de las cuatro muestras mencionadas calculados con la Ecuación (7.1) se indican en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Límite superior con nivel de confianza ≥ 90% al flujo integral de los hipotéticos GRBs ocurridos dentro del campo de observación de AIROBICC durante su primer año de funcionamiento. También se muestra el límite para la emisión en coincidencia y retrasada del GRB 920525b, que tuvo lugar cerca del cenit de AIROBICC cuando éste se encontraba tomando datos. Los errores se estiman en un 40%.

	Intervalo de tiempo de la búsqueda		
Límite superior	**10 s**	**1 min**	**4 min**
$\boldsymbol{F}_{\mathbf{UL}}$ (E > **16 TeV**) ($cm^{-2}\ s^{-1}$) **General:** 9º < δ < 49º	$4.5 \cdot 10^{-8}$	$3.5 \cdot 10^{-8}$	$2.5 \cdot 10^{-8}$
$\boldsymbol{F}_{\mathbf{UL}}$ (E > **25 TeV**) ($cm^{-2}\ s^{-1}$) **General:** -6º < δ < 9º, 49º < δ < 64º	$2.8 \cdot 10^{-8}$	$2.2 \cdot 10^{-8}$	$1.6 \cdot 10^{-8}$
$\boldsymbol{F}_{\mathbf{UL}}$ (E > **16 TeV**) ($cm^{-2}\ s^{-1}$) **GRB 920525b:** ± 10º, ± 3 min	$8.9 \cdot 10^{-9}$	$8.9 \cdot 10^{-10}$	$3.2 \cdot 10^{-10}$
$\boldsymbol{F}_{\mathbf{UL}}$ (E > **16 TeV**) ($cm^{-2}\ s^{-1}$) **GRB 920525b:** ± 10º, 0 - 1 hora	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$1.4 \cdot 10^{-9}$	$3.2 \cdot 10^{-10}$

8. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el resultado de una búsqueda general de GRBs por encima de unos 20 TeV en todo el cielo observado por el detector AIROBICC (1 sr) durante su primer año de funcionamiento (Marzo 1992 - Marzo 1993). La búsqueda se ha realizado en tres escalas de tiempo, 10 segundos, 1 minuto y 4 minutos, que cubren la mayor parte de las duraciones de los GRBs observados a energías más bajas (keV - GeV). También se ha buscado con especial atención emisión de GRBs detectados por BATSE y que estaban dentro del campo de visión de AIROBICC (y éste conectado) en el momento de su aparición o hasta una hora después, por si la emisión de alta energía llegara con retraso, fenómeno ya observado en varios casos [2].

La búsqueda general ha explorado la banda de declinación $-6^\circ < \delta < 64^\circ$ durante un año ($0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$) y la búsqueda específica de GRBs de BATSE ha incluido cinco de ellos, aunque sólo uno, el GRB 920525b, estaba completamente cubierto en espacio y en tiempo por la muestra de datos.

No se ha encontrado evidencia de GRBs en la búsqueda general ni de emisión de alta energía de los GRBs detectados por BATSE en la búsqueda específica. Este resultado ha permitido poner un límite al flujo máximo que pudiera haber tenido cualquier GRB de las características buscadas (puntual y de corta duración, de segundos a minutos) ocurrido dentro del campo de visión de AIROBICC cuando éste se encontraba tomando datos. En particular se ha establecido un límite al flujo máximo por encima de 16 TeV del GRB 920525b que es de uno a dos órdenes de magnitud inferior, dependiendo de la escala de tiempos, al hallado para la búsqueda general. Lamentablemente este límite no puede ser comparado con la extrapolación del flujo a menor energía porque BATSE no dispone de ese dato para este GRB en particular, lo que en parte indica que se trata de un GRB débil.

8.1 Perspectiva futura

Dentro de las extensiones futuras de este trabajo se encuentran:

- Ampliar la búsqueda general y particular de GRBs a los datos de AIROBICC, de la matriz de centelleadores y de la matriz de torres Geiger posteriores a Marzo de 1993.

- Utilizar métodos de separación γ/hadrón para incrementar la sensibilidad de la búsqueda. Aunque estos métodos ya existían en el momento de realizar este trabajo no fueron utilizados porque están optimizados para cuando se dispone de una gran estadística, como en el caso de la búsqueda de fuentes de emisión constante de radiación, que en un año pueden reunir miles de sucesos. Sin embargo en la búsqueda de GRBs no podemos esperar tener más de unas pocas decenas de sucesos. En la actualidad la colaboración HEGRA está trabajando en el desarrollo de nuevos métodos de separación que puedan ser aplicados a muestras pequeñas con un auténtico incremento en la sensibilidad de la búsqueda.

- Hacer uso de la mayor sensibilidad que se espera conseguir a partir de Agosto de 1996 con nuevas mejoras en AIROBICC (mayor número de detectores, bajada de la energía umbral) y un nuevo sistema de disparo de la matriz de centelleadores que permite bajar el umbral de energía. También está planeado orientar los telescopios Cherenkov de la colaboración HEGRA, tras recibir una alerta del sistema BACODINE, hacia GRBs que tengan unas condiciones particularmente buenas de observación.

8.2 Agradecimientos

En este apartado quiero agradecer a todos los miembros de la colaboración HEGRA (listados en la Sección 12) y a aquellos que pasaron por ella (particularmente a los doctores M. Merck y A. Karle), su esfuerzo y ayuda en la obtención y análisis de los datos usados en este trabajo. En particular agradezco a los miembros del grupo de Madrid de HEGRA sus útiles comentarios y las valiosas discusiones mantenidas en su seno.

Asimismo estoy agradecido al equipo científico de BATSE por las facilidades proporcionadas para el uso de su catálogo de GRBs.

También quiero agradecer al Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) las excelentes condiciones de trabajo facilitadas en el Observatorio del Roque de los Muchachos, y a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) y al Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) su soporte económico.

9. Bibliografía

[1] Kanbach, G. (1994). *Proc. of the Erice NATO-ASI.*
[2] Hurley, K., Dingus, B. L., Mukherjee, R. *et al.* (1994). *Nature*, **372**, 652.
[3] Matthews, J. M. (1994). *High Energy Astrophysics* (World Scientific Publishing).
[4] Ramana Murthy, P. V. and Wolfendale, A. W. (1986, 1993). *Gamma-ray Astronomy* (Cambridge University Press).
[5] Brainerd, J. J. (1995). *Gamma-Ray Bursts*, Compton Observatory Science Support Center, http://cossc.gsfc.nasa.gov/cossc/BATSE.html.
[6] Meegan, C. A., Pendleton, G. N., Briggs, M. S. *et al.* (1995). *Preliminary Analysis of the Third BATSE Catalog*, Compton Observatory Science Support Center, http://cossc.gsfc.nasa.gov/cossc/BATSE.html.
[7] Nemiroff, R. J. (1993). *Comments on Astrophysics*, 17, No. 4.
[8] Cline, D. B. and Hong W. (1995). *Preprint SCAN-9511156*, CERN Preprints Server, http://preprints.cern.ch/.
[9] Cline, D. B. (1995). *Preprint SCAN-9511155*, CERN Preprints Server, http://preprints.cern.ch/.
[10] Sommer, M., Bertsch, D. L., Dingus, B. L. *et al.* (1994). *Astrophys. J. Lett.*, **422**, L63.
[11] Rossi, B. (1952). *High-Energy Particles* (Prentice-Hall).
[12] Cronin, J. W. and Watson A. A. (1995). *The Pierre Auger Project*, XXIV Int. Cosmic Ray Conf., Rome.
[13] Medina, J. (1993). *Radiación cósmica*, Curso de Doctorado, Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid.
[14] Cronin, J. W., Gibbs, K. G. and Weekes, T. C. (1993). *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **43**, 883.
[15] Fernández, J. (1994). *Trabajo de Investigación de Tercer Ciclo*, Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid.
[16] Amenomori, M., Cao, Z., Ding, L. K. *et al.* (Tibet ASγ Collaboration) (1993). *Astrophys. J. Lett.*, **415**, L147.
[17] Arqueros, F. (1994). *Preprint FAMN 2/94*, Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid.
[18] Karle, A., Martínez, S., Plaga, R. *et al.* (HEGRA Collaboration) (1994). *Preprint MPI-PhE/94-28*, Max Planck Institut für Physik, Werner Heisenberg Institut, Munich, Germany.
[19] de Jager, O. C., Stecker, F. W. and Salamon, M. H. (1994). *Nature*, **369**, 294.
[20] Arqueros, F. (1993). *Astronomía de rayos gamma*, Curso de Doctorado, Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid.
[21] Fernández, P. (1993). *Tesis Doctoral*, Departamento de Astrofísica, Universidad de La Laguna.
[22] Jelley, J. V. (1967). *Prog. in Elementary Particle and Cosmic Ray Phys.*, **9**, 39.
[23] Boley, F. I. (1964). Rev. of Modern Phys., **July 1964**, 792.
[24] Karle, A., Merck, M., Plaga, R. *et al.* (HEGRA Collaboration) (1994). *Preprint MPI-PhE/94-29*, Max Planck Institut für Physik, Werner Heisenberg Institut, Munich, Germany.
[25] Martínez, S., Arqueros, F., Fonseca, V. *et al.* (HEGRA Collaboration) (1994). *Preprint MPI-PhE/94-33*, Max Planck Institut für Physik, Werner Heisenberg Institut, Munich, Germany.
[26] Rhode, W., Odeh, T. *et al.* (HEGRA Collaboration) (1995). *Proc. XXIV Int. Cosmic Ray Conf.*, Rome.
[27] Westerhoff, S., Krawczynski, H., Prahl, J. *et al.* (HEGRA Collaboration) (1995) *Proc. XXIV Int. Cosmic Ray Conf.*, Rome.
[28] Deckers, T. *et al.* (HEGRA Collaboration) (1995). *Proc. XXIV Int. Cosmic Ray Conf.*, Rome.
[29] Welford, W. T. and Winston, R. (1978). *The Optics of Non-imaging Concentrators* (Academic Press).
[30] Burckhart, D. (1984). *An introducction to FASTBUS*, CERN DD/84/8.
[31] Karle, A., Merck, M., Bott-Bodenhausen, M. *et al.* (HEGRA Collaboration) (1994). *Proc. XXIII Int. Cosmic Ray Conf.*, **1**, 460, Calgary.
[32] Karle, A., Arqueros, F., Becker, K. H. *et al.* (HEGRA Collaboration) (1995). *Preprint MPI-PhE/95-01*, Max Planck Institut für Physik, Werner Heisenberg Institut, Munich, Germany.