

Informe Técnico CAY 1984-7

DETERMINACION Y CORRECCION DE LOS ERRORES  
DE PUNTERIA DEL RCAY A 45 GHZ.

Valentín Bujarrabal, Jesús Martín-Pintado  
y Pere Planesas

## I. INTRODUCCION

Uno de los mayores problemas que se plantean en la astronomía observacional es la corrección de errores de puntería de los telescopios. Para instrumentos ópticos, su solución ha podido ser sistematizada por medio de la consideración de errores de alineamiento y deflexión en los ejes básicos del telescopio, que resultan ser el origen de las discrepancias entre el lugar del cielo al que deseáramos apuntar y aquel al que realmente se dirige el eje óptico. Para radiotelescopios, el problema del apuntado se agrava porque, primero, no es posible controlar visualmente el apuntado durante la observación, y, segundo, las considerables dimensiones de los instrumentos hacen aparecer deformaciones en la estructura y desalineamiento en los ejes difícilmente controlables. Usualmente, el apuntado de los radiotelescopios se hace adoptando modelos para el origen de los errores similares a los usados en astronomía óptica. Una serie de observaciones de prueba permiten establecer, por ajuste de datos, los errores en la estructura y, una vez conocidos estos, sus efectos serán corregidos en las observaciones normales. Este ajuste debe ser cuidadoso, pues durante estas observaciones deberemos fiarnos de esta corrección so pena de perder un tiempo considerable en verificaciones.

En radioastronomía en ondas milimétricas, en las cuales está especializado el radiotelescopio del Centro Astronómico de Yebes (CAV), se plantea además el inconveniente de la falta de fuentes de continuo lo suficientemente intensas: en la práctica, solo el sol, los planetas y otras pocas fuentes de continuo son utilizables en las pruebas de puntería.

## II. MODELO PARAMETRICO PARA LOS ERRORES DE PUNTERIA

Como hemos avanzado en la introducción, la corrección de los errores de un telescopio suele hacerse a través de la parametrización de los mismos. En general, se supone que los errores provienen de deformaciones o imprecisiones en la estructura y de la propagación atmosférica; pueden ser debidos por lo tanto (Meeks et al.) a:

a) Inclinación del eje de acimutes. Cuando esta inclinación,  $\phi$ , es pequeña los errores que produce son,

$$\begin{aligned}\Delta A_1 &= -\phi \cos(K_A - A) \operatorname{tg} h = \phi \operatorname{tg} h \operatorname{sen} K_A \cos A - \phi \operatorname{tg} h \operatorname{sen} A \cos K_A \\ \Delta h_1 &= -\phi \operatorname{sen}(K_A - A) = \phi \operatorname{sen} A \cos K_A - \phi \operatorname{sen} K_A \cos A,\end{aligned}$$

siendo  $K_A$  el acimut hacia el que se dirige la inclinación  $-90^\circ$

b) No perpendicularidad entre el eje de elevaciones y el de acimutes. Si  $\epsilon$  representa la separación entre el eje de elevaciones real y el ideal, el error que se produce en acimutes es,

$$\Delta A_2 = \epsilon \operatorname{tg} h.$$

El error en elevación es despreciable en primer orden de aproximación.

c) Error de colimación. Que proviene de que el eje óptico no sea exactamente perpendicular al eje de elevación. Si  $\delta$  es la proyección del desplazamiento angular sobre el plano horizontal,

$$\Delta A_3 = - \delta \sec h$$

d) Flexión gravitacional. Solo afecta a la elevación y se supone que el error debe ser proporcional al desplazamiento del secundario ( $\alpha \cos h$ , ver Cernicharo, 1979):

$$\Delta h_4 = K_h \cos h.$$

Sin embargo, en radiotelescopios el efecto de la gravedad puede ser más complejo, modificando fuertemente la respuesta espacial del aparato. Este es un punto en el no entraremos aquí, limitándonos a tomar la anterior expresión del error.

e) Refracción atmosférica. En un modelo plano- paralelo de atmósfera

$$\Delta h_5 = R \cotg h$$

A todos estos errores cabría añadir posibles offsets instrumentales en acimut y elevación.

Un ajuste lineal por mínimos cuadrados de los errores en el cielo (es decir, considerando el acimut multiplicado por el coseno de la elevación) medidos nos permitirá determinar los valores de nuestros parámetros  $\phi$ ,  $K_A$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$ ,  $K_A$ ,  $R$  y los offsets  $O_A$ ,  $O_h$ . Una vez conocidos los valores de estos parámetros, nos serviremos de ellos para corregir el apuntado en cualquier dirección. (Para el ajuste por mínimos cuadrados hemos utilizado en la práctica el programa descrito por J. Cernicharo en su Tesis de Licenciatura.)

Sin embargo, el ajuste de las medidas utilizando el modelo anteriormente descrito es poco satisfactorio. En particular, a menudo hemos encontrado que el ajuste del error en elevación indica una inclinación del eje de acimutes apreciablemente distinta de la obtenida por el ajuste de  $\Delta A$ . Es más las dos "inclinaciones" así encontradas pueden ser prácticamente perpendiculares. Esto induce a pensar que el modelo teórico falla en el tratamiento de la inclinación del eje de acimutes y que es necesaria una revisión del error producido por la misma.

Afortunadamente, la inclinación del eje de acimutes puede medirse de una manera independiente. Utilizando el eclímetro automático de un teodolito colocado en la plataforma de la antena con orientación, sea paralela, sea perpendicular al

eje de elevaciones, ha sido posible estimar variaciones de la inclinación del eje de acimutes. Los resultados se resumen en la figura 1, en la que vemos la inclinación del eje paralela (a) o perpendicularmente (b) al eje óptico en función del acimut. Estas variaciones parecen debidas a un defecto en los rodillos que permiten el movimiento horizontal de la antena. La inclinación media es pequeña o, en todo caso, mucho menor que las variaciones con el acimut: una inclinación independiente del acimut produciría en las figuras una forma sinusoidal de período 360° y desfasada 90° entre el caso (a) y el caso (b), esto no se observa. Notemos finalmente que estas medidas solo pueden darnos desviaciones relativas, pero la existencia de constantes aditivas en dichas curvas no tiene importancia de cara a la corrección de errores, pues sus efectos se confundirán con las debidas a una inclinación del eje de elevaciones y un offset en elevación (Vease informe técnico CAY 1982-1.).

Estas inclinaciones del eje medidas,  $f_1 (A)$ , caso (b) y  $f_2 (A)$ , caso (a), producen unos errores del tipo

$$\Delta A_1 = -\phi_1 \operatorname{tg} h f_1 (A)$$

$$\Delta h_1 = \phi_2 f_2 (A)$$

Donde  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son dos parámetros a ajustar, que deben ser

compatibles con las medidas de teodolito y que tienen en cuenta la posible amplificación de la inclinación cuando ésta se mide en términos de eje de acimutes y no de plataforma de la antena, o bien posibles variaciones con el tiempo de la amplitud del fenómeno. La forma de  $f_1$  y  $f_2$  utilizada en la práctica, así como las medidas de puntería y el ajuste de las mismas se describen a continuación.



### III. RESULTADOS

#### III a) Mayo 1984.

Las primeras medidas de puntería realizadas después de la instalación del receptor a 45 GHz tuvieron lugar durante la primavera de 1984 y su análisis se completó en mayo de ese año. Las fuentes utilizadas en la determinación de los errores de puntería fueron Venus, Júpiter y 3C84.

La determinación de la función de inclinación del eje de acimutes se basó en las medidas de inclinación del eje de la plataforma de la antena presentadas en el Informe Técnico anteriormente citado y en la figura 1. De ellas se dedujo que tanto  $f_1$  como  $f_2$  podían ser descritas por una función gaussiana centrada en  $A = 166^\circ$  y con anchura a media potencia de  $50^\circ$ . El ajuste de los errores de puntería fue satisfactorio. En un primer paso se ajustaron los datos obtenidos usando el foco de bajas elevaciones ( $\leq 50^\circ$ , puede considerarse esta posición del secundario como estándar, véase el Informe Técnico CAY 1984-4) para cualquier elevación. En la figura 2 se aprecian la cobertura del cielo de que disponíamos y los residuos, que no presentan sistematismos importantes. Se encontró, en un segundo paso, que se podían ajustar bastante correctamente los

errores medidos a elevaciones mayores que  $50^\circ$  con el foco de altas elevaciones, si se suponía que el cambio de foco simplemente introduce una variación de la dirección del eje óptico respecto a los ejes de elevación y acimut del telescopio, es decir, una variación en el offset de elevación y en el error de colimación.

En la tabla 1 se encuentran los parámetros del ajuste, que fueron utilizados en las medidas de interés astrofísico realizadas durante el verano de 1984.

III b) Noviembre-Diciembre 1984.

Sin embargo, a partir de Octubre de 1984 se empezaron a detectar anomalías en la puntería que nos llevaron a repetir las medidas del estado de la misma. Se tomaron las fuentes de continuo Venus, Júpiter, 3C84 y 3C273, fué necesario repetir las primeras medidas que se hicieron debido a errores en la fijación de los ejes del reflector secundario. Finalmente adoptamos medidas hechas a mediados de Diciembre, su cobertura del cielo y los errores en elevación medidos (respecto a la anterior puntería) se representan en la figura 3, y es claro que éstos justificaban una nueva determinación de los parámetros. No se realizaron medidas más que con el foco estandar, pues las variaciones en ganancia con la elevación no parecían ahora justificar el uso de un segundo foco para elevaciones altas.

La anterior forma gaussiana de  $f_1$ ,  $f_2$  fue ineficaz para el ajuste de los nuevos errores, sobre todo en elevación, por lo que se repitieron las medias de inclinación de eje de acimutes. Generalmente se tomó en este estudio  $h = 0$  y se colocó el teodolito en el pilar derecho del yugo de la antena. También se realizaron medidas colocando el teodolito en el pilar izquierdo y haciendo que la antena apuntara a una elevación de  $45^\circ$ , ambas en la posición (a), que sirvieron como comprobación de la equivalencia entre las medidas de cabeceo del teodolito y

la real inclinación del eje de acimutes. La forma de la inclinación relativa del eje de acimutes parece compleja, por lo que se utilizaron como funciones  $f_1$  y  $f_2$  la interpolación lineal de las medidas promediadas, a las que se impuso que su promedio fuera nulo (tabla 2, figura 4).

A pesar de esto, en el ajuste de los errores usando estas funciones  $f_1$ ,  $f_2$  los efectos sistemáticos no desaparecieron del todo, por lo que decidimos que era probablemente necesaria una corrección empírica de la forma de estas funciones. Esto se hizo ajustando no sólo los parámetros usados antes, sino también los dos que corresponden a la inclinación del eje de acimutes y apoyándonos en la buena cobertura del cielo. Los parámetros ajustados están en la tabla 3 y los residuos del ajuste pueden verse en la figura 5, se observa que el ajuste es bueno. También es de notar que las inclinaciones del eje de acimutes determinadas al ajustar errores en elevación y acimut son prácticamente perpendiculares, y que el ángulo de la inclinación es muy similar. Esto significa que las funciones de corrección en ambos casos son muy parecidas (como muy parecidas son las funciones  $f_1$  y  $f_2$ ), reforzando la tesis de que lo realmente se ha añadido es una corrección en primer orden a la forma del "bache". Los parámetros así determinados se usan en observaciones de interés astrofísico desde Enero de 1985.

REFERENCIAS

Cernicharo, J.: 1979, Tesis de Licenciatura, Universidad Complutense , Madrid.

Meeks, M.L.; Ball, J.A.; Hull, A.B.: 1968, JEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-16, 746.

ACIMUT		ELEVACION	
$O_A$	112.4"	$O_h$	6.2"
$\epsilon$	-24.4"	$K_h$	79.9"
$\delta$	72.9"	R	59.3"
$\phi_1$	-19.5"	$\phi_2$	29.2"
$\delta (h > 50^\circ)$	86.2"	$O_h (h > 50^\circ)$	4.2"
$\sigma$	8.2"	$\sigma$	9.6"

Tabla 1. Parámetros de la puntería en mayo-junio 1984 y valor cuadrático medio de los residuos.

Punto	Acimut	$f_1$ (pos b)	$f_2$ (pos a)
1	0	- 2.9	3.6
2	10	- 0.1	7.3
3	20	0.6	7.4
4	30	1.1	7.2
5	40	- 0.5	1.6
6	50	- 2.5	- 3.1
7	60	- 5.7	- 9.0
8	70	-10.8	-10.7
9	80	- 9.7	-11.2
10	90	-15.2	-11.2
11	100	-13.8	- 8.7
12	110	-13.7	- 6.9
13	120	- 9.0	- 1.5
14	130	- 5.4	0.2
15	140	3.2	4.6
16	150	8.4	6.8
17	160	12.7	8.6
18	170	14.7	8.0
19	180	10.9	6.3
20	190	9.2	- 1.0
21	200	3.0	- 5.8
22	210	0.0	- 9.6
23	220	0.6	- 8.4
24	230	2.0	- 4.6
25	240	1.3	- 2.1
26	250	1.4	- 0.7
27	260	1.1	- 1.2
28	270	4.9	1.7
29	280	1.5	1.9
30	290	5.3	3.8
31	300	3.9	5.4
32	310	5.1	4.9
33	320	1.4	3.9
34	330	- 0.9	5.3
35	340	- 0.4	2.4
36	350	- 1.5	4.4

## ACIMUT

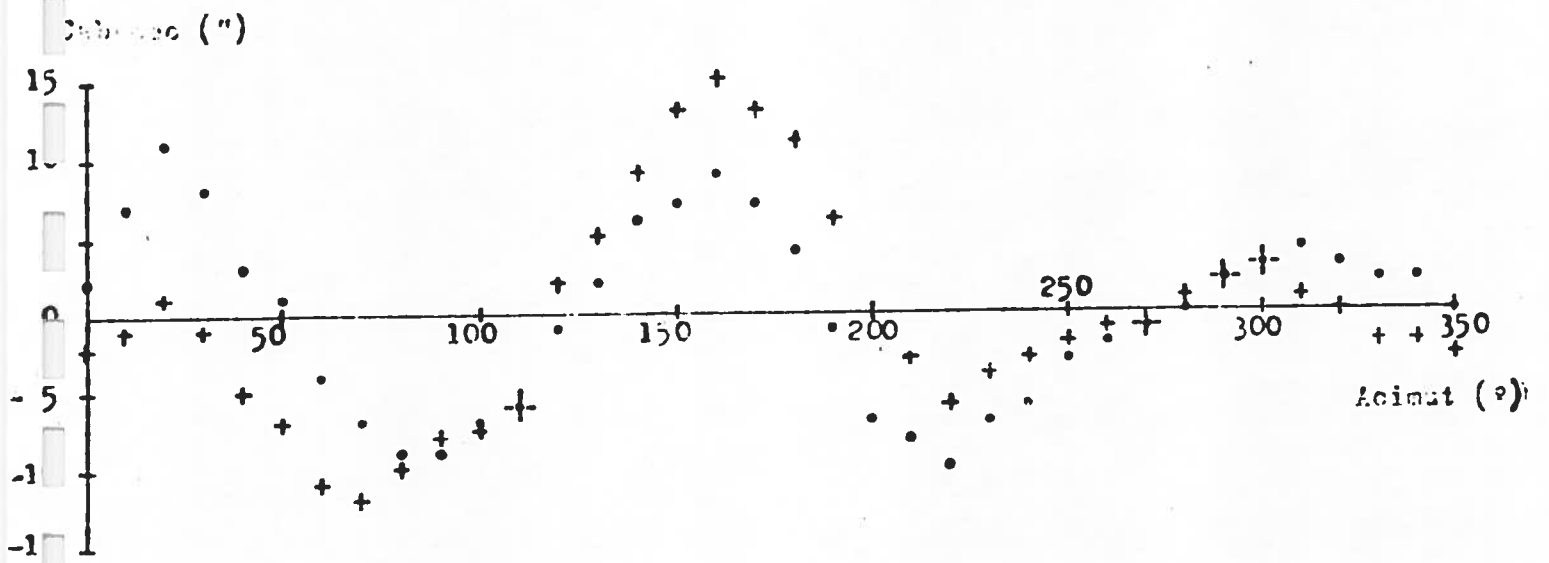
## ELEVACION

$O_A$	122.3"	$O_h$	-2.8"
$\epsilon$	-26.3"	$K_h$	98.1"
$\delta$	78.3"	R	55.2"
$\phi_1$	1.2	$\phi_2$	0.63
$\phi$	7.2"	$\phi$	7.0"
$K_A$	111.7°	$K_A$	7.9°
$\sigma$	5.9"	$\sigma$	7.4"

Tabla 3. Parámetros de la puntería determinados en noviembre-diciembre 1984 y valor cuadrático medio de los residuos.



Teodolito en posición a



+ Junio 1979

• Enero 1982

Teodolito en posición b

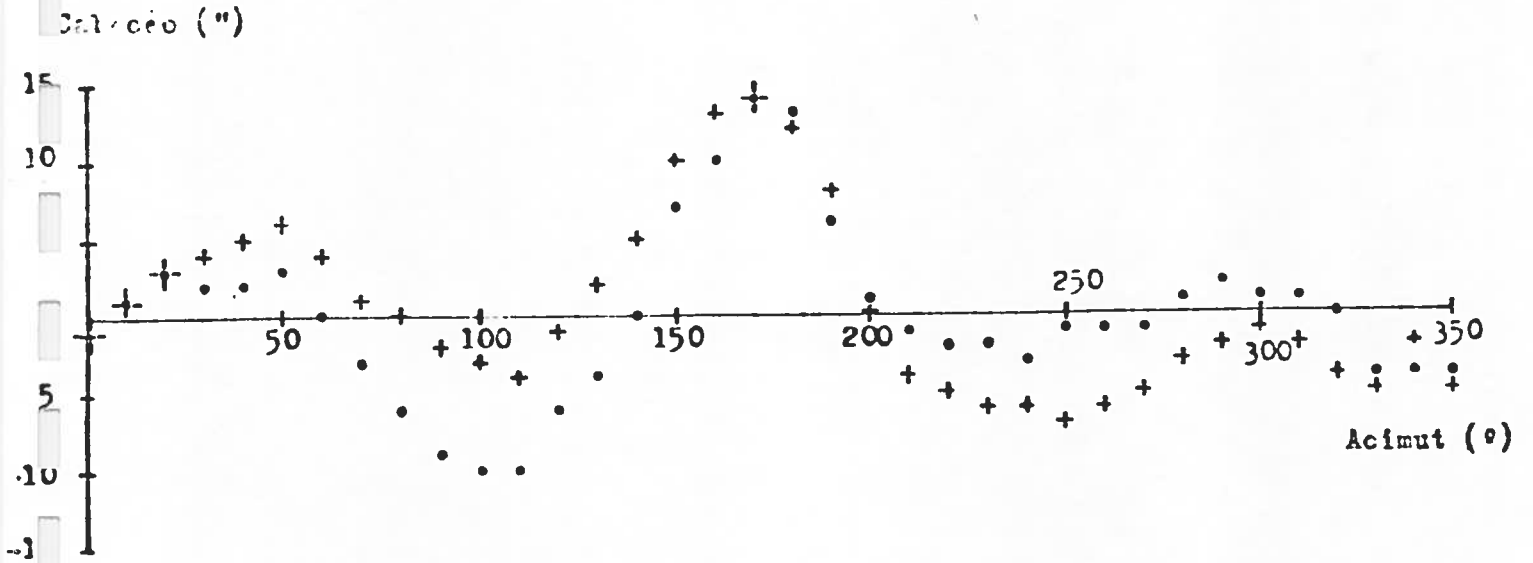


FIGURA 2a. Residuos del ajuste de los errores en acimut para las diferentes fuentes observadas en la primavera de 1984. La misma distancia que en elevación representa  $10^\circ$ , representa  $20''$  de residuo.

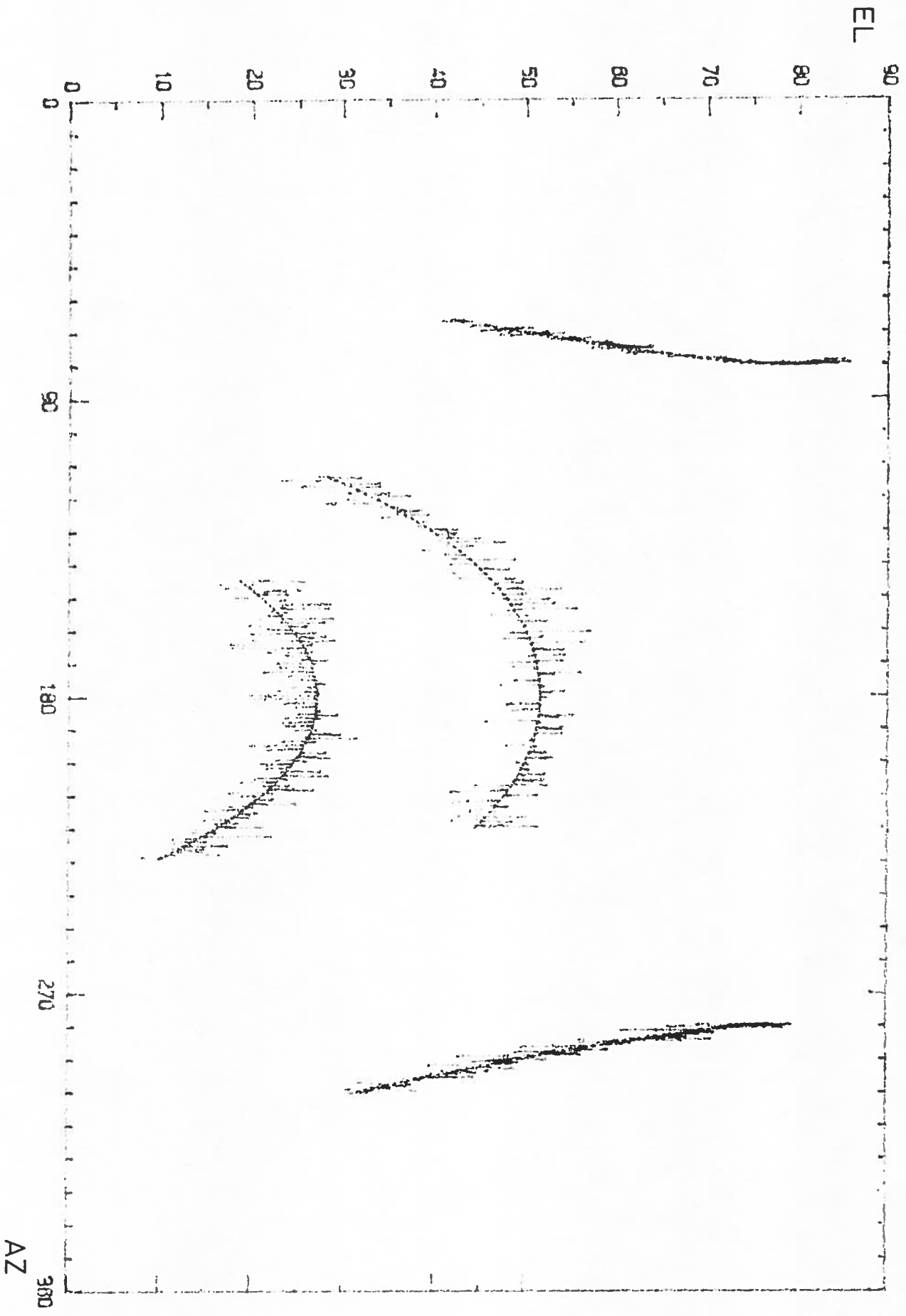


FIGURA 2b. Residuos del ajuste en elevación (primavera 1984).

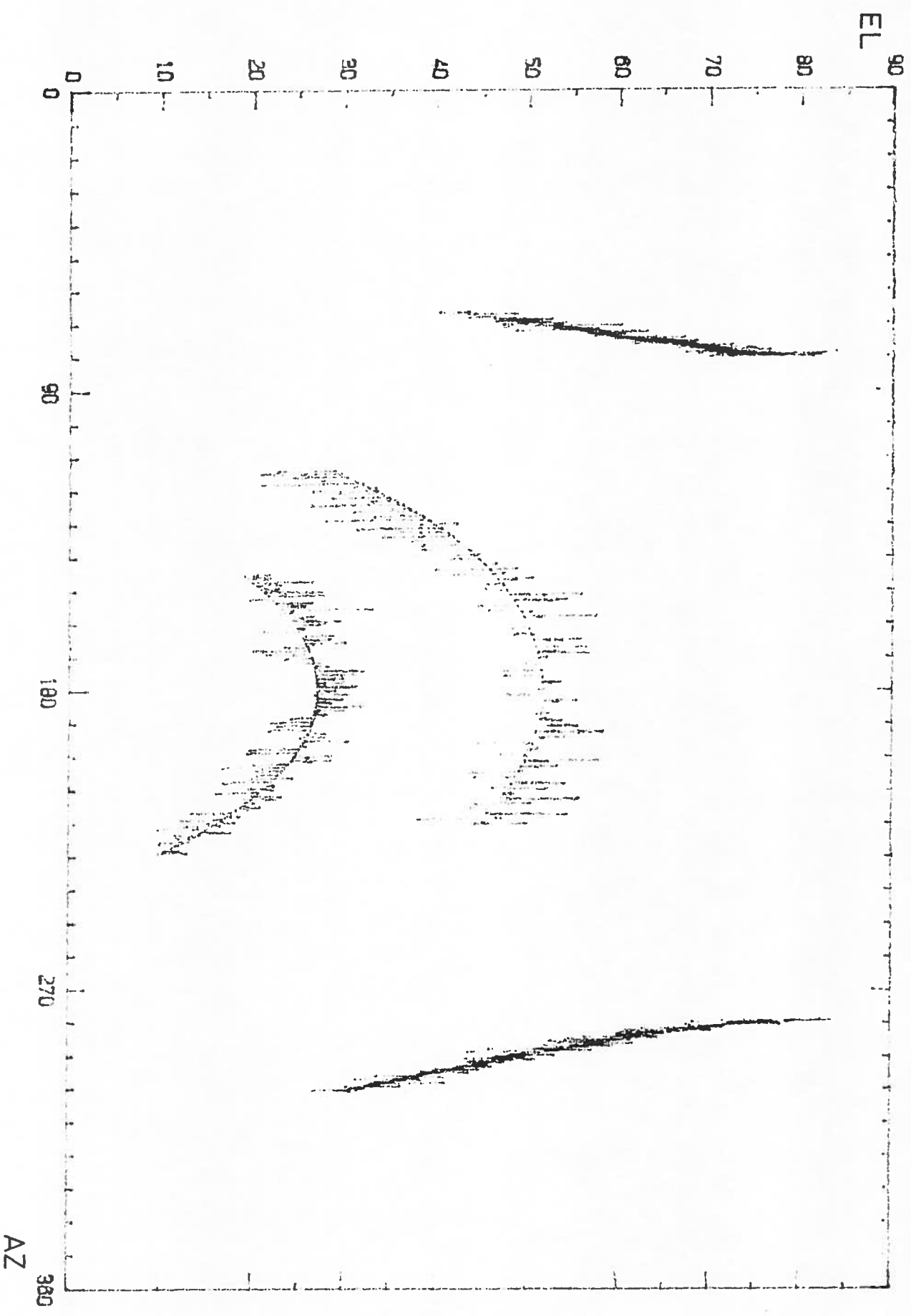
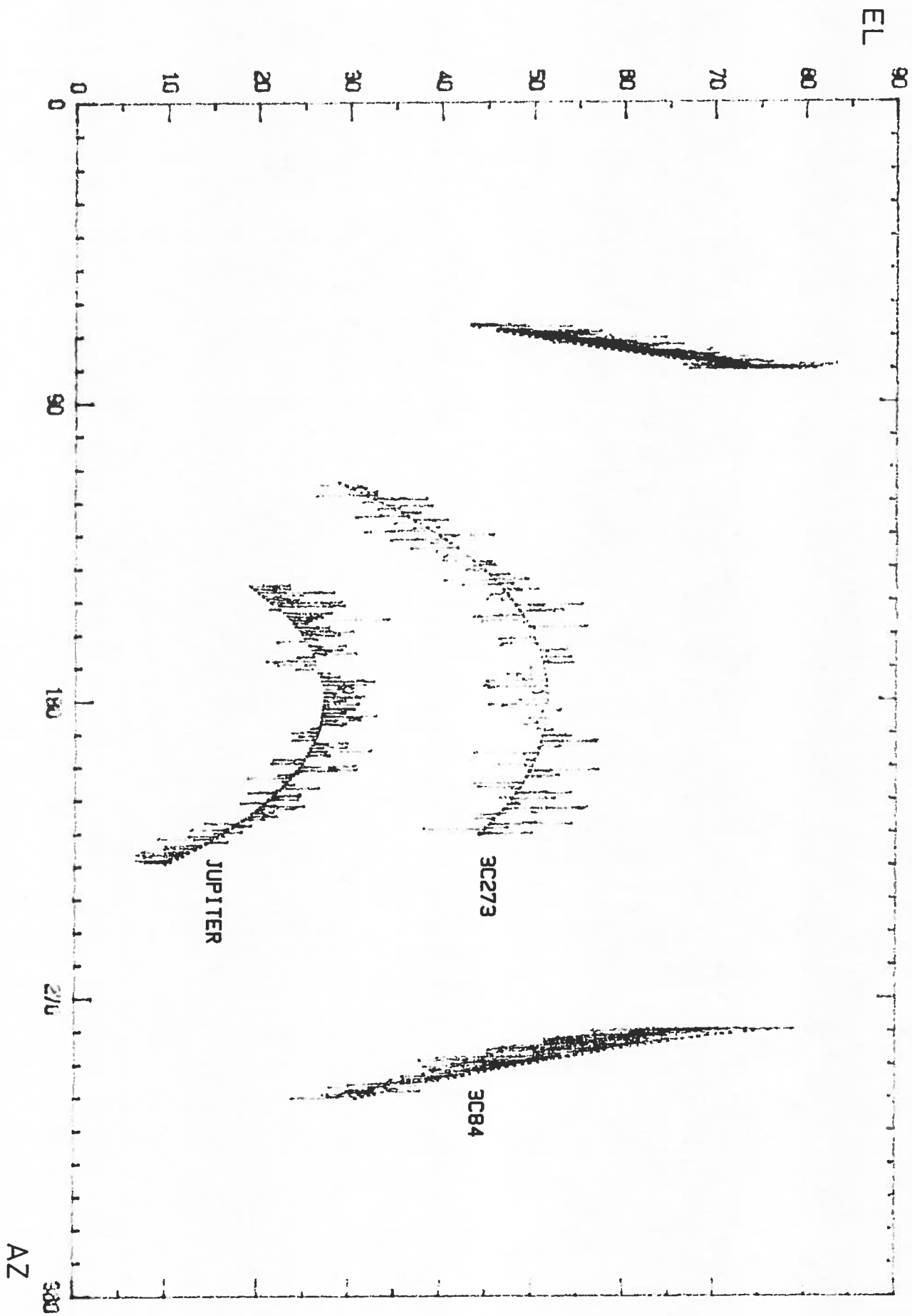


FIGURA 3. Errores de puntería medidos en diciembre 1984 (representación igual a la de la figura 2).



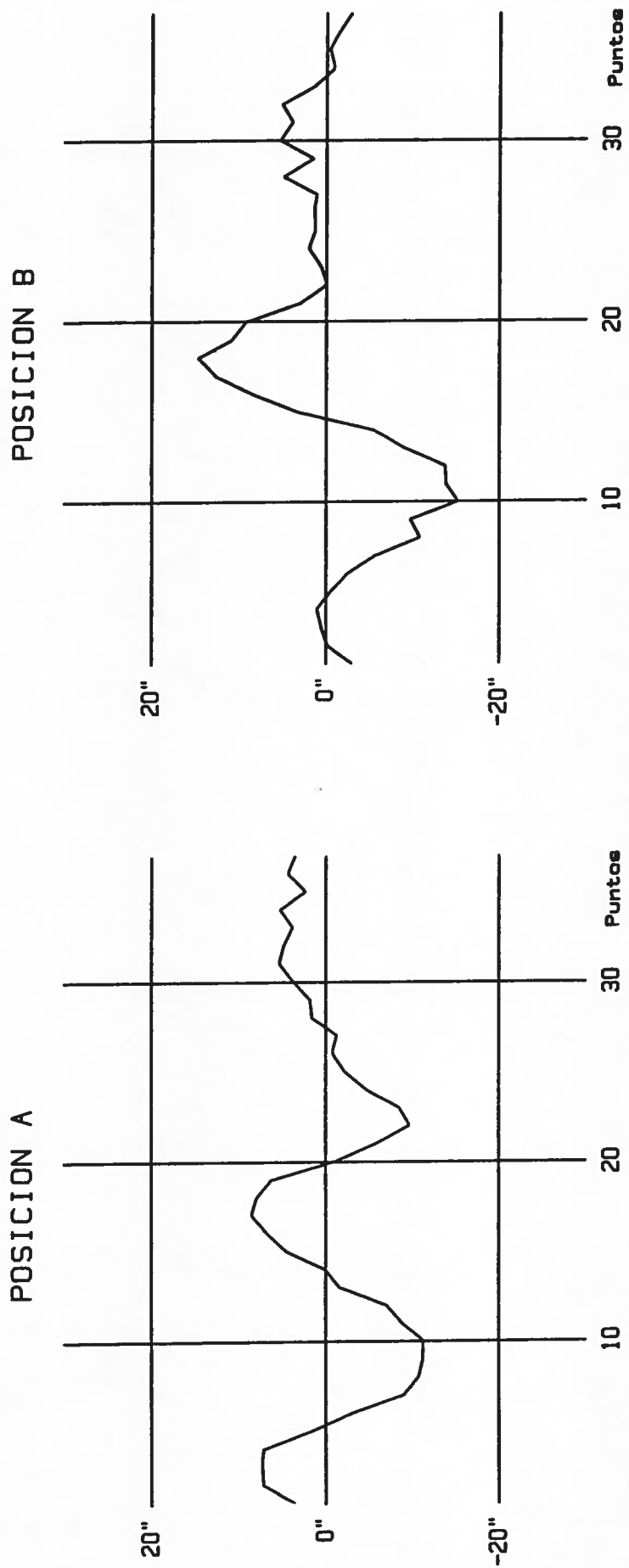


FIGURA 4. Inclinación del eje de acimutes medida en otoño 1984 y correspondiente a los datos de la tabla 2.

FIGURA 5a. Residuos del ajuste de los errores de puntería en acimut realizado en diciembre 1984.

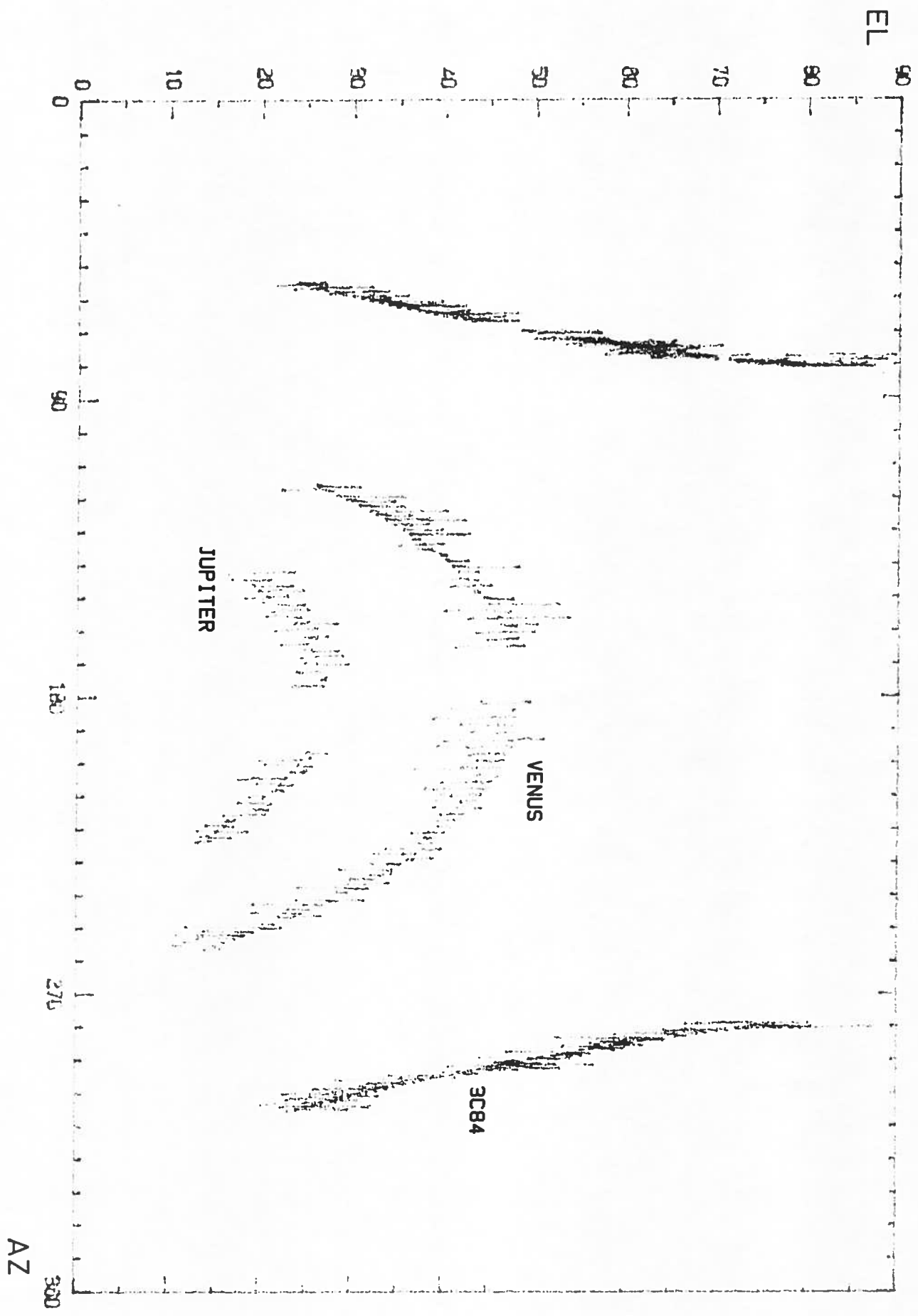


FIGURA 5b. Residuos del ajuste de los errores de puntería en elevación realizado en diciembre 1984.

