

XXX Semanas Fotogramétricas

M. AHREND

Análisis de errores fotogramétricos

H.-K. MEIER

Teoría y práctica del Ortoproyector Gigas-Zeiss



504

CD 526.918 : 061.3

XXX Semanas Fotogramétricas

En este cuaderno se tocan por primera vez en la serie de las comunicaciones de ZEISS sobre los progresos alcanzados por la óptica técnica, temas del campo de la fotogrametría. Con ello nos dirigimos a un círculo de lectores especializados en agrimensura y cartografía y que se dedican principalmente a la confección de mapas basados en fotos aéreas. De acuerdo con la considerable importancia internacional que tiene en nuestra época el método fotogramétrico frente a la planificación y el desarrollo de regiones económicas, publicamos este cuaderno en cuatro idiomas y con un tiraje total de 10000 ejemplares.

Los dos artículos que siguen son extractos revisados de dos conferencias explicadas durante las XXX Semanas Fotogramétricas en Karlsruhe. Las Semanas Fotogramétricas son una serie de reuniones, organizadas desde 1909 por la casa ZEISS en colaboración con hombres de ciencia prestigiosos. Hasta ahora, han tenido lugar en Jena, Munich y Karlsruhe.

Los actos del año 1965 atrajeron con un total de 182 cursillistas (123 participantes inscritos y 59 oyentes) un número de expertos relativamente alto. Procedían de 29 países distintos y representaban así una sección importante de la especialidad.

Los temas principales de los estudios fueron:

- 1° El mapa ortofotoscópico
- 2° La fotogrametría analítica
- 3° La fotogrametría y las obras de ingeniería.

Merecieron particular atención los ortofotoplanos de territorios norteamericanos, suecos y alemanes en escalas entre 1 : 2500 y 1 : 20000, que fueron presentados en una pequeña exposición.

Un resumen de todo el certamen se encuentra en un artículo del Dr.-Ing. G. WEIMANN que apareció en la revista "Bildmessung und Luftbildwesen", 1965, en las páginas 139—142.

Análisis de errores fotogramétricos

de MARTIN AHREND, Oberkochen, Alemania

Para adoptar una decisión sobre el camino a seguir en la construcción de instrumentos resulta útil conocer la magnitud de los errores en las operaciones aisladas en cada método. No siempre es posible sacar conclusiones de series de pruebas realizadas con la colaboración de numerosas instituciones (por ejemplo, [5], [6], [7], [17], [22]), a causa de la falta de homogeneidad en las condiciones previas, los medios empleados o las diferencias entre los participantes. En cada caso, al averiguar la magnitud del error total queda siempre en pie el problema de la verdadera fuente de los errores.

Para completar tales trabajos, y con miras a las cámaras con placa reticulada con distancias focales de 15 cm y 30 cm [3] fue emprendida una investigación, en cierto modo paralela a las investigaciones del "Grupo de trabajo para los problemas fundamentales de la Fotogrametría" [9], que ha durado varios años y que en su concepto básico continúa realizándose en los laboratorios fotogramétricos de las fábricas ZEISS; en los párrafos que siguen, se dará un resumen de ellas, muy condensado.

Se buscan datos sobre la exactitud de los diferentes elementos del método (dominantes) en todo el proceso fotogramétrico. Su determinación se refiere a la foto aislada que entra en el proceso estereoscópico. Con miras a conservar la claridad se supone la ausencia de toda correlación. Se indican errores de coordenadas medios con relación al plano-imagen (m'_k) y para determinada superficie en la foto (generalmente, después de una compensación con las incógnitas: escala, rotación y corrimiento; calculadas por las desviaciones con relación a una retícula ideal), considerándose siempre los factores determinantes como suficientemente exactos.

Los errores m'_k indicados pueden comprenderse como errores a esperar bajo condiciones medias, frente a los cuales medidas de procedimiento particularmente cuidadoso, por ejemplo, conducirían a un grado superior de exactitud y condiciones de trabajo menos favorables a un grado inferior de exactitud.

Al analizar los fenómenos de errores se intenta, continuando [2], distinguir funciones de errores sistemáticos (véase también [15], [16]). A raíz del análisis de las cifras disponibles se intenta, además, sacar datos sobre la desviación (minuciosidad en la elaboración, diferencias en el instrumental, distinto personal). Finalmente, se procede a una síntesis de los errores que conduce a ciertas conclusiones.

Las explicaciones que siguen se limitan a comunicar resultados obtenidos, pero evitan, para no entorpecer la claridad de la exposición, largas disquisiciones sobre los detalles de la medición y de la compensación.

Tabla 1

Errores fotogramétricos aislados

m'_k = error medio de coordenadas con relación al plano-imagen en una sola foto, en [μm] (valores medios);

f (distancia focal) y B (lado del formato de la foto) = $\frac{|x'| + |y'|}{2}$ en [dm], siendo $|x'|$ y $|y'|$ los valores máximos de coordenadas aprovechados;

v = aumento de observación; z = distancia de proyección en el restituidor; α = ángulo de la imagen máximo en la dirección de la coordenada.

Fuente de error	Comportamiento de los errores aproximadamente expresable por	Valores extremos encontrados para las constantes	m'_k para el alcance del modelo			m'_k para la superficie útil de toda la foto			Base	Válido para
			92mm x 184mm			184mm x 184mm				
			$f=15$	$f=30$	$f=60\text{cm}$	$f=15$	$f=30$	$f=60\text{cm}$		
Objetivo de toma (O)	$m'_{k_0} = \sqrt{0,8 B^2 + 5 \text{tg}^2 \alpha}$	0,8 : $\frac{2,25}{0,15}$ 5 : $\frac{10}{2}$	$\pm 1,8$	$\pm 1,4$	$\pm 1,25$	$\pm 2,1$	$\pm 1,8$	$\pm 1,7$	Mediciones en 130 cámaras fotogramétricas	$B = 1,8$ 2,3 $f = 1,1$ hasta 6,0
Rugosidades (P)	$m'_{k_P} = \sqrt{(1 + 2,25 B^2) \cdot \text{tg}^2 \alpha}$	1 : $\frac{1,5}{0,5}$ 2,25 : $\frac{6,25}{1}$	$\pm 1,4$	$\pm 0,7$	$\pm 0,35$	$\pm 1,7$	$\pm 0,9$	$\pm 0,4$	Mediciones en 140 placas de presión	$B = 1,8$ 2,3
Película (F) F_1 de acetato F_2 de poliéster	$m'_{k_F} = 3,5 \cdot B$ $m'_{k_F} = 2,5 \cdot B$ después de transformación por afinidad	3,5 : $\frac{9}{2}$ 2,5 : $\frac{3,5}{1,8}$	$\pm 4,8$ $\pm 3,4$	$\pm 4,8$ $\pm 3,4$	$\pm 4,8$ $\pm 3,4$	$\pm 6,4$ $\pm 4,6^1)$	$\pm 6,4$ $\pm 4,6$	$\pm 6,4$ $\pm 4,6$	Mediciones en 480 películas de acetato y 18 películas de poliéster	$B = 0,1$ hasta 2,0
Copiado (C)	$m'_{k_C} = 1,7$	1,7 : $\frac{3}{0,8}$	$\pm 1,7$	$\pm 1,7$	$\pm 1,7$	$\pm 1,7$	$\pm 1,7$	$\pm 1,7$	Mediciones en 26 copias en placa	$B = 1,8$
Comparador (K)	$m'_{k_K} = \sqrt{0,16 + \frac{36}{v^2} + 0,15 B^2}$	0,16 : $\frac{0,9}{0,1}$ 36 : $\frac{45}{30}$ 0,15 : $\frac{0,40}{0,05}$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8^3)$	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$	$\pm 0,9^3)$	Mediciones en 30 placas reticuladas y en 10 Estereocomparadores de Precisión PSK	$v = 1$ hasta 200
Restituidor análogo (A)	$m'_{k_A} = \sqrt{5 B^2 + \frac{16f^2}{z^2} + 180 \text{tg}^2 \alpha \cdot \frac{f^2}{z^2}}$	5 : $\frac{7}{4}$ 16 : $\frac{19}{10}$ 180 : $\frac{250}{120}$	$\pm 5,5$ $z = 2f$	$\pm 4,2$	$\pm 3,8$	$\pm 6,1$ $z = 2f$	$\pm 5,0$	$\pm 4,7$	Mediciones en 20 Estereoplanígrafos C-8 y en el Supragrafo	$B = 1,8$ y 2,3 $f = 0,6$ hasta 3,0 $z = f$ hasta 3f
Ajuste (S)										
<i>Mono</i>										
S_1 hitos blancos u otros puntos naturales semejantes	$m'_{k_S} = \sqrt{\frac{400}{v^2} + 0,00015 \cdot v^2 + 1}$		$\pm 1,6$	$\pm 1,6$	$\pm 1,6^3)$	$\pm 1,6$	$\pm 1,6$	$\pm 1,6^3)$	en cada caso aprox. 1.600 ajustes de 3 operadores en fotos aéreas de 18 DIN ($f = 153$, $h = 1.500$ m)	$v = 1$ hasta 200
S_2 puntos marcados con el punzador	$m'_{k_S} = \sqrt{\frac{300}{v^2} + 0,000004 \cdot v^2 + 0,5}$	400 : $\frac{40000}{50}$	$\pm 1,3$	$\pm 1,3$	$\pm 1,3$	$\pm 1,3$	$\pm 1,3$	$\pm 1,3$		
S_3 cruces de retícula	$m'_{k_S} = \sqrt{\frac{200}{v^2} + 0,000001 \cdot v^2 + 0,2}$	0,00015 : $\frac{1 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-6}}$ 1 : $\frac{60}{0,1}$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$		
<i>Estereo</i>										
S_4 hitos blancos en dirección "y"	$m'_{k_S} = \sqrt{\frac{1300}{v^2} + 0,0002 \cdot v^2 + 6}$		$\pm 3,3$	$\pm 3,3$	$\pm 3,3$	$\pm 3,3$	$\pm 3,3$	$\pm 3,3$	Mediciones en PSK, UMM y grupos experimentales	
S_4 hitos blancos en dirección "x"	$m'_{k_S} = \sqrt{\frac{600}{v^2} + 0,0002 \cdot v^2 + 6}$		$\pm 2,9^4)$	$\pm 2,9$	$\pm 2,9$	$\pm 2,9$	$\pm 2,9$	$\pm 2,9$		
<i>Transporte estereoscópico mediante punzador KS</i>										
S_5 dirección "y" ⁵⁾	$m'_{k_S} = \sqrt{\frac{10000}{v^2} + 0,00015 \cdot v^2 + 20}$		$\pm 7,7$	$\pm 7,7$	$\pm 7,7$	$\pm 7,7$	$\pm 7,7$	$\pm 7,7$		
S_5 dirección "x" ⁵⁾	$m'_{k_S} = \sqrt{\frac{500}{v^2} + 0,00015 \cdot v^2 + 20}$		$\pm 4,7$	$\pm 4,7$	$\pm 4,7$	$\pm 4,7$	$\pm 4,7$	$\pm 4,7$		

1) Valores parecidos se comunican en [21].

2) WUNDERLICH formula en [27] la expresión $m_{cs} = \pm (3,9 + 5,3b'' \text{ [dm]}) \mu$. Sentimos no poder discutir aquí la multitud de otras comparaciones que serían posibles con dicho estudio.

3) Para $v = 16$.

4) VISSER obtienea valores parecidos en [23].

5) m'_{k_S} = error de coordenadas del nuevo punto marcado, actúa como error de paralaje.

La tabla 1 resume los resultados de las investigaciones en un solo cuadro. En los párrafos siguientes se señalan algunos detalles relativos a las fuentes de errores.

Objetivo de toma (0)

Fig. 1 muestra como ejemplo resultados de mediciones realizadas en cien cámaras fotogramétricas con una distancia focal de 15 cm. Otras investigaciones se refirieron a cámaras con distancias focales de 11,5 cm, 21 cm, 30 cm y 60 cm (conversión de mediciones goniométricas).

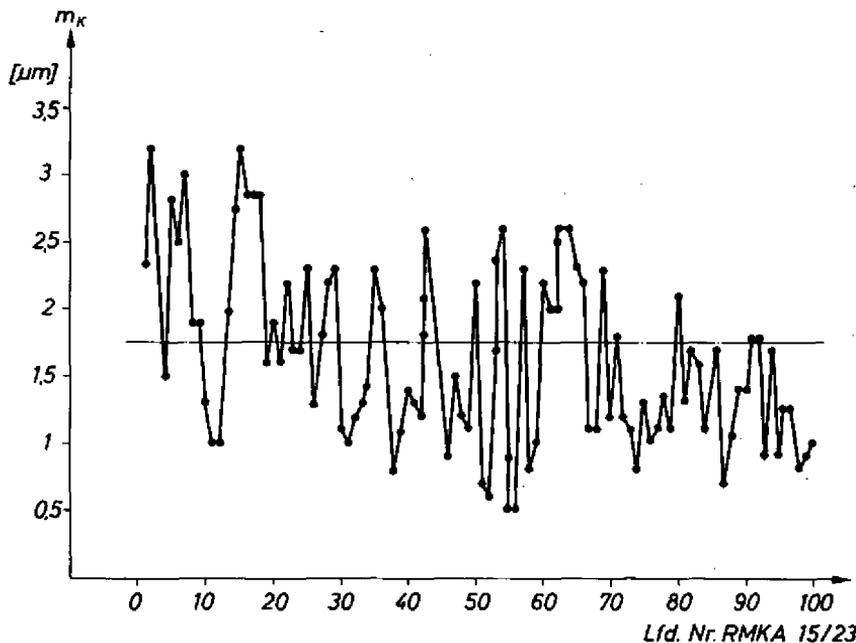


Fig. 1 — Error residual medio de coordenadas en 100 cámaras fotogramétricas granangulares (componente asimétrica)

Desde luego, es lícito partir de la base que en la actualidad las mediciones de la distorsión realizadas por instituciones internacionales — por ejemplo, el NRC del Canadá, el National Bureau of Standards de Wáshington o el laboratorio fotogramétrico en Oberkochen — coinciden dentro de 2—3 micrones (desviaciones máximas con relación a la curva de distorsión media). No forma parte de este resumen la modificación de las condiciones durante los vuelos fotográficos, por ejemplo, a causa del efecto de las temperaturas ambientales [11].

Placa de presión (P)

El problema de la llanura puede descomponerse en diferentes factores:
 P_1 La llanura de la misma placa de presión (véase, por ejemplo, fig. 2);

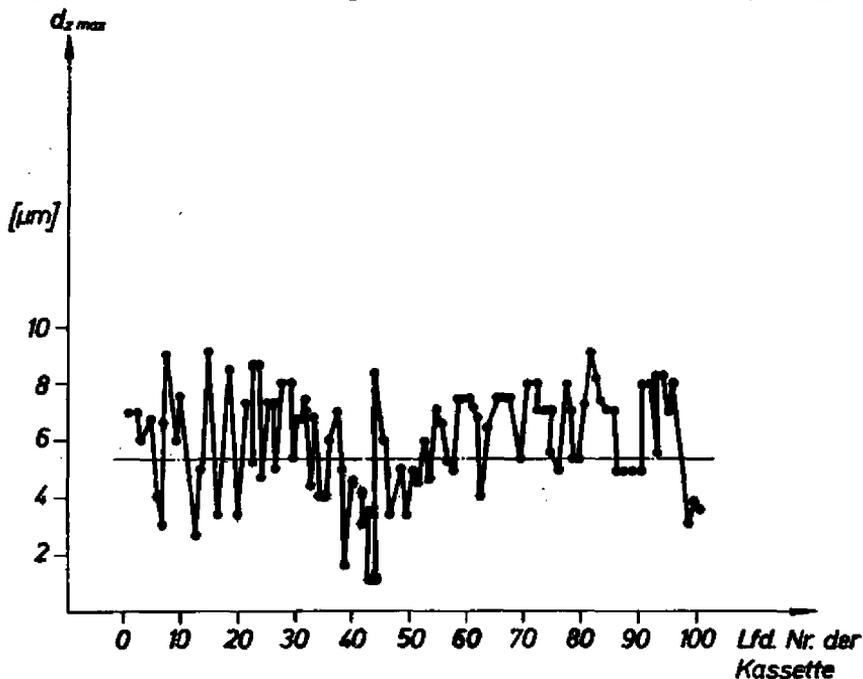


Fig. 2 — Llanura de placas de presión en 100 almacenes FK 24/120 (error máximo)

P_2 el amplio contacto de la película con la placa de presión (aquí surte efecto el funcionamiento seguro del sistema de aspiración, lo mismo que las variaciones en el espesor de la película, véase, por ejemplo, [2] pág. 75, [9] pág. 7);

P_3 la estructura de panales que origina el aplanamiento de la película (fig. 3, observación por medio del instrumento de interferencia);

P_4 la presencia de polvo y partículas de la emulsión entre la película y la placa de presión (se impone la limpieza por aire comprimido), y, si se trabaja con placas fotográficas,

P_5 las rugosidades en las placas de vidrio originadas por defectos de pulido, flexión elástica y los esfuerzos de inflexión originados por la emulsión (esta última es sensible a la humedad, por cuyo motivo conviene aplicar una capa en cada lado).

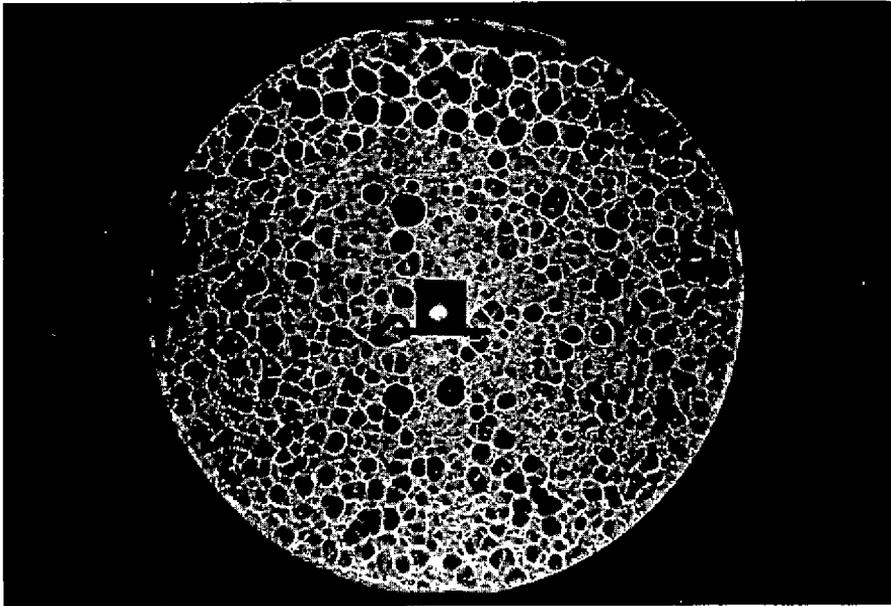


Fig. 3 — Aparición de panales a causa del aplastamiento de la película

En la restitución de fotos con retícula se olvida a menudo que la retícula cubre tanto las deformaciones de la película como los efectos de extensa ausencia de llanura. Desde este punto de vista convendría enjuiciar críticamente más de una comunicación sobre el “comportamiento de la película”. La fórmula m_{kP} no encierra ningún factor referente a las partículas de polvo; se da por entendido que los almacenes estén suficientemente limpios.

Película (F)

Las investigaciones en [2] han citado para película de acetato una serie de valores procedentes de mediciones en 180 pedazos de película bajo condiciones de ensayo, a veces extremadas; las cifras citadas incluyen las de todas las publicaciones conocidas hasta entonces. Los valores medios derivados de ellas para la tabla 1 valen cuando — como parece ser actualmente la costumbre general — se observan ciertos métodos y reglas (e. o. en cuanto a la construcción de los almacenes, agua humectante, técnica de secado, devanado y almacenado, momento en que se saca la copia en diapositiva, y la transformación por afinidad durante la restitución). Como en 1957 aún no se podía suponer la observación de tales reglas, fue necesario contar en [2], en lugar de la constante indicada aquí de 3,5 micrones, con un valor de 5 micrones.

No ha sido posible organizar otra vez una serie tan completa de pruebas para película de poliéster. Lo interesante es que bajo condiciones de laboratorio favorables la estabilidad dimensional de películas de poliéster y de acetato puede ser exactamente idéntica (véase un ejemplo en fig. 4). Esto viene a decir que la ventaja principal de las películas de poliéster, además de sus cualidades mecánicas favorables y su poca sensibilidad a la humedad, puede estribar en que

- los cambios de escala son menores (lo que es prácticamente sin importancia para la fotogrametría),
- varían menos en su comportamiento dimensional¹⁾.

Los valores valen aquí según transformaciones por afinidad (2 escalas separadas en „ x'' e „ y'')²⁾.

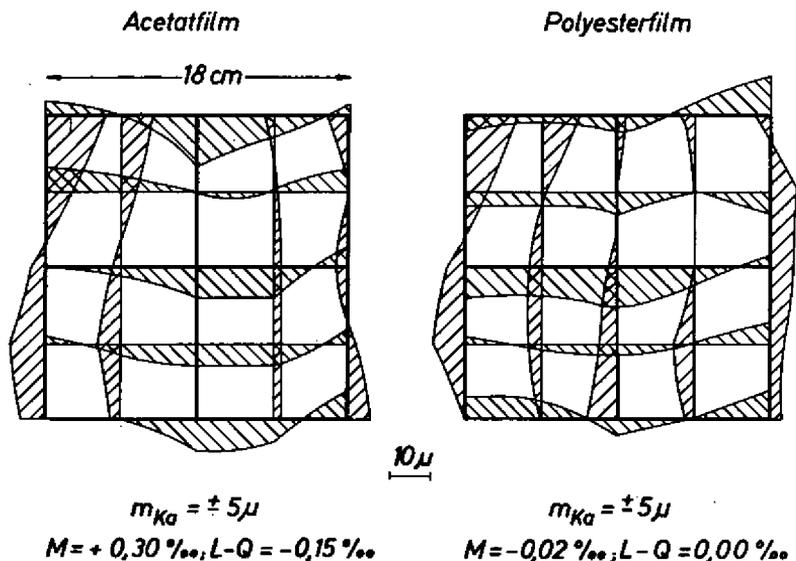


Fig. 4 — Comparación entre una película de poliéster y una de acetato

¹⁾ WUNDERLICH encuentra también en [26] valores más favorables para películas de poliéster que para los tipos de acetato.

²⁾ Como se observa el comportamiento afín de las películas siempre en la dirección de avance de la película, es muy fácil aplicar el tratamiento numérico correspondiente durante la restitución normal, contrariamente al factor de „afinidad“ de otros elementos de errores, en los cuales la dirección de afinidad puede variar libremente con relación a la dirección de vuelo.

Con este motivo es lícito recordar que la estabilidad dimensional de películas fotográficas depende esencialmente del comportamiento de la emulsión en estado húmedo y cuando comienza a secarse. La tabla 2 contiene el resultado de observaciones realizadas durante un período de 13 años en algunas películas (bajo diferentes condiciones de almacenamiento). Préstese especial atención a la columna m'_{ka} . Indica que la estabilidad dimensional de películas — haciendo caso omiso de la componente de escala — casi no sufre cambio a lo largo de los años.

Tabla 2

Estabilidad dimensional de películas, observadas durante un periodo de 13 años.

Película Num.	M	$L - Q$	m'_{ka}	
31 a 32	$-1,51^{0/100}$	$+0,13^{0/100}$	$\pm 3 \mu\text{m}$	1952
	$-0,82$	$-0,18$	± 4	1954
	$-2,50$	$-0,36$	± 5	1965
31 a 33	$-1,29$	$+0,08$	± 10	
	$-1,28$	$-0,25$	± 11	
	$-1,15$	$-0,43$	± 11	
91 a 44	$-1,51$	$+0,22$	± 3	
	$-1,78$	$+0,06$	± 3	
	$-2,36$	$-0,36$	± 5	
91 b 65	$-0,14$	$-0,06$	± 5	
	$+0,04$	$-0,26$	± 6	
	$-0,74$	$-0,24$	± 7	
91 d 01	$-2,76$	$+0,74$	± 10	
	$-2,44$	$-0,08$	± 10	
	$-5,10$	$-0,12$	± 12	

M = modificación de la escala; $L - Q$ = diferencia de escala entre las direcciones longitudinal y transversal; m'_{ka} = error medio de coordenada en una superficie de $1,6 \text{ dm} \times 1,6 \text{ dm}$ después de la transformación por afinidad.

Copiado (C)

Si el contacto entre la película y la placa diapositiva es satisfactorio durante el copiado, este proceso proporcionará un error relativamente insignificante. Sin embargo, hay que advertir que ciertas investigaciones hablan de fenómenos más importantes [21]. Se obtendrán valores más constantes con toda seguridad, si se efectúa el secado en posición horizontal, se evita todo contacto de la emulsión por el operador y si ésta es tratada con líquidos humectantes.

Comparador (K)

La exactitud de estereocomparadores del tipo PSK depende e. o. de la exactitud de la retícula y del aumento de observación. Fig. 5 indica como ejemplo los resultados que proporcionaron las mediciones en 30 retículas de precisión. En cuanto a los valores de la tabla 1, se han eliminado los errores del ajuste, lo mismo que los de los medios de comprobación. En cada caso ha sido efectuado dos veces el proceso de coincidencia. Los valores valen para instrumentos perfectamente ajustados. Compárese también, por ejemplo, [13].

La ausencia de un factor de temperatura en la ecuación para m'_{kk} se debe al principio constructivo de los instrumentos empleados.¹⁾

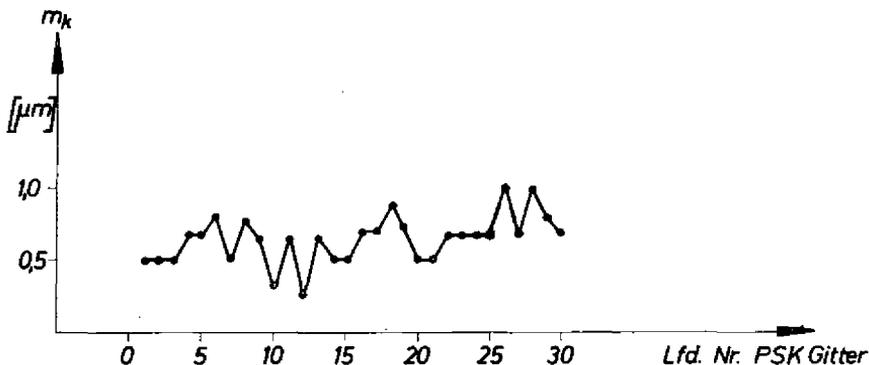


Fig. 5 — Error residual medio de coordenadas en 30 retículas de precisión 240 mm \times 240 mm

Restituidor análogo (A)

La precisión total de un restituidor depende aquí, aparte de ciertos efectos de deformación, juego e inestabilidad, de la cuidadosa ejecución de los cojinetes de bolas, de los carriles de guía, de las guías o de los cardanes y del estado de ajuste. Pueden resumirse los diferentes efectos en tres grupos de errores:

- errores residuales que se manifiestan en el plano-imagen,
- errores residuales que parecen relacionados con el plano del instrumento,
- errores residuales que crecen con el ángulo de la imagen.

Naturalmente, los valores varían aquí sensiblemente, no sólo en diferentes instrumentos de un mismo tipo, sino principalmente en aparatos de dife-

¹⁾ A este respecto, se informa en [20] sobre estudios de exactitud para una escala de 5 a 40° C.

rentes principios constructivos. De entre las mediciones conocidas y disponibles, merece cierta atención la escala de distancias focales comprobadas entre 60 mm y 300 mm. En general, hay que decir que para mediciones de control convendría no limitarse a una sola prueba con "portaplacas horizontal".

Exactitud de ajuste (S)

En realidad resulta difícil obtener valores representativos para esta columna. Las mediciones comparativas correspondientes difieren notablemente entre sí. Los resultados son, e. o., función de la calidad del objeto, del contraste del objeto (véase, por ejemplo, [18]), la relación entre diámetro del índice de medición y diámetro del objeto, la iluminación de la imagen, la calidad y distancia focal de la cámara de toma, la calidad de la

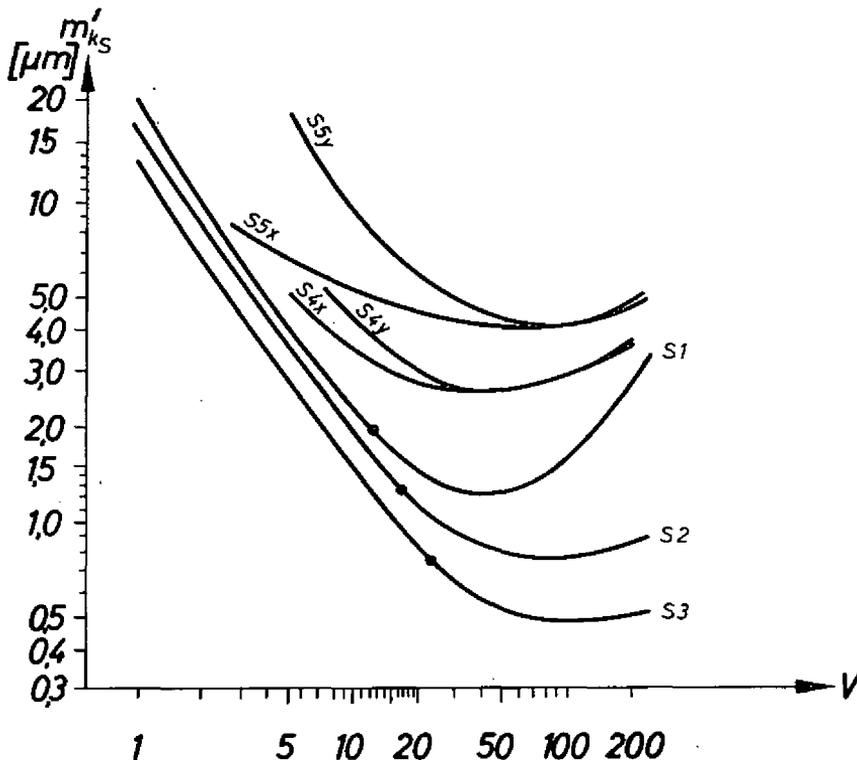


Fig. 6 — Exactitud de ajuste en fotografías, según tabla 1

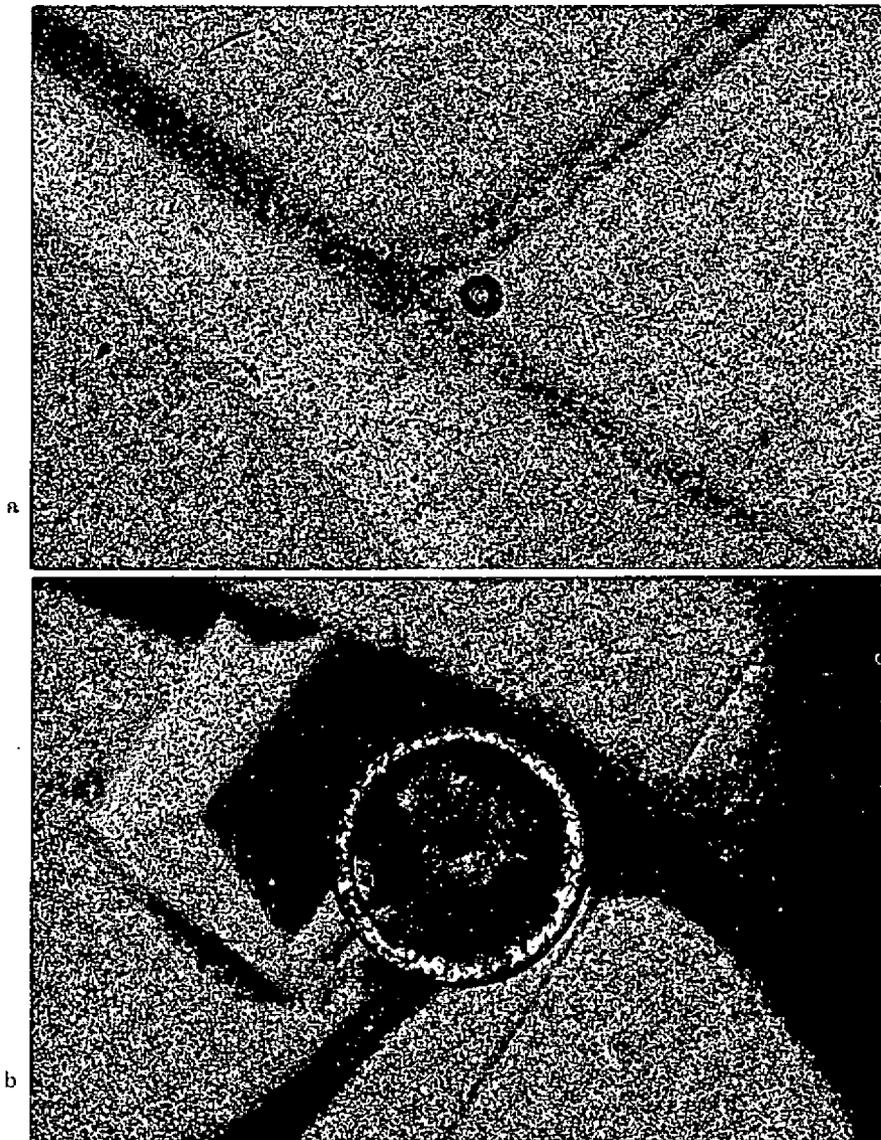
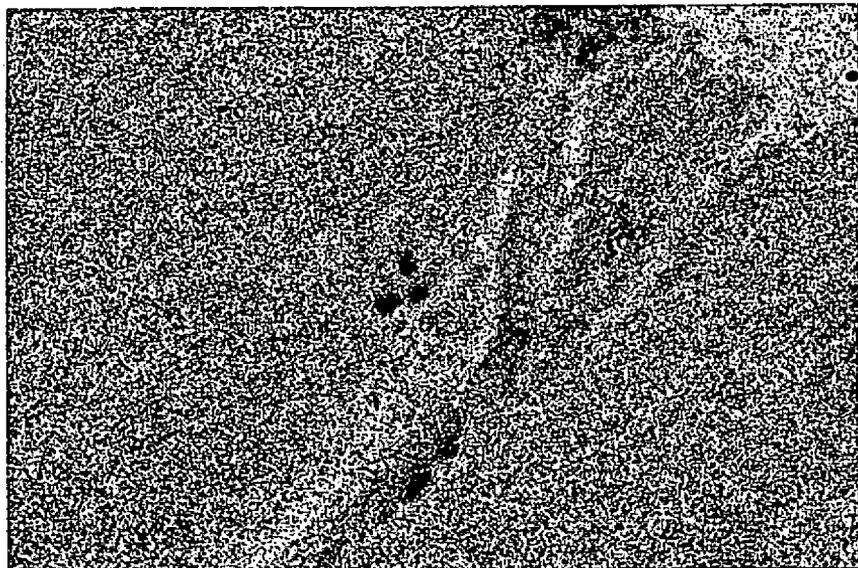
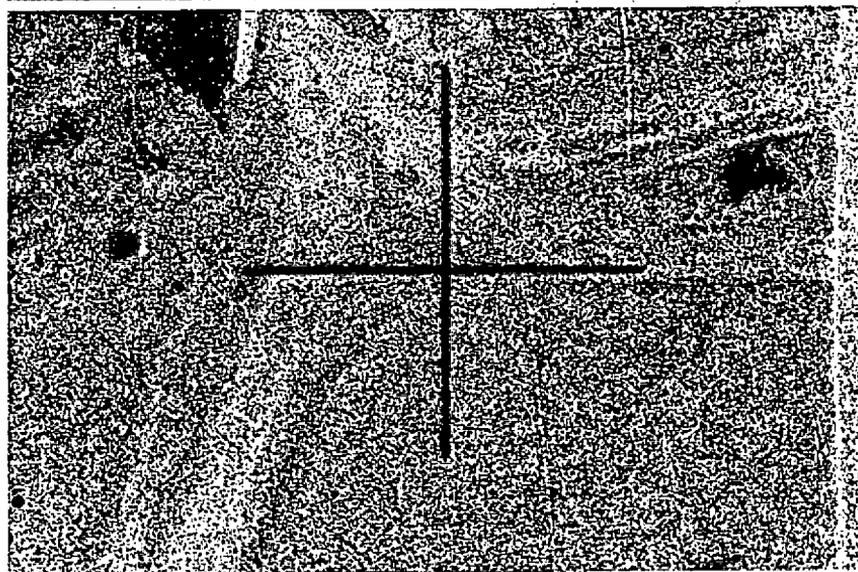


Fig. 7 — "Objetos de ajuste" bajo 25 aumentos

- a) punto artificial, obtenido por medio del Instrumento Punzador KS en alta humedad ambiente — b) marca anular, obtenida por el Marcador MK



c



d

c) señal blanca en el terreno, $h = 1.200$ m. $f = 15$ cm. 18° DIN (Negativa)
d) cruz de retícula (RMK AR 15/23)

película de toma, la altura de vuelo, la calidad de la óptica de observación, el tiempo que necesita el operador para adaptarse, y el aumento de observación. Por ello, los valores indicados bajo S en la tabla 1 sólo dan indicios relativos a los objetos citados. Fig. 6 ilustra las ecuaciones.

En las fórmulas, el primer término indica e. o. el límite de acomodación del ojo, el segundo y tercer término dependen e. o. de la calidad del objeto y de la granulación de la emulsión.

Como se sabe, se elige un aumento tan pequeño como posible para que el campo visual sea tan grande como posible y, por lo menos hasta cierto límite, suficiente amplio para alcanzar la máxima exactitud de ajuste. En fig. 6 pueden encontrarse ciertos valores óptimos para este fin. Por ejemplo, se optará por los lugares señalados con puntos negros, porque la ganancia en exactitud hasta el máximo propiamente dicho importa solamente unas pocas décimas de micrón, pero que se pierden de todas maneras a causa de la presencia de otros errores. Fig. 7 muestra ciertos objetos de ajuste típicos.

Merecen atención aquellos valores que permiten reconocer la diferencia entre el ajuste estereoscópico o el transporte estereoscópico de puntos y el ajuste monoscópico. Insistimos en que estas mediciones han sido repetidas varias veces porque el resultado tan inconfundible fue sorprendente. Es evidente que paralajes no notadas durante el ajuste estereoscópico de un punto tienen por consecuencia que con el "índice doble" así originado se causan errores de coordenadas dx , dy , cuya magnitud llega sólo a la mitad de las paralajes residuales correspondientes.

Al verificar tales errores residuales se eliminan a menudo de forma inadmisibles tales errores relativamente constantes mediante una transformación de dos acumulaciones de puntos, la una encima de la otra. En el estudio presente (copias de una película tomada con cámara con placa reticulada sobre dos placas) se procedió a una comparación entre los ajustes estereoscópicos y los ajustes monoscópicos y se realizaron las transformaciones necesarias para la determinación de las paralajes durante el transporte de los puntos, en cada caso apoyándose en cruces "idénticas" de la retícula.

El hecho de que la coordenada "y" proporciona valores más desfavorables debería ser corregir al usar aumentos de menos de 40 veces intercalando prismas de Dove.

No pararemos mientes aquí en las diferencias entre la exactitud de ajuste entre el centro y los bordes de la foto aérea. De una manera general, sería deseable que se organizaran series de pruebas más completas todavía con relación al problema de la exactitud de ajuste, el transporte más favorable de los puntos o la importancia del ojo "principal" (véase también [25]). De todas maneras, puede deducirse para los trabajos de triangulación lo siguiente, a raíz de las mediciones realizadas y de otras observaciones:

- a) Utilícense en lo posible puntos naturales, que se marcarán eventualmente con un sencillo instrumento auxiliar, por ejemplo, el Marcador MK, y que se ajustan monocular o binocularmente. La identidad se comprobará primero estereoscópicamente.
- b) Al utilizar puntos artificiales en fajas de cada vez, marcar sólo aquellos puntos que estén situados en el eje de las fotos (véase [28], pág. H 1, par de fotos izquierdo); empalmar estereoscópicamente en el comparador los puntos homólogos. Véase también [4], [10].

Si estas observaciones son confirmadas en nuevos trabajos, tampoco se impondrá el monocomparador en el porvenir para la triangulación frente al estereocomparador, sin hablar de los problemas de la restitución analítica de pares de fotos aisladas y de la identificación de los puntos (véase también [24]).

Adición de errores

Una combinación de las fórmulas citadas en la tabla 1 mediante adiciones cuadradas¹⁾ da para el método analítico basado en fotos tomadas con cámaras con retícula y en puntos naturales ($O + C + K + S_1 + S_3$):

$$m_k \text{ analítico} = \sqrt{4,3 + 0,95 \cdot B^2 + 5 \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{636}{v^2} + 0,00015 \cdot v^2}$$

Para la restitución con restituidores análogos vale entonces para el caso hasta ahora preferentemente aplicado ($O + P + F_1 + C + A + S_{4r}$):

$$m_k' \text{ análogo} =$$

$$\sqrt{8,9 + 18 \cdot B^2 + 6 \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{600}{v^2} + 0,0002 \cdot v^2 + \frac{16f^2}{z^2} + \operatorname{tg}^2 \alpha \left(2,25 \cdot B^2 + 180 \cdot \frac{f^2}{z^2} \right)}$$

La tabla 3 contiene algunos valores numéricos para este caso y otras combinaciones metódicas (en la sexta línea se llega a „mono“ corrigiendo eventualmente el ajuste estereoscópico por la observación monocular):

Se comprenderá que, desde el punto de vista del presente estudio, el método analítico puede netamente superar al método análogo, si se le combina con cámaras con retícula y puntos naturales perfectamente reproducidos por la foto aérea y ajustados monoscópicamente o binocularmente. Pero *como no siempre se dispondrá de puntos naturales convenientes*, los valores numéricos de la primera columna *no podrán constituir la regla de las restituciones fotogramétricas*.

Ahora bien, al enjuiciar los valores precedentes habrá que prestar atención al detalle de que se trata de errores de coordenadas relativos a fotos aisladas y a valores medios procedentes de un conjunto cuyos elementos difieren

¹⁾ Se evita a conciencia aquí un tratamiento separado de los errores sistemáticos e irregulares.

Tabla 3

Errores metodicos fotogrametricos

Método	Elementos	$m\mu$ (en micrones) para 92 mm \times 184 mm $f = 15$ cm $f = 30$ cm $f = 60$ cm	$m\mu$ (en micrones) para 184 mm \times 184 mm $f = 15$ cm $f = 30$ cm $f = 60$ cm
Cámara con retícula + comparador + puntos naturales (mono)	$O + C + K + S_1 + S_3$	$\pm 3,2$ $\pm 3,0$ $\pm 2,0$	$\pm 3,4$ $\pm 3,2$ $\pm 3,1$
Cámara normal ¹⁾ + comparador + película de poliéster + puntos naturales (mono)	$O + P + F_2 + C + K + S_1$	$\pm 4,7$ ¹⁾	$\pm 5,8$ $\pm 5,5$ $\pm 5,4$
Cámara normal + comparador + película de acetato + puntos naturales (mono)	$O + P + F_1 + C + K + S_1$	$\pm 5,9$ ²⁾	$\pm 7,4$ $\pm 7,2$ $\pm 7,1$
Cámara normal + comparador + película de acetato + puntos naturales (estéreo)	$O + P + F_1 + C + K + S_{1a}$	$\pm 6,3$	$\pm 7,8$ ³⁾ $\pm 7,0$ $\pm 7,5$
Cámara normal + comparador + película de acetato + puntos artificiales (estéreo)	$O + P + F_1 + C + K + S_{2a} + S_3$	$\pm 7,4$	$\pm 8,7$ $\pm 8,5$ $\pm 8,4$
Cámara normal + restituidor análogo + película de poliéster + puntos naturales (mono)	$O + P + F_2 + C + A + S_1$	$\pm 7,2$ ⁴⁾	$\pm 8,4$ $\pm 7,5$ $\pm 7,2$
Cámara normal + restituidor análogo + película de acetato + puntos naturales (estéreo)	$O + P + F_1 + C + A + S_{2a}$	$\pm 8,3$	$\pm 9,8$ $\pm 9,0$ $\pm 8,8$

1) En [26] : 3,3 micrones.

2) En [26] : 6,5 micrones.

3) En [5] se encuentran como valor medio para 5 cámaras estudiadas $\pm 7,2$ micrones.

4) Si es un caso comparable, puede derivarse para ello de [26] un valor de 5,5 micrones.

5) Aquí significa "cámara normal" una cámara aérea sin retícula.

bastante entre sí. Por lo tanto, no excluyen la posibilidad de que un vuelo comparativo, por ejemplo, entre una cámara con retícula y una cámara normal, suministra otros resultados que los que aquí se deducen, si en dicho vuelo la cámara con retícula tiende hacia el extremo negativo de las tolerancias de producción y la cámara normal hacia el extremo positivo de las mismas. Sin embargo, para muchas reflexiones debería encontrarse en los valores citados un indicio sobre las relaciones de exactitud a esperar de los diferentes métodos.

La tabla 4 contiene ciertos valores numéricos deducidos de cuanto precede y relacionados al plano del terreno para una misma superficie de terreno (0,72 km²) (valores básicos $f = 15$ cm, $h = 1000$); la exactitud planimétrica en el terreno se calcula a raíz de la exactitud planimétrica en la foto de una manera simplificada por medio de la escala (véase [2], págs. 80/81) y la exactitud altimétrica de la expresión $m_z = \frac{m_x \cdot f \sqrt{2}}{b}$ (restituyéndose siempre un par de fotos aisladas). Se renuncia aquí a una correlación entre las tres columnas derechas de la tabla 3 con triangulaciones de faja y de bloque [1], [12].

Tabla 4

Errores metodicos fotogrametricos relativos a una misma superficie de terreno en el modelo estereoscópico

Cámara	Altura de vuelo [m]	Elementos	Exactitud en el plano-imagen m'_x [μ]	Exactitud planimétrica m_x [mm]	Exactitud altimétrica m_z [mm]
30/23	2000	O + P + F ₂ + C + A + S ₁	± 6,1	± 40	± 187
21/18	1750	„	± 5,4	± 45 ¹⁾	± 185 ¹⁾
2 × 21/18	1240	„	± 6,4	± 38	± 78
15/23	1000	„	± 7,2	± 47	± 110
2 × 15/23	710	„	± 8,4	± 39	± 46
R 15/23	1000	O + C + K + S _{4x} + S ₃	± 4,0	± 26	± 61
10/14 placas	1070	O + P + A + S ₁	± 5,2	± 56	± 141

¹⁾ LEHMANN indica para esto, por ejemplo en [13] (desde luego para F₁), 47 mm o 142 mm. Varias series de pruebas internacionales han producido resultados menos favorables. Desde luego, no deberían tomarse en serio mediciones en las cuales no se haya introducido ninguna compensación de distorsión correcta.

Conversiones aproximadas para otras áreas influyen en la exactitud con la raíz de la relación de superficies; conversiones para otras alturas de vuelo influyen de manera lineal con la relación de las alturas de vuelo.

No fueron objeto de las reflexiones que anteceden, e. o.

- a) los errores residuales terrestres de los puntos de apoyo o de los puntos de referencia,
- b) la influencia de la refracción,
- c) el proceso estereoscópico propiamente dicho (correlaciones entre los errores, particularmente en los grupos *O*, *P*, *F* y *A*, y la combinación de los errores y su compensación parcial por maniobras de orientación durante la restitución).

En b) habría que distinguir aún más decididamente entre

- 1° desviaciones del recorrido de los rayos en la atmósfera con relación a un recorrido de los rayos calculado para la atmósfera normalizada,
- 2° desviaciones del recorrido de los rayos debido a la influencia de la capa de aire que se mueve a lo largo del cuerpo del avión.

Este último fenómeno puede considerablemente menguar la calidad y exactitud de fotos aéreas, particularmente cuando en aviones con un solo motor la cámara fotogramétrica está montada detrás del motor o incluso detrás del escape. Aquí puede sólo llamarse la atención a las publicaciones [14] y [19], sin dejar de expresar el deseo de que se continúen las investigaciones.

En cuanto a c), en adelante las posibilidades para compensar la componente sistemática de los errores por medio de elementos matemáticos o instrumentales convenientes, cobrarán cada vez mayor importancia. Es de esperar que con tales métodos las ventajas que poseen actualmente las cámaras con retícula, perderán su importancia.

Las futuras reflexiones y mediciones comprobatorias tendrán por tarea buscar no sólo los métodos de mayor exactitud, sino también aquéllos que puedan aplicarse sin mayores complicaciones para varios casos y que resulten económicamente razonables para alcanzar el objetivo del proyecto de levantamiento a realizar.

Resumen

De los datos de mediciones realizadas, que existen en cierta abundancia, se deducen funciones de exactitud para las "fuentes de errores" fotogramétricas — objetivo, aplanamiento de la película, exactitud de la película, copiado, comparador, restituidor análogo y ajuste de puntos — indicándose la suma de errores para algunos ejemplos concretos.

Bibliografía

- [1] F. ACKERMANN, La exactitud planimétrica alcanzable por compensación de bloques. Conferencia explicada durante las Semanas Fotogramétricas 1965.
- [2] M. AHREND, Zur Wahl des Schichtträgers bei Luftbildaufnahmen. DGK, Reihe C/23, Munich 1957 (94 páginas).
- [3] M. AHREND, Grandes aparatos fotogramétricos. REVISTA ZEISS No. 59, 1966, págs. 7—14.
- [4] W. A. BRUCKLACHER, Geräte zur Markierung natürlicher und zur Herstellung künstlicher Punkte bei der Bildvorbereitung von Aerotriangulationen. BuL 1961, págs. 15—20.
- [5] R. FÖRSTNER, Rapport sur les travaux et les résultats de la Commission C de l'OEEPE (1960—1964). Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen V/11; 1964, págs. 29—40.
- [6] E. GOTTHARDT, Bericht über die ersten Ergebnisse des Meßversuchs „Oberriet“ der Kommission C der OEEPE. Photogrammetria 1958/59, págs. 114—148.
- [7] H. HÄRRY, Die kontrollierten Versuchsmessungen „Oberriet“ der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie. Photogrammetria 1957/58, págs. 141—156.
- [8] B. HALLERT, Analytische Luftphotogrammetrie. Schweiz. Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie 1964, págs. 51—62.
- [9] B. HALLERT, L. OTTOSON y K. A. ÖHLIN, Fundamental Problems in Photogrammetry, Report on work performed during the period 1960—1964. Estocolmo 1964 (49 + 62 páginas).
- [10] S. A. HEMPENIUS, Physical investigations on pricked points used in aerial triangulation. Photogrammetria 1962/64, págs. 301—328.
- [11] F. HALWAX, Über Zusammenhänge zwischen Aufnahmetemperatur, Kammerkonstanten und systematischen Fehlern der inneren Orientierung. Photogrammetrie 1959/60, págs. 2—7.
- [12] H. G. JERIE, La exactitud altimétrica después de compensaciones de bloques de aerotriangulaciones con y sin el empleo de medios auxiliares. Conferencia explicada durante las Semanas Fotogramétricas 1965.
- [13] G. LEHMANN, Probemessungen am ZEISS-Präzisions-Stereokomparator. Zeitschr. f. Vermessungswesen 1960, págs. 473—478.
- [14] A. LEYONHUFVUD, On Photogrammetric Refraction. Photogrammetria 1952/53, págs. 93—113.
- [15] W. LÖSCHER, Überlegungen zur Wahl von Format und Bildwinkel für die Luftbildmessung. Tesis, Graz 1963, 41 páginas.
- [16] H.-K. MEIER, Untersuchungen zur Wahl des Bildwinkels und Bildformats von Luftbildkammern. BuL 1964, págs. 83—92.

- [17] S. G. MÖLLER, Report of the international controlled experiment Reichenbach 1962—1964. Nachr. aus dem Karten- und Vermessungswesen, V/10/1964, 31 páginas.
- [18] J. REUSS, Die Einstellgenauigkeit als Funktion der Helligkeitsunterschiede im Meßbild. Darmstadt 1960, 4 páginas.
- [19] H. H. SCHMIDT, A general analytical solution to the problem of photogrammetry. BRL Report 1065, 1959, 81 páginas.
- [20] K. SCHÜRER, Temperatur und Aufstellungseinflüsse beim Präzisions-Stereokomparator PSK von ZEISS. BuL 1964, págs. 166—173.
- [21] H. SCHMIDT-FALKENBERG, Zur Maßhaltigkeit und Kontrastwiedergabe von Cronar Commercial-S Film und Cronapaque Print Film. Nachr. aus dem Karten- und Vermessungswesen I/31, págs. 33—44.
- [22] A. STICKLER, Interpretation of the results of the OEEPE Commission C. Photogrammetria 1959/60, págs. 8—16.
- [23] J. VISSER, Tests on the precision of observing plate coordinates and parallaxes in a stereo-comparator. Photogrammetria 1962/64, págs. 297—300.
- [24] A. J. VAN DER WEELE, Propagation of errors in strip triangulation by means of mono- and stereocomparators. Photogrammetria 1962/64, págs. 411—418.
- [25] A. J. VAN DER WEELE, Report of Commission F, OEEPE. publicación núm. 1, 1964, págs. 47—50.
- [26] W. WUNDERLICH, Cronar in der großmaßstäblichen Auswertepaxis. BuL 1964, págs. 209—215.
- [27] W. WUNDERLICH, Zur Leistungssteigerung großmaßstäblicher Luftbildauswertungen. Wiss. Arbeiten der Institute für Geodäsie und Photogrammetrie der TH Hannover, 1961, 134 páginas.
- [28] ZEISS, Instrumentos para fotogrametría y fotointerpretación, 1965, 100 páginas.

(Recibido: 28 de Enero de 1966)

Dirección del autor: Dr.-Ing. M. AHREND, 7082 Oberkochen/Württ., CARL-ZEISS-Alemania.

Teoría y práctica del Ortoproyector GIGAS-ZEISS

por el Dr.-Ing. H.-K. MEIER, Oberkochen, Alemania

1. Introducción

Para la confección de mapas y planos y para actualizarlos, se aprovecha en nuestra época cada vez más la ortoproyección (véase, por ejemplo, [9]). Ahora bien, si se repasa la literatura técnica sobre este procedimiento, se encuentran referencias teóricas, históricas y técnicas sobre los instrumentos necesarios, pero pocos datos sobre su *rendimiento práctico, su exactitud, la superficie cubierta y la práctica del trabajo*: Este estudio quiere probar de cerrar esta laguna en cuanto al Ortoproyector GIGAS-ZEISS. Las experiencias prácticas, que constituyen la base de este artículo, se deben a pruebas hechas con el prototipo y a las observaciones recogidas con una primera serie de instrumentos y muy numerosas ortofotos.

Combinado con un estereorrestituidor, el Ortoproyector GZ-1 resuelve fotográficamente la tarea primordial de la fotogrametría, es decir, confecciona un ortofotoplano de perspectiva paralela por medio de fotos aéreas de perspectiva central. El modelo estereoscópico es reseguído en forma de meandros, ajustándose el Ortoproyector bajo la forma de un proyector adicional de tal manera que se elimina la influencia de los desniveles en la situación de los puntos con respecto al centro de la hendidura de exposición. Además, gracias a la reconstrucción análoga del recorrido de los rayos de toma, se suprimen rigurosamente en la proyección, la distorsión y la inclinación de la imagen.

Puede efectuarse la unión entre el estereorrestituidor y el Ortoproyector GZ-1 ó bien directamente o bien a través de un almacén análogo. Véanse los detalles en [1]. Parece sólo digno de mención que *ahora puede confeccionarse al mismo tiempo que el ortofotoplano, también un calco de hachuras (dropped lines)*. Durante el recorrido en meandros, se desplaza en forma sincrónica un segundo cabezal expositor, a través del cual se comunican señales a una emulsión fotográfica, cada vez que se rebasan valores altimétricos constantes (curvas de nivel). De esta manera, se origina simultáneamente con el ortofotoplano, el llamado calco de hachuras.

Los trabajos prácticos, en los cuales se basan las siguientes reflexiones, se realizaron en escalas comprendidas entre 1:2500 y 1:20000, precisamente en "acoplamiento directo". Siempre que no se diga expresamente otra cosa, las indicaciones se refieren a dicho modo

de funcionamiento. Más adelante habrá que hablar del aumento posible, ante todo, de la economía, si se utiliza un almacén de datos, lo mismo que sobre la confección y técnica de elaboración de las hachuras. Será necesario realizar primeramente largas series de pruebas antes de poder presentar material sólidamente fundado.

2. Exactitud planimétrica

2.1 Teoría

El análisis completo de los errores no puede limitarse a los errores del principio (error del sistema) en el cual se basa el ortoprojector, sino que ha de intentarse descubrir todas las fuentes de errores que puedan existir y manifestarse desde la foto aérea hasta la ortofoto. Fig. 1 resume todas las categorías de errores, sus causas y su efecto en el error medio de las coordenadas en la escala de la ortofoto.

Errores	Causa	Error de coordenadas	Error medio de coordenadas
1. Errores de la imagen	Foto aérea	}	$\pm 0,008 \cdot V$
2. Errores de proyección	Proyección GZ-1		
a) Óptico	Rugosidad u	$u \cdot \lg \alpha$	$\pm 0,1 \cdot \lg \alpha_M$
b) Mecánico	Anchura del diafragma b	$\Delta b \cdot \lg \alpha \cdot \lg \beta$	$\pm 0,3 \cdot b \cdot \lg \alpha_M \cdot \lg \beta_M$
3. Error de sistema	Tiempo de reacción C_f	$V \cdot \lg \alpha (\lg \beta \cdot v_B \cdot C_f + C_c')$	$\pm V \cdot \lg \alpha_M \cdot \sqrt{(\lg \beta_M \cdot v_B \cdot 0,16)^2 + (0,015)^2}$
4. Error de exploración	ΔZ (C8=GZ1)	$\Delta Z \cdot \lg \alpha$	$\pm 0,1 \cdot \lg \alpha_M$
5. Error de transmisión	Tamaño de la imagen B	}	$\pm 0,005 \cdot V \cdot B$
6. Deformación de la película			
			$\pm 0,114$

$b = 4 \text{ mm}$	$W W : f = 153 \text{ mm}$	$\beta_{M \text{ max}} = 20^\circ; \beta_M = 12^\circ (0,21)$	} Datos de la prueba realizada en Reichenbach
$V = 3 \times$	$B = 1,2 \text{ dm}$	$v_B = 1,7 \text{ mm/seg. } C_c = 0,1\% \text{**}$	
$\alpha_{M \text{ max}} = 30^\circ; \alpha_M = 18^\circ (0,32)$	$C_f = 0,16 \text{ seg}$	$C_c = \frac{1}{1000} \cdot C_c$	

Fig. 1 — Análisis de los errores del Ortoprojector GZ-1

Para poder presentar valores numéricos comparables, se ha apelado para la estimación a los datos del ensayo de restitución del campo de ensayos de Reichenbach [8].

Conclusiones:

- En terreno de condiciones medias ($\Delta H \cong 20\%$ de la altura de vuelo, pendientes 20—30%) habrá que contar en la ortofoto, en total, con errores medios de coordenadas de $\pm 0,1$ hasta $\pm 0,2 \text{ mm}$.

- b) La componente esencial de este valor se debe al mismo principio del instrumento (*error del sistema*) [3]. Sin embargo, le sigue de cerca la componente del llamado *error de exploración* que se debe al hecho de que durante el recorrido en meandros, el operador nunca es capaz de llevar el índice de medición con absoluta libertad de errores a lo largo de la superficie del terreno. Por lo que hace a las expresiones matemáticas utilizadas, consúltese el párrafo 3.
- c) La eficacia de las fuentes de errores principales crece con la tangente del ángulo de la imagen (α).

2.2 Práctica

2.2.1. Se tuvo una primera impresión de la exactitud interior del método comparando dos ortofotos independientemente obtenidas de una misma placa. La primera restitución se repitió al cabo de unos días, sobreponiéndose ésta como positiva en la mesa luminosa a la negativa confeccionada con anterioridad. Habiendo efectuado un centrado cuidadosísimo, las dos imágenes se extinguieron casi perfectamente, notándose sólo unas diferencias de una magnitud de pocas décimas de un milímetro.

2.2.2. Como las hojas del mapa de base Hennef West (LVA Nordrhein-Westfalen) y Waldmatt (LVA Baden-Württemberg, Oficina de Karlsruhe) ya existían como ortofotoplanos 1 : 5000 (escala de la imagen 1 : 12000), pudo procederse a su comparación con los mapas trazados previamente en un estereorrestituidor. La concordancia fué buena. Las desviaciones se mantenían en un margen de 0,1 a 0,2 mm, a la escala de mapa de 1 : 5000. El anexo de [1] ya daba una impresión de esta situación.

2.2.3. H. G. NEUBAUER [8] suministró los primeros datos numéricos de la exactitud, después de haber confeccionado y evaluado un total de cuatro ortofotos de la escala 1 : 3000 (escala de la imagen 1 : 8500) del campo de ensayos de Reichenbach. El análisis de los errores se basó en aproximadamente 60 puntos de control señalados y medidos en el terreno por cada ortofoto.

Puede resumirse el resultado, como sigue:

- a) El error medio de las coordenadas de $\pm 0,12$ mm (a la escala de la ortofoto) confirmó la magnitud teóricamente estimada. (Fig. 1)
- b) Cuando se estudian separadamente puntos en el centro (grupo 1) y en el borde (grupo 2) de las fajas de exploración, se obtienen errores medios de coordenadas de $\pm 0,11$ mm para el grupo 1 y de $\pm 0,14$ mm para el grupo 2.

La pequeña diferencia entre ambos grupos confirma la conclusión a que ya se había llegado teóricamente, de que no sólo surten efecto los errores debidos al principio de la ortoproyección, sino en primer lugar, *el error de exploración*.

2.2.4. Más recientemente, un estudio muy completo del problema ha sido realizado en ortofotos de las escalas 1:4000 y 1:10000 por el Rikets Allmänna Kartverk en Estocolmo [4]. Fig. 2 contiene detalles de la cantidad y de los tamaños de las ortofotos, los puntos de control y los errores residuales¹⁾.

Hoja del mapa	Escala del negativo	Escala del mapa	Tamaño del la hoja cm x cm	Cantidad de puntos de control	en el terreno		en el mapa		Error de escala %.
					S_x m	S_y m	S_x mm	S_y mm	
<u>Böringe</u>									
02/03	1:10 000	1:4.000	25 x 50	75	0.51	0.41	0.13	0.10	+ 2.3
03/04 19/3	1:10 000	1:4000	30 x 50	95	0.43	0.41	0.11	0.10	+ 5.0
03/04	1:10 000	1:4000	30 x 50	91	0.61	0.39	0.15	0.10	+ 4.9
<u>Liden</u>									
Gja 41/43	1:30 000	1:10 000	23 x 24	24	1.7	3.3	0.17	0.33	+0.1
Gja 43/45	1:30 000	1:10 000	22 x 37	36	1.6	1.0	0.16	0.10	+2.2
Ha 14/16	1:30 000	1:10 000	29 x 52	65	3.2	1.8	0.32	0.18	+1.9
Ha 16/18	1:30 000	1:10000	30 x 52	66	1.4	1.3	0.14	0.13	+3.8
Hab 43/45	1:30 000	1:10 000	26 x 49	58	1.7	2.3	0.17	0.23	-0.5
Hab 45/47	1:30 000	1:10 000	33 x 49	67	1.3	1.4	0.13	0.14	0.0

Fig. 2 — Estudio de la exactitud, realizado en ortofotos por el Rikets Allmänna Kartverk, Estocolmo (Suecia).

Resumen: Aquí también se confirma la magnitud teóricamente estimada de los errores residuales en ortofotos obtenidas con el GZ-1.

3. Velocidad de avance

La velocidad con que se resiguen los perfiles tiene importancia particular ya que de ella dependen la exactitud y la superficie cubierta,

¹⁾ He de agradecer sinceramente al RAK de Estocolmo la amable autorización de aprovechar los resultados obtenidos.

y este precisamente en sentido contrario. A medida que crece la velocidad aumenta la superficie cubierta, mientras que la exactitud descende, y vice versa. Esto plantea el problema de buscar las reglas sistemáticas que prevalecen aquí, con el fin de descubrir con su ayuda en cada caso la velocidad óptima como compromiso entre la exactitud y la superficie cubierta. Este compromiso tiene particular importancia en el "acoplamiento directo" por cuanto aquí no es posible variar la velocidad — como al trabajar con un almacén — sino que tiene que ser constante para el conjunto de un modelo.

3.1 Se comprende fácilmente la influencia en la superficie cubierta. Baste con hacer referencia aquí al párrafo 4, ante todo, a las figuras 5 y 6.

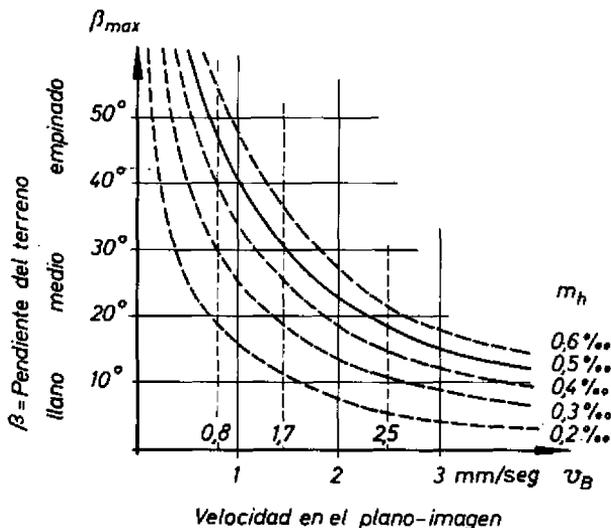
3.2. Para aclarar la influencia que tiene la velocidad de avance en la exactitud (exactitud planimétrica de la ortofoto, exactitud altimétrica del calco de hachuras) fué necesario determinar primeramente el llamado *error de exploración altimétrica*. Entiéndese por ello, directamente en el modelo estereoscópico, la diferencia de altura que se produce durante el recorrido en meandros entre el índice de medición y la superficie del terreno. Por medio de una disposición sencilla para ensayos se grabaron con ayuda del almacén análogo SG-1 perfiles de altura de terrenos con pendientes de grado distinto (trazados de perfiles). Para ello fué necesario recorrer primeramente cada perfil con mucha lentitud y cuidado y, a continuación, avanzando y retrocediendo, con cierta velocidad constante. De un trazado a otro fué aumentada, paso a paso, la velocidad hasta rebasar sensiblemente el límite de lo admisible. Como se había esperado, se observó que a medida que se aumentaba la velocidad, también crecía el error de exploración altimétrica, error que se podía medir con compases directamente en los trazados, tomando en consideración las pendientes homólogas del terreno. Se obtuvo una simple regularidad como resultado del análisis:

$$\Delta h = \tan \beta \cdot v_B \cdot C_t + C_c$$

siendo β = pendiente del terreno, v_B = velocidad de avance en el plano-imagen, C_c , C_t = constantes.

Tal como se esperaba, se observa que el operador necesita cierto tiempo ($C_t = 0,16$) para transformar la información estereoscópica visual en el correspondiente movimiento conductor. Finalmente, la componente constante de error C_c expresa el hecho conocido de que debe contarse con errores altimétricos ($C_c = 0,1^0/_{00}$), aún cuando el índice de medición quede estacionario ($v_B = 0$).

Al partir del error medio de exploración altimétrica se encontraron las relaciones expresadas en Fig. 3 para la distancia focal de la cámara granangular standard de 153 mm.



$$m_h (\%) = \pm \sqrt{\left(\frac{1000}{f} \cdot \tan \beta_M \cdot v_B \cdot C_t\right)^2 + C_c^2}$$

$$C_t = 0,16 \text{ seg}$$

$$C_c = 0,1\%$$

Fig. 3 — El error medio de exploración altimétrica como función de la pendiente del terreno y de la velocidad del avance del instrumento.

Ahora fué posible prestar especial atención a las *velocidades de avance* que habían sido notadas como *óptimas* para ciertas condiciones de terreno, en el curso de numerosos trabajos prácticos y antes de haber realizado el estudio descrito. Son 0,8 mm/seg. para terreno empinado, 1,7 mm/seg. para terreno medio y 2,5 mm/seg. para terreno llano. En los tres tipos de velocidad se encontró, de acuerdo con la pendiente que el terreno presentaba en cada caso, un error casi idéntico en la exploración altimétrica de $\pm 0,4\%$.

3.2.1 Los errores planimétricos originados por estos errores de exploración altimétrica pueden estimarse fácilmente porque dependen de la tangente del ángulo de la imagen. La expresión correspondiente figura en la fórmula que está reproducida en Fig. 1.

3.2.2. Con relación al error altimétrico puede hacerse una reflexión sobre la aplicación de la citada ley tangencial del error de exploración altimétrica a las condiciones del mapa fundamental alemán 1 : 5000. Después de haber introducido los parámetros correspondientes, se obtuvieron las medidas teóricas de la exactitud para los errores medios y máximos de la altura, que se comunican en Fig. 4.

Ortoproyector GZ-1

$$\Delta h_{max} (m) = h \cdot 3 \cdot c_c \cdot 10^{-3} + v_B \cdot m_b \cdot c_t \cdot 10^{-3} \tan \beta$$

$$\Delta h_{max} (m) = 0,7 \quad + 6 \tan \beta$$

$$m_h (m) \cong \pm(0,23 \quad + 3,5 \tan \beta)$$

$$f = 15 \text{ cm}$$

$$m_b = 15000$$

$$h = 2300 \text{ m}$$

$$C_c = 0,1\%$$

$$C_t = 0,16 \text{ seg}$$

$$v_{B(max)} = 25 \text{ mm/seg}$$

Mapa fundamental alemán 1 : 5000

$$\Delta h_{max} (m) = (10 \quad + 15 \tan \beta)$$

$$m_h (m) = \pm(0,4 \quad + 5 \tan \beta)$$

Fig. 4 — Exactitud altimétrica teórica del Ortoproyector GZ-1 a esperar para la escala 1 : 5000.

Si se comparan estas relaciones con los límites de error del mapa fundamental alemán, puede notarse que ambas medidas de errores corresponden a las exigencias. Debería, pues, esperarse que calcos de hachuras confeccionados con el Ortoproyector convendrían como base para la representación altimétrica en dicho mapa alemán. Desde luego, debe señalarse que las medidas de exactitud para el error altimétrico, que se han indicado, deben todavía afianzarse en estudios prácticos.

4. Rendimiento

Puesto que las indicaciones precedentes proporcionan datos seguros sobre la velocidad de avance, puede intentarse ahora estimar el rendimiento del método. Al igual que al analizar la exactitud, debe considerarse también aquí no sólo una parte del proceso, sino el conjunto.

4.1. Entenderemos bajo „tiempo de exploración“ el tiempo durante el cual el modelo es explorado en meandros, mientras que la ortofoto se imprime en la emulsión fotográfica. Fig. 5 representa gráficamente esta reflexión.

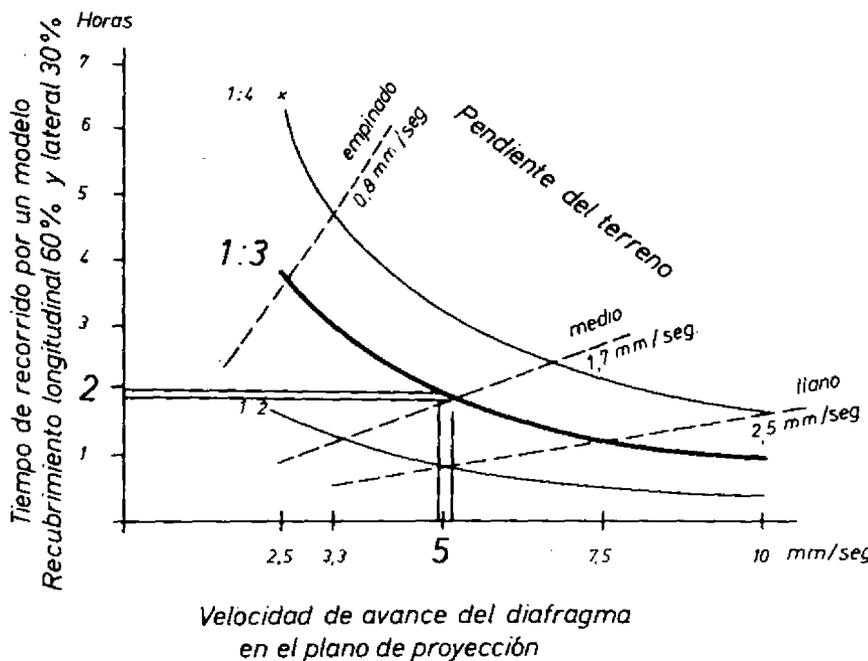


Fig. 5 — Velocidad de exploración y tiempo de recorrido por un modelo (distancia focal de toma = 153 mm, aumento 3 veces, anchura de diafragma = 4 mm)

Se hace la siguiente suposición:

- Se aprovechan fotos granangulares de una distancia focal de 153 mm
- Aumento aproximadamente tres veces con relación al alcance "z" del GZ-1 (350—620 mm).
- Velocidades de avance, como habían sido indicadas bajo 3.2 para los diferentes grados de pendiente en el terreno.
- Una anchura de diafragma de $b = 4$ mm, como ya estaba en la base del análisis de exactitud (Fig. 1).

Resulta que *debe contarse por cada modelo, según el tipo de terreno de que se trate, con tiempos de exploración comprendidos entre 1,5 y 4,5 horas.*

- Para determinar la totalidad del tiempo necesario para cada modelo, hay que añadir a lo antedicho aún el tiempo para la orientación,

los trabajos preparativos y correcciones finales, además de las pausas. Una vista de conjunto ofrece Fig. 6.

<u>Estereorrestituidor:</u>	Orientación relativa y absoluta	1 - 2 h
<u>Ortoproyector:</u>	Orientación con control de puntos y selección del alcance de restitución	0,5 - 1 h
	Colocación de la película, ajuste de la claridad, etc.	0,25 h
	Tiempo de recorrido	15 - 4,5 h
	Retirada de la película y control de los puntos	0,25 h
<hr/>		
	Tiempo de trabajo por modelo	35 - 8 h
	Interrupciones	0,5 - 1 h
<hr/>		
	Total	40 - 9 h

Fig. 6 — Estudio de tiempo para el Ortoproyector GZ-1

Esto viene a decir que *durante un día de trabajo de nueve horas pueden elaborarse en el Ortoproyector GZ-1 uno ó dos modelos.*

- 4.3. A raíz de lo dicho puede intentarse ahora una comparación con el rendimiento de la estereorrestitución. En el curso de los numerosos ensayos descritos, se procedió al registro esmerado de los tiempos necesarios para convertirlos a continuación en valores de superficie cubierta por hora de trabajo.

En los registros se incluye todo el tiempo de empleo del instrumento, inclusive la orientación y los intervalos para la confección simultánea de la ortofoto y del calco de hachuras.

En cambio, no fueron registrados los tiempos invertidos en preparar el material fotográfico, etc.

Los valores individuales, así determinados, se indican en Fig. 7. Podrían ser expresados, con algún derecho, en una recta compensadora y, gracias a ello, por la fórmula

$$L_{GZ1} = m_k^2 \cdot 2.5 \cdot 10^{-8}.$$

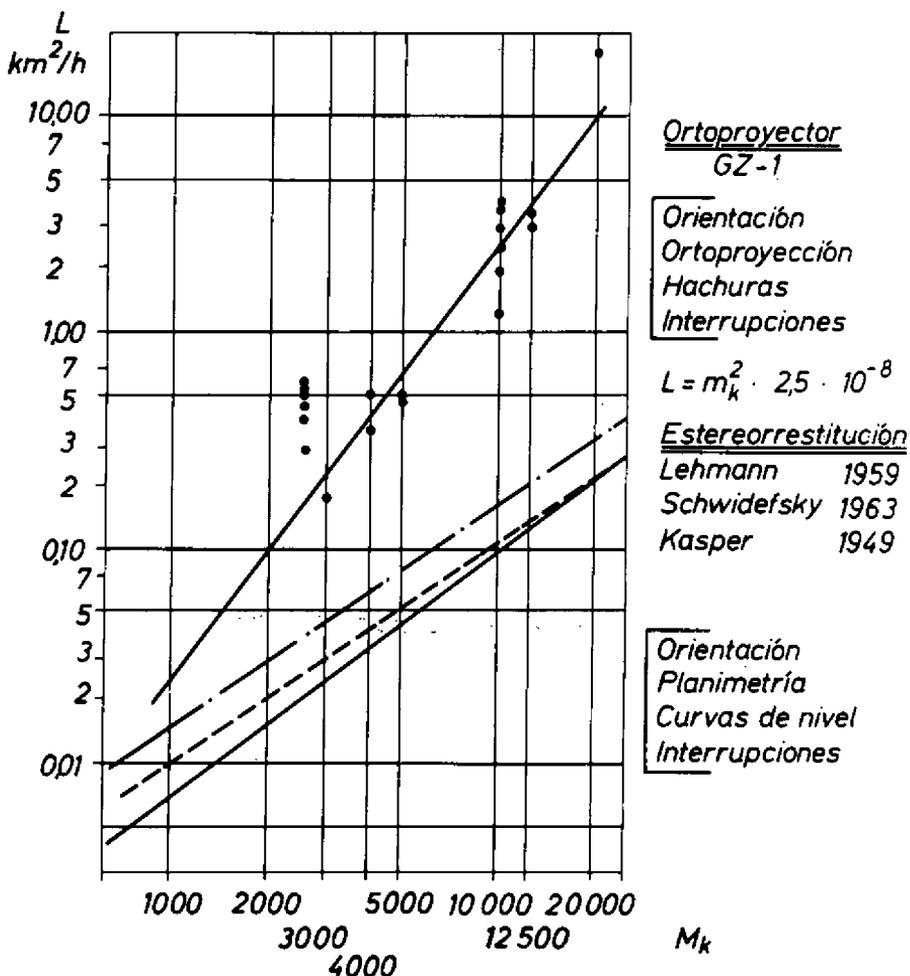


Fig. 7 — Comparación del rendimiento entre ortoproyección y estereorrestitución

Esta expresión puede enfrentarse con los valores de rendimiento usuales en estereorrestituciones (Fig. 7) [5], [6], [10].

También comprenden los tiempos de empleo del instrumento para la confección del mapa planimétrico y del dibujo de las curvas de nivel, inclusive el tiempo de orientación y las interrupciones. Tampoco se tienen en cuenta los preparativos.

Resulta que en escalas mayores la ventaja en tiempo del Ortoproyector es menor de lo que se esperaba, mientras que aumenta rápidamente a medida que se reduce la escala y, al final, cuando se trabaja en pequeñas escalas, alcanza valores notables.

En cuanto a esta comparación, cabe señalar todavía:

- a) Los valores de rendimiento para el Ortoproyector son valores determinados en la práctica, valores que sólo dependen de las pendientes del terreno (velocidad de avance) y no, de los detalles a representar (densidad de detalles).
- b) En los valores de rendimiento para la estereorrestitución se trata de valores medios que pueden fluctuar intensamente en función del contenido del mapa (densidad de detalles), p. ej. parajes desérticos, poblaciones.
- c) Queda enteramente independiente de la comparación realizada entre los tiempos invertidos, la cuestión de si la ortoproyección y la restitución o las curvas de nivel y las hachuras son magnitudes comparables. Este detalle no se discute aquí.

5. Calidad de la imagen

Aún cuando un experto pueda bastante bien juzgar la calidad de la imagen a primera vista, una descripción científica de la calidad ofrece grandes dificultades. Rebasaría el marco de este artículo el querer discutir este punto con todos sus detalles. Por otra parte, conviene no sólo dar el buen consejo de enjuiciar la calidad fotográfica de los ortofotoplanos existentes y llegar así a formarse una opinión sobre ellos, sino también algunos indicios de cómo se puede atacar este problema por medio de la función de la transmisión de contrastes.

Hay que hacer una distinción fundamental entre dos fenómenos, es decir, la disminución de la calidad de la imagen

1° provocada por el principio de la ortoproyección y

2° debida a errores instrumentales.

- 5.1. La influencia del *principio* en la calidad de la imagen resulta del hecho que en fotos aéreas de determinada calidad, para la orto-

proyección, ha de modificarse más o menos la escala, particularmente a causa de las pendientes del terreno. En cuanto a una expresión matemática, se hace referencia a [3].

- 5.2. Una disminución de la calidad de la imagen, *relacionada con el instrumento*, tiene por causa sencillamente el hecho de que no puede utilizarse un diafragma de iluminación infinitamente pequeño en la dirección del avance. Ahora bien, si el diafragma es de dimensión finita, es sólo posible ajustar la altura correcta con exactitud con referencia al centro del diafragma. La exposición tiene lugar en el límite anterior o posterior del diafragma, aún cuando los objetos todavía no se reproducen desde la altura correcta de proyección y, por lo tanto, no se encuentran en la debida posición. A ésta llegan sólo cuando hayan procedido al centro del diafragma. Se produce un desplazamiento de la imagen. Este puede describirse mediante la transmisión del contraste [7]. También aquí debe tenerse en cuenta el proceso total [2].

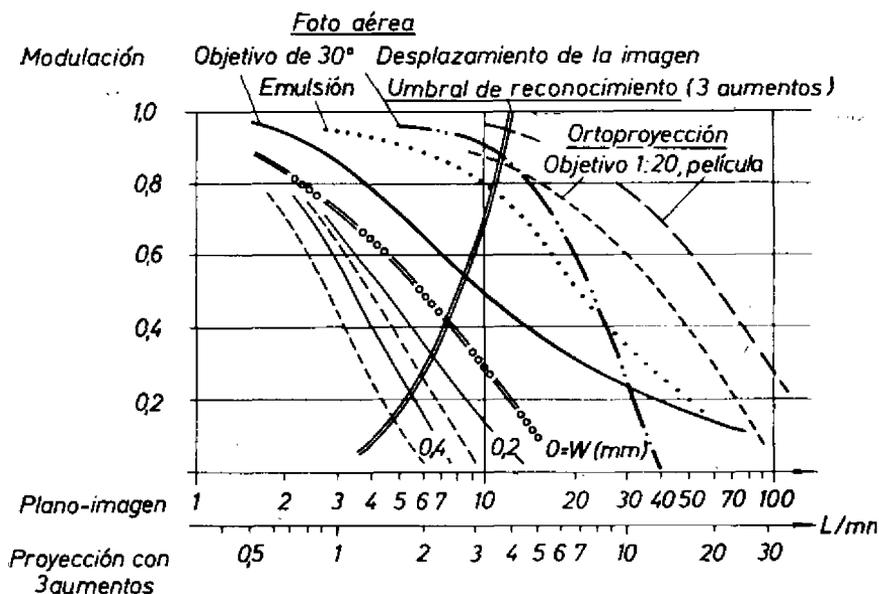


Fig. 8 — Transmisión de modulación foto aérea/ortofoto con influencia del desplazamiento de la imagen W

Las primeras influencias, al producirse la foto aérea, se deben al objetivo de toma, a la emulsión y al desplazamiento de la imagen (provocado por el movimiento del avión). No incluiremos en esta discusión el efecto de las influencias atmosféricas.

En la ortoproyección siguen en importancia la óptica del Ortoproyector y la emulsión fotográfica. Fig. 8 representa el resultado final de toda esta combinación. Además, se observa ahora un desplazamiento de la imagen debido al diafragma de anchura finita. Una estimación hace ver que podría tolerarse a lo sumo un desplazamiento de 0,4 mm aproximadamente.

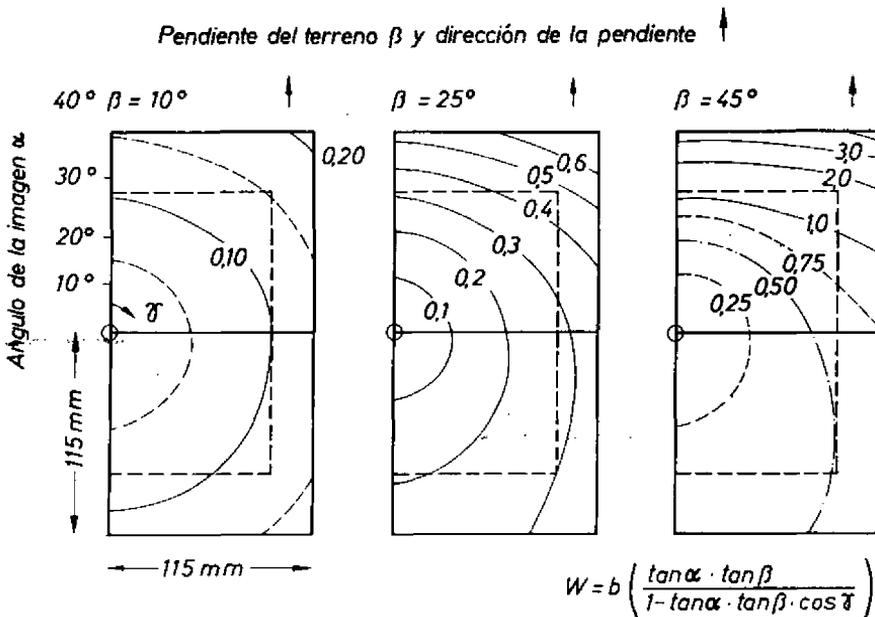


Fig. 9 — Curvas de idéntico desplazamiento de la imagen W en terreno llano, de pendiente uniforme (longitud del diafragma $l = 1$ mm; fotos granangulares de 153 mm de distancia focal)

¿Pues bien, cuándo habrá que contar con este desplazamiento en la ortoproyección? Fig. 9 representa el desplazamiento de la imagen en función del ángulo de la imagen y de la pendiente del terreno para un diafragma de 1 mm de largo. Para facilitar la comprensión, se parte de la base de terreno llano, de pendiente constante.

Se ve que en el alcance útil del modelo y una pendiente del terreno de $\beta = 25^\circ$ se agota precisamente la tolerancia arriba admitida. Si aumenta la pendiente del terreno, hay que recurrir a algún remedio. Una medida sencilla para contrarrestar este fenómeno consistiría en reducir la longitud del diafragma a 0,5 mm e, inclusive, a 0,25 mm. Otra posibilidad muy eficaz reside en la disminución del ángulo de la imagen, punto que tendrá que discutirse aún al hablar de la disposición fotográfica y de restitución.

6. El trabajo práctico

Lo mismo que cualquier otro método, la práctica del trabajo del Ortoprojector tiene sus propias leyes. Cada proceso utilizado hasta ahora para restituciones estereoscópicas ha de estudiarse y analizarse para saber si conviene aplicarlo también en la misma forma al Ortoprojector.

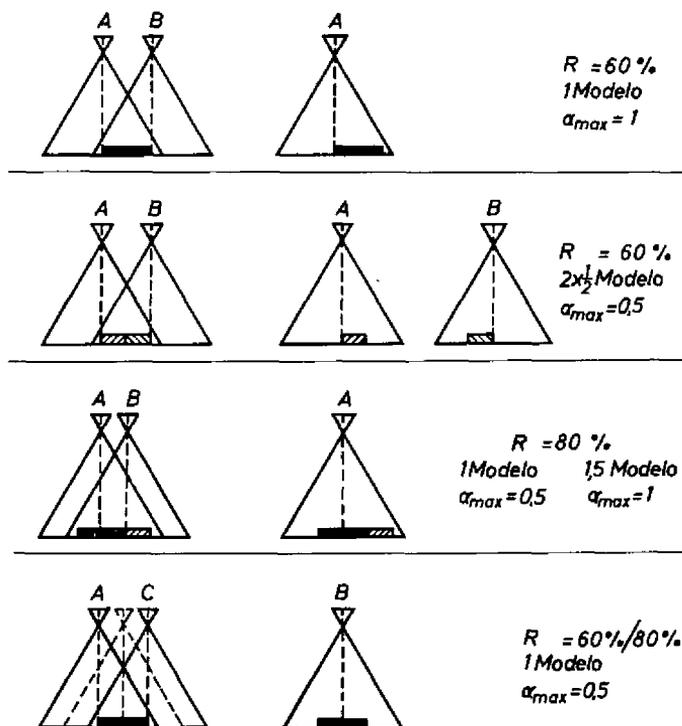


Fig. 10 — Disposición fotográfica y de restitución para el Ortoprojector GZ-1

6.1. El trabajo comienza con la decisión sobre *la disposición fotográfica y de restitución* a adoptar. Las reflexiones han llevado a la conclusión de que las fuentes más importantes de errores (error de sistema, error de exploración) intervienen en función de la tangente del ángulo de la imagen. Lo mismo puede decirse de la influencia que ejerce la longitud del diafragma sobre la calidad de la imagen. Mirándolo desde este punto de vista, el ángulo óptimo de la imagen es evidentemente pequeño. En Fig. 10 se intenta señalar las posibilidades que permiten mantener pequeño el ángulo de la imagen, sin poner en peligro la economía del procedimiento.

En el lado izquierdo se esboza la combinación de fotos en el estereorrestituidor y, en el centro, la ortoproyección. Se han indicado los límites del modelo y de la ortofoto. Como cada sector del terreno aparece por lo menos en dos fotos aéreas, si el recubrimiento es de un 60% o más, se ofrecen también mínimo dos posibilidades para la ortoproyección. Por ejemplo, en el caso 2, en fotos con un recubrimiento del 60%, se puede proyectar una mitad del modelo de la imagen A y la segunda, de la imagen B. Con esta disposición, se reduce el ángulo de la imagen necesario a la mitad, lo que significa también que todos los errores esenciales quedan reducidos a un valor inferior a la mitad de aquél inicial. Condiciones particularmente favorables se obtienen finalmente con un recubrimiento del 80% y ortoproyección de la correspondiente foto intermedia. Se notará que esta es *una ventaja del Ortoprojector independiente del estereorrestituidor*. El tiempo necesario para determinar los datos suplementarios para la orientación llegará a $\frac{1}{2}$ hora aproximadamente, lo que no parece excesivo.

6.2. *Orientación*. Las orientaciones relativa y absoluta del modelo estereoscópico se realizan de la manera acostumbrada en el restituidor. También para la orientación subsiguiente del Ortoprojector se aplican los métodos acostumbrados para la orientación, pudiéndose distinguir entonces entre la orientación basada en los datos de ajuste y la que se apoya en el empalme de fotos consecutivas (Fig. 11). La orientación según los datos de ajuste se empleará siempre que existan estos datos como consecuencia de una orientación precedente en el estereorrestituidor. En tal caso, sólo es necesario aprovecharlos para el Ortoprojector y acoplar este último con el restituidor, en lo posible en el punto nadiral. Sin embargo, es aconsejable buscar detalles perfectamente visibles y cerciorarse de que aparecen en el Ortoprojector reproducidos en el centro del diafragma de exposición. En el primer punto de control es ventajoso efectuar las últimas correcciones de precisión para z y x .

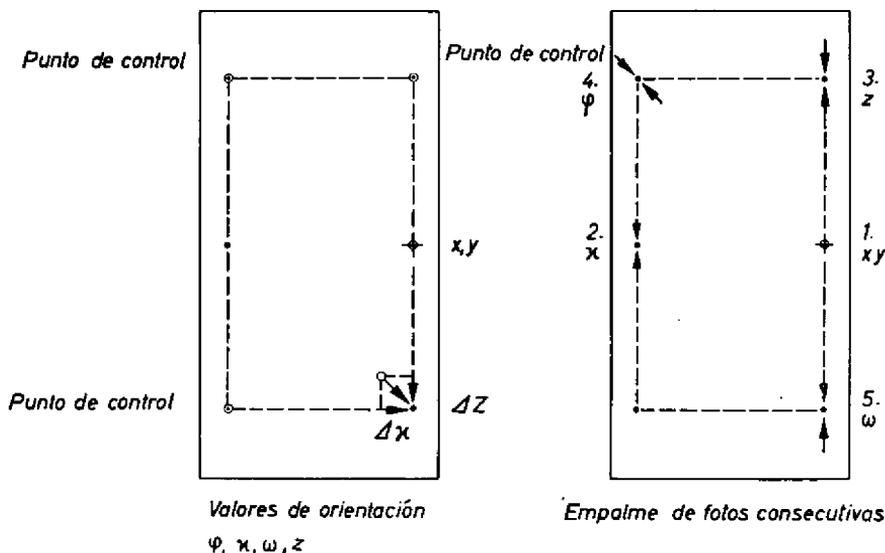


Fig. 11 — Orientación y posibilidades de control en el Ortoprooyector GZ-1 (directamente acoplado)

Habrá que aprovechar bajo todas las condiciones la posibilidad de hacer una comparación entre el modelo estereoscópico y la ortoproyección. Permite evaluar con seguridad la exactitud final, antes de comenzar la restitución, evitándose gracias a ello las restituciones erróneas. En cuanto a la orientación basada en el empalme de fotos consecutivas, ésta se utilizará siempre cuando se haya colocado una foto en el Ortoprooyector, la cual no pertenece al par estereoscópico del restituidor (por ejemplo, una foto intermedia de una serie con recubrimiento del 80%) y cuando tendría que renunciarse a la orientación previa en el restituidor. El empalme de las fotos consecutivas se realiza de manera acostumbrada, teniendo presente que es apetezible una exactitud de sólo 0,1 mm aproximadamente.

En todo caso, al efectuar la orientación ha de considerarse, para no cometer ninguna equivocación en los signos de los elementos de ajuste, si se emplea en el estereorrestituidor y en el Ortoprooyector material fotográfico idéntico (diapositiva/diapositiva; negativa/negativa) o no idéntico (diapositiva/negativa; negativa/diapositiva). En un principio, se admiten todas las combinaciones y la selección se efectuará para el Ortoprooyector de acuerdo con puntos de vista de la reproducción ulterior.

- 6.3. Después de acabar la orientación, se prepara el instrumento para el recorrido en meandros, ante todo, colocando el material fotográfico. En vista de diferentes ventajas que ofrece (estabilidad dimensional, obtención de copias por contacto) es aconsejable utilizar película. Puede medirse la intensidad luminosa en la mesa de proyección y regular convenientemente la claridad de la lámpara.

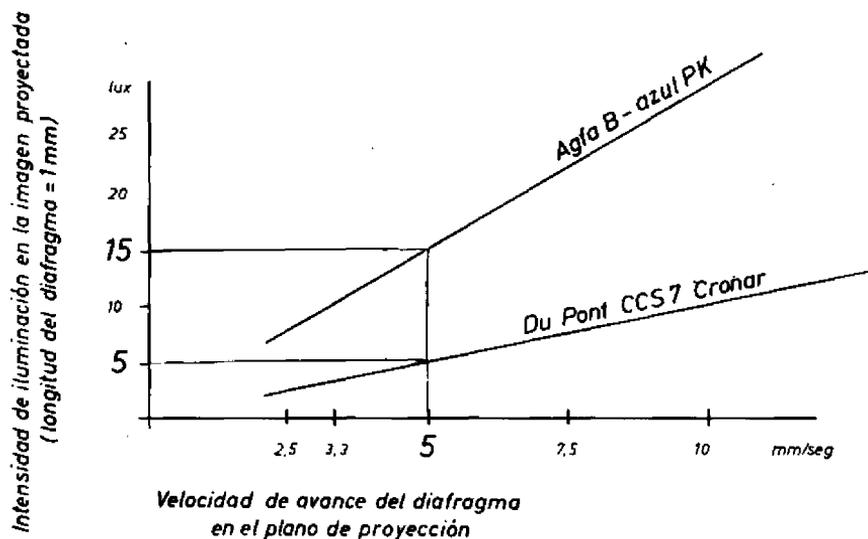


Fig. 12 — Intensidad de iluminación de la ortoproyección en función de la velocidad del diafragma y de la sensibilidad de la emulsión. Un ajuste esmerado suprime fallos fotográficos.

- 6.4. *Recorrido en meandros.* Como se sabe, en la actualidad no se utiliza ningún correlador de imágenes en el Ortoprojector GZ-1 como observador automático. Esto obliga a que un operador reajuste constantemente durante el recorrido en meandros la altura del índice de medición de modo que apenas toque el terreno. Bastantes opiniones han sido expresadas sobre si es o no es lícito obligar al operador a que haga este trabajo. *La práctica, empero, muestra que se adquiere muy pronto una rutina notable*, después de un periodo de pruebas, que tampoco falta en cualquier otra actividad. Al observar el primer perfil, la velocidad parece excesiva, pero no tarda en adquirirse la habilidad. La experiencia demuestra que *un operador experimentado alcanza velocidades cumbre al cabo de dos o tres modelos de prueba.*

Cítense aquí algunos detalles relativos a la práctica de la exploración:

- a) No debe observarse fijamente el índice de medición. El operador avisado lo avanza siempre con la mirada. Hay aquí cierto paralelismo con el manejo del volante de un automóvil.
- b) No debe reseguirse cada pequeña desigualdad del suelo (por ejemplo, una zanja), sino tenerse presente que el diafragma de hendidura tiene cierta extensión y que sólo se exige un ajuste altimétrico medio.
- c) Regiones edificadas y bosques se exploran en lo posible guardando contacto con el suelo. Esto se hace difícil en regiones densamente cubiertas de árboles. El operador apelará a su experiencia y ajustará la altura convenientemente.
- d) Habrá que hacer todo lo posible para facilitar el trabajo del operador. Ante todo, se ajustarán adecuadamente en el restituidor la altura del asiento, la luminosidad de la imagen y del índice de medición, lo mismo que la forma y el tamaño de este último, además del sentido de rotación de la manivela "z". La sala será perfectamente ventilada; además, puede permitirse música de radio.

En una medida mayor aún que en la estereorrestitución pueden comprobarse los resultados obtenidos con la ortoproyección. La perfección y el esmero de la exploración alimétrica lo revela la existencia de saltos irregulares entre fajas adyacentes, sobre todo en el curso de carreteras, caminos lindes, etc.

- 6.5. Habiéndose acabado el recorrido en meandros, se retira la película expuesta para *elaborarla fotográficamente*. Parece útil recomendar que se proceda a un repetido control de los puntos. Este cuesta poco tiempo y es riguroso, mientras se conserva la misma orientación que luego se modifica para la próxima restitución.

7. Conclusión

En las consideraciones presentadas aquí se ha intentado formular ciertos indicios sobre la exactitud y el rendimiento del Ortoprojector GZ-1. Los datos citados resultan de gran número de restituciones prácticas. A pesar de ello puede objetarse que su base estadística aún no es lo suficientemente sólida. Esta objeción será justificada, pero hay que señalar que la introducción de una nueva técnica siempre provoca pronósticos, naturalmente a raíz de ensayos cuidadosamente preparados. Cabe esperar que los datos presentados aquí sean confirmados por los ulteriores resultados estadísticos.

Anexo:

Habiéndose concluido la serie de ensayos en curso, se informará sobre las experiencias prácticas obtenidas en la confección y elaboración de calcos de hachuras. Sin embargo, para caracterizar esta técnica, ya se presenta aquí en Fig. 13 una sección de un calco de hachuras, confeccionado con el Ortoprojector GZ-1.

Bibliografía

- [1] AHREND, BRUCKLACHER, MEIER, UTZ „Der Orthoprojektör GIGAS-ZEISS“ Bildmessung und Luftbildwesen, cuaderno 3, 1964, págs. 153—160 (con numerosos datos bibliográficos).
- [2] HEMPENIUS, S. A. “Aspects of Photographic Systems Engineering”. Applied Optics 3/1, enero 1964, págs. 45—53.
- [3] JOCHMANN, H. „Abbildungsfehler der Differentialentzerrung“. Conferencia explicada durante las Semanas Fotogramétricas, Karlsruhe 1965, Bildmessung und Luftbildwesen, cuaderno 4, 1965, págs. 167—172.
- [4] JONASSON, F. „Die ökonomische Karte 1:10 000 von Schweden, ihre Technologe, kartographische Gestaltung und Genauigkeit“. Conferencia explicada durante las Semanas Fotogramétricas, Karlsruhe 1965, Bildmessung und Luftbildwesen, cuaderno 4, 1965, págs. 157—166.
- [5] KASPER, H. „Die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Präzisionsauswertegeräte für die Luftbildmessung“. Photogrammetria 1949/50, págs. 73—76.
- [6] LEHMANN, G. „Photogrammetrie, Berlín 1959, págs. 169—170.
- [7] MEIER, H.-K. „Diskussion der Bewegungsunschärfe“. Bildmessung und Luftbildwesen, cuaderno 2, 1960, págs. 65—77.
- [8] NEUBAUER, H. G. „Über die Genauigkeit von Orthophotoplänen“. Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt, 1964.
- [9] SCHLAGER, C. W. y COULTHART, D. E. “Photomapping Techniques and Procedures — Past, Present, and Future“. Conferencia explicada durante las Semanas Fotogramétricas, Karlsruhe 1965.
- [10] SCHWIDEFESKY, K. „Grundriß der Photogrammetrie“. 6ª edición, Stuttgart 1963, pág. 342.

(Recibido: 10 de Diciembre de 1965)

Dirección del autor: Dr.-Ing. H.-K. MEIER, CARL ZEISS, 7082 Oberkochen/Württ., Alemania



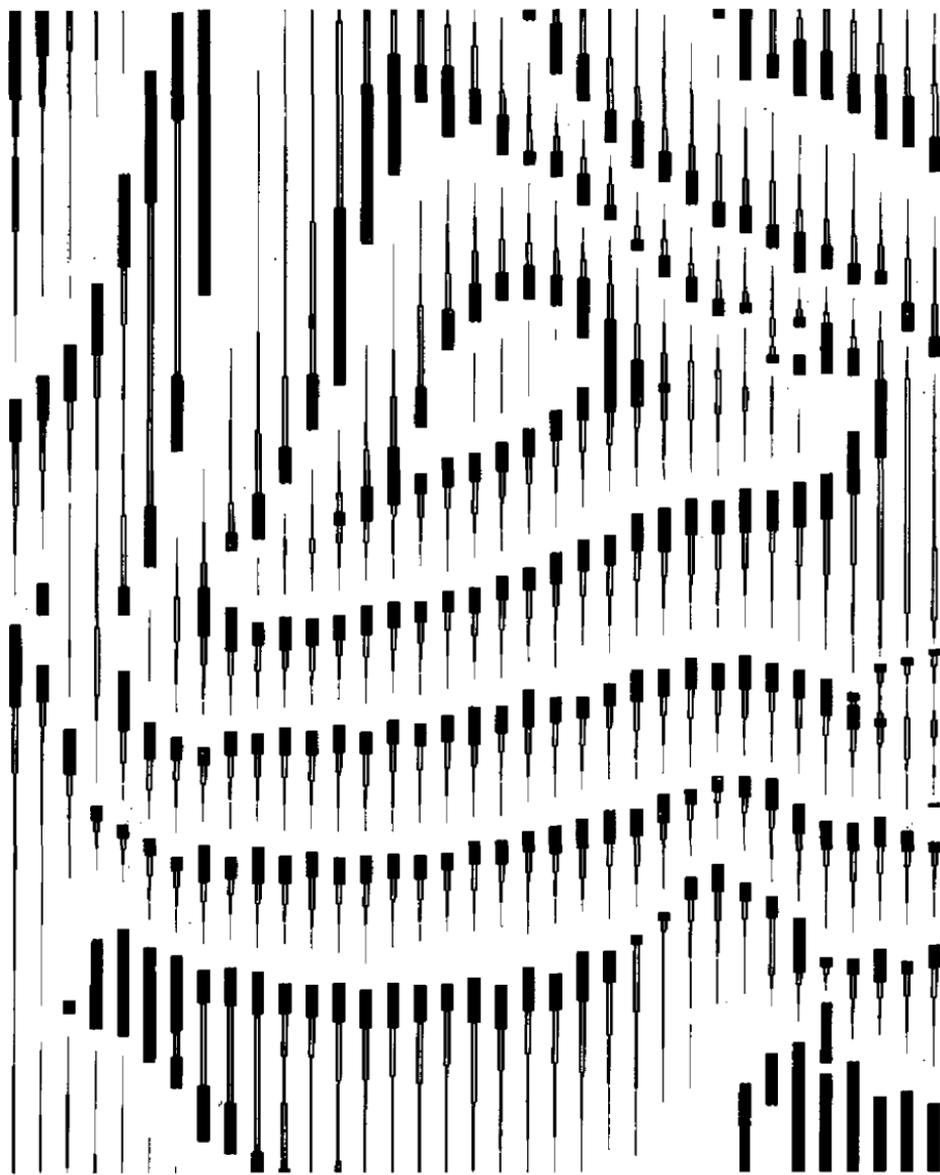


Fig. 13 — Detalle de un calco de hachuras, confeccionado con el Ortoproyector GIGAS-ZEISS. Escala original 1 : 5000; intervalo altimétrico 5 m; intervalo de perfil 4 mm. Tamaño de todo el calco de hachuras 45 × 26 cm².

