

## **Elaboración de cartas aeronáuticas OACI: planos de obstáculos de aeródromo, a partir de imágenes aéreas digitales de pequeño formato**

Recibido: 11 de octubre de 2011. Aceptado en versión final: 21 de febrero de 2012.

Jorge Prado Molina\*

José Antonio Quintero Pérez\*

Ana Rosa Rosales Tapia\*

Armando Peralta Higuera\*

Miguel Ángel Ramírez Beltrán\*

Moisés Zamora Jiménez\*

**Resumen.** Las cartas aeronáuticas y los planos de obstáculos de aeródromo proporcionan información sobre las obstrucciones alrededor del aeropuerto, para que el controlador aéreo y los pilotos cumplan con los procedimientos y limitaciones de su utilización. La seguridad en aviación exige la producción de cartas aeronáuticas actualizadas y precisas, adoptando los estándares de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). En este artículo se describe la metodología utilizada para generar los planos de obstáculos de cinco aeródromos en México, a partir de imágenes aéreas digitales, obtenidas con cámaras de formato pequeño. A través de dos levantamientos aéreos en cada aeropuerto, a 10 000 y 5 000 pies de altura sobre el nivel del terreno, se generaron dos ortomosaicos cubriendo la zona de influencia de la terminal aérea, el aeródromo y las superficies de aproximación, de ascenso en el despegue, de transición, horizontal interna y cónica. A través de la fotointerpretación

de estéreopares se identificó la mayoría de los obstáculos, y con los ortomosaicos se generaron los planos de aeródromo y de obstáculos de aeródromo tipos A, B y C. Mediante receptores satelitales geodésicos se obtuvieron 18 puntos en cada pista, para obtener sus dimensiones y establecer puntos de control terrestre para la formación de los ortomosaicos. A través de detallado trabajo de campo se comprobó la localización y altura de los obstáculos y, finalmente, después de varios procedimientos de revisión por las autoridades aeronáuticas, se concluyó la generación de las cartas OACI al integrar todos los mapas de los aeropuertos, en un sistema de información geográfica (SIG).

**Palabras clave:** Cartas aeronáuticas OACI, planos de obstáculos de aeródromo, cámaras de pequeño formato, mosaicos ortorectificados, superficies limitadoras de obstáculos.

## **ICAO Aeronautical chart production: aerodrome obstruction charts from small-format aerial digital imagery**

**Abstract.** Aeronautical charts and aerodrome obstruction charts, provide information about obstacles around the airport, so pilots and air traffic controllers can comply with the procedures and limitations of its utilization. Safety in

aviation demands updated and precise aeronautical charts production, adopting the standards of the International Civil Aviation Organization (ICAO). In this paper the methodology employed to generate obstruction charts for

---

\*Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE), Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Coyoacán, 04510, México, D.F. E-mails: jprado@igg.unam.mx, quintero@igg.unam.mx, anarosa@igg.unam.mx, aperalta@igg.unam.mx, miguel@igg.unam.mx, moiseszj@hotmail.com

five airports in Mexico, using aerial digital imagery obtained with small-format cameras, is described.

Through two aerial surveys on each airport, from 10 000 and 5 000 feet above ground level, two orthomosaics were generated covering the airport influence area, the runway, and the obstacle limitation surfaces: approach/Take-off climb, transitional, inner horizontal, and conical. Using stereopair photointerpretation most of the obstacles were identified, and by means of the orthomosaics; aerodrome charts, and aerodrome obstruction charts types A, B and C, were generated.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento desmedido de las ciudades en ocasiones puede provocar que la seguridad de la operación aeroportuaria se vea rebasada. Para evitar esta situación, es indispensable mantener un monitoreo constante de los obstáculos que se encuentran en las trayectorias de aproximación y despegue, y en los alrededores de los aeropuertos. Un obstáculo es definido por la OACI como: “todo objeto fijo (ya sea temporal o permanente) o móvil, o partes del mismo, que esté situado en un área destinada al movimiento de las aeronaves en la superficie o que sobresalga de una superficie definida, destinada a proteger a las aeronaves en vuelo” (OACI anexo 14, 2004). Debido a esto, es necesario implementar una estrategia que permita actualizar de una manera rápida y confiable los cambios que ocurren, ya que en la mayoría de los casos es difícil mantener un límite territorial entre el aeropuerto y la ciudad. Es muy importante que las aeronaves no se encuentren en riesgo de colisión debido a la presencia de construcciones, árboles, anuncios, antenas, postes de luz, etc., que no cumplen con las restricciones de altura, y que se ubican dentro de las superficies de seguridad del aeropuerto.

Por lo anterior, se hace indispensable llevar a cabo una actualización periódica de los planos de obstáculos de aeródromo para mantener la seguridad en las operaciones aéreas. La OACI es la entidad encargada de establecer las directrices de operación de las aeronaves y de normar los contenidos de las cartas de navegación aérea. Todos los países afiliados a dicha organización deben cumplir con las especificaciones que ella establece, ya que es crucial contar con mapas estandarizados; porque la

Using satellite geodetic receivers, 18 points were surveyed on each runway in order to obtain its dimensions, and to establish ground control points for mosaics generation. Throughout detailed field work, height and location of the obstacles were verified, and finally, after several reviewing processes by aeronautical authorities, generation of ICAO charts was concluded when all airport maps were integrated in a Geographical Information System.

**Key words:** ICAO Aeronautical charts, aerodrome obstruction charts, small-format cameras, orthorectified mosaics, obstacle limitation surfaces.

eficiencia y la seguridad de un aeropuerto pueden verse afectadas si no se cuenta con información consistente (OACI documento 9881, 2007). Si bien es cierto que cada país tiene sus propios reglamentos aeronáuticos, es importante seguir las disposiciones de la OACI para evitar conflictos operativos y posibles accidentes. México no es la excepción y tiene leyes y normatividades referentes al uso de las vías generales de comunicación, y en particular de los aeropuertos; no obstante, en los ejemplos aquí mostrados sobre la elaboración de planos de obstáculos de aeródromo, solamente se siguieron y aplicaron estrictamente las normas establecidas por la OACI. Sin una estandarización global en las cartas aeronáuticas, sería difícil para los pilotos y otros usuarios encontrar e interpretar de una manera eficaz la información crucial para la navegación (ICAO Annex 4, 2006). Adicionalmente, es importante contar con planos y cartas en formato electrónico de alta calidad debido al incremento de las operaciones aéreas, que cada vez hacen un mayor uso de estos insumos, tanto en la torre de control, como en el mismo tablero de mando de las propias aeronaves. Además, la OACI estableció la enmienda 52 al anexo 4 en 2001 (OACI documento A35-WP/59, 2004), donde se introduce el concepto de cartas aeronáuticas electrónicas, con el fin de proveer a las tripulaciones de información oportuna y conveniente sobre su posición con respecto a las áreas que se sobrevuelan, al aeropuerto y, sobre todo, conocer la posición exacta de los obstáculos, todo en formato digital. Las áreas de cobertura de terreno y de obstáculos de aeródromo que deben ser cubiertos con mapas electrónicos son: 1. El territorio completo del estado, 2. El área de control de la terminal aérea, que

abarca una superficie dentro de un radio de 45 km a partir del Punto de Referencia de Aeródromo (ARP: *Airport Reference Point*), 3. El terreno comprendido en un radio de 15 km desde el ARP, y que incluye el aeródromo/heliuerto y, 4. Las superficies de aproximación y despegue que se extienden a 15 km desde las cabeceras de la pista (ESRI White Paper, 2009; OACI documento 9881, 2007; ESRI aeronautical solution, 2011). Con excepción del área uno (el territorio del estado), en este artículo se describe la metodología empleada para la generación de los planos de aeródromo y de obstáculos de aeródromo tipos A, B y C para cinco aeropuertos de México: Campeche (CPE), Chetumal (CTM), Ciudad Obregón (CEN), Guaymas (GYM) y Nuevo Laredo (NLD), siguiendo las especificaciones de la OACI, señaladas en el Convenio sobre Aviación Civil Internacional en los anexos 4 (ICAO Annex 4, 2006) y 14 (OACI anexo 14, 2004).

Cabe mencionar que algunos de los procedimientos de producción de mapas de obstáculos de aeródromo utilizan un LIDAR para generar un modelo tridimensional del terreno, complementando estos datos con fotografías aéreas e imágenes de satélite, para determinar cuáles de las obstrucciones representan un problema, al encontrarse dentro de las superficies limitadoras de obstáculos (Uddin y Al-Turk, 2002; Uddin *et al.*, 2011), sin embargo, estas técnicas representan costos considerables de recursos económicos y tiempo, al tener que procesar las masivas nubes de puntos del sistema LIDAR, aunque tienen la ventaja de entregar una precisión de 20 cm en horizontal y de 10 cm en vertical. Por otra parte, existen métodos muy novedosos que utilizan técnicas interferométricas con radares localizados en plataformas espaciales, fusionando esta información con imágenes de satélite de alta resolución (Fernández y Monteiro, 2011), sin embargo, la precisión lograda con este sistema es del orden de 3 a 10 m en vertical, lo que implica que solamente se puede utilizar en las zonas 1 y 2, por lo que los mapas de aeródromo quedan excluidos. En el trabajo aquí presentado se utilizaron técnicas fotogramétricas con imágenes aéreas digitales obtenidas con cámaras de pequeño formato, como se explica más adelante.

### **Planos de aeródromo y de obstáculos de aeródromo tipos A, B y C**

El plano de aeródromo permite que el piloto identifique las coordenadas geográficas y la longitud de la pista, así como otros detalles importantes de la misma, con el fin de que pueda abandonarla inmediatamente después del aterrizaje, siguiendo las calles de rodaje para dirigirse a la zona de desembarco. Los planos de obstáculos de aeródromo tipos A, B y C proveen la altura y ubicación de las obstrucciones alrededor del aeródromo. En esta sección se describen sus características más importantes y en la parte final de este trabajo se da un ejemplo de cada uno de ellos. La información completa que deben incluir se encuentra en el anexo 4 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional de la OACI (ICAO Annex 4, 2006) y los errores máximos permitidos en estos mapas se encuentran descritos en la tabla 2.6 de la *Guía para la Elaboración de Mapas Electrónicos del Terreno, de Aeródromo y de Obstáculos de Aeródromo* (OACI documento 9881, 2007).

**Plano de aeródromo.** En él se indica la localización del ARP, las coordenadas geográficas de ambas cabeceras y las dimensiones y dureza del material de construcción de la pista. Se incluye información de las frecuencias de radio y ayudas visuales, los edificios y las áreas de estacionamiento y otras instalaciones. Cualquier punto u objeto localizado dentro del aeródromo debe tener un error máximo de 0.5 m en horizontal ( $X$ ,  $Y$ ) y vertical ( $Z$ ).

**Plano de Obstáculos Tipo A.** Incluye la pista y las superficies de aproximación y despegue, con vistas en planta y de perfil, indicando con precisión de 0.5 m en  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  la ubicación de los obstáculos que sobrepasan los límites de altura permitidos en dichas superficies.

**Plano de Obstáculos Tipo B.** Incluye la pista, las superficies de aproximación y despegue, al igual que las de transición, horizontal interna y cónica, abarcando un radio de 15 km desde el ARP. En él se muestran la topografía, los obstáculos, cuerpos de agua, poblados y carreteras. La precisión de este mapa debe ser menor o igual a 2.5 m en  $X$ ,  $Y$  y de 1 m en  $Z$ .

**Plano de Obstáculos Tipo C.** Este plano incluye la zona de control de la terminal aérea,

esto es, una superficie circular con un radio de 45 km, medido desde el ARP. Incluye los obstáculos, el sombreado de alturas topográficas, carreteras, poblados, ríos y cuerpos de agua. El error máximo permitido en este mapa es de 5 m en horizontal y de 3 m en vertical.

### Método propuesto

Se propone llevar a cabo los siguientes pasos para obtener los planos de aeródromo:

1. Recopilar la cartografía existente: Cartas y ortofotos de INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México).
2. Efectuar la corrección topológica de las cartas de: curvas de nivel, carreteras, mancha urbana e hidrografía.
3. Planeación y ejecución de los levantamientos aéreos a dos alturas diferentes: uno a 10 000 pies para cubrir el área de influencia del aeropuerto y el otro a 5 000 pies para tener detalle suficiente sobre el aeródromo y las superficies de transición, aproximación y despegue.
4. A partir de los estéreopares hacer la fotointerpretación de los obstáculos en las áreas 2, 3 y 4 y generar las bases de datos de obstáculos.
5. Llevar a cabo campañas de obtención de puntos de control geodésico dentro de la pista de cada aeropuerto y hacer un barrido con binoculares

desde las cabeceras para comprobar la lista de obstáculos.

6. Generar los dos ortomosaicos de cada aeropuerto.
7. Integrar datos de topografía y de bases de datos de obstáculos para elaborar los planos de aeródromo y de obstáculos de aeródromo tipos A, B y C.
8. Enviar los planos a una primera revisión.
9. Comprobar en campo las alturas de los obstáculos, buscar posibles omisiones y actualizar las bases de datos de obstáculos.
10. Revisar nuevamente los planos de obstáculos e integrarlos en un SIG.
11. Corregir los mapas, cruzar las pendientes de las superficies limitadoras de obstáculos con las obstrucciones e integrar aquellos elementos que fueron omitidos.
12. Revisión final de los mapas.

### Superficies limitadoras de obstáculos

Definen el espacio aéreo que debe mantenerse libre de cualquier obstrucción en el aeródromo y su entorno, para efectuar las operaciones de aproximación, aterrizaje y despegue de manera segura (ASA, 2012). Están divididas en superficies de aproximación, de ascenso en el despegue, de transición, horizontal interna y cónica (Figura 1).

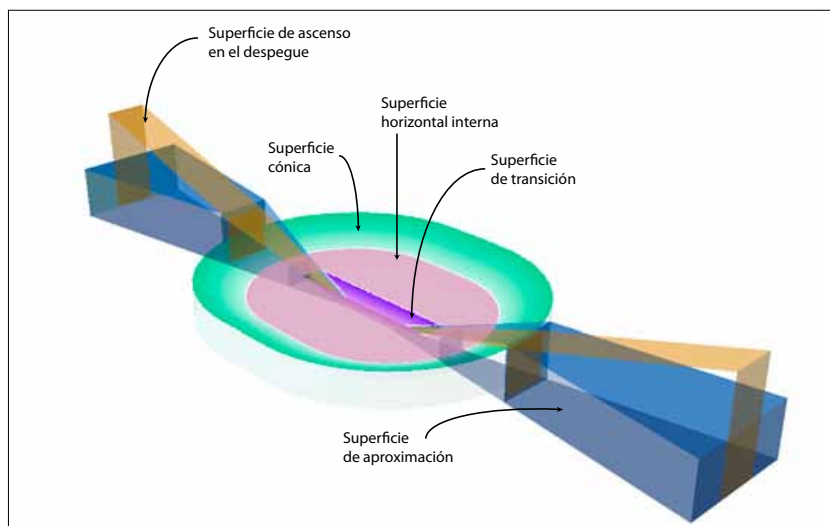


Figura 1. Superficies limitadoras de obstáculos consideradas para la elaboración de los mapas de aeródromo y de obstáculos de aeródromo.



### Superficies de aproximación y de ascenso

Como ambas cabeceras de la pista se utilizan para despegar o aterrizar, es necesario considerar que estas superficies se intercambian dependiendo de la maniobra en curso. La superficie de aproximación tiene una longitud de 15 km y una amplitud que va de los 4 500 m en su punto más distante, hasta los 300 m en la porción localizada en la cabecera de la pista (Figura 2). Esta superficie limitadora, en particular, se divide en tres secciones, la última de ellas (la más lejana a la pista) tiene una longitud de 8 400 m, sin presentar pendiente alguna, teniendo una altura de 150 m. La segunda sección inicia con esta misma altura de 150 m y tiene una longitud de 3 600 m, con una pendiente de 2.5% (llegando a una altura de 60 m). La primera sección corresponde a los 3 000 m más cercanos a la pista y presenta una pendiente del 2%, llegando desde una altura de 60 m, al nivel base de la pista.

Al igual que la superficie de aproximación, la de ascenso se puede ubicar en cada una de las cabeceras, y también cuenta con una longitud total de 15 km, pero con una amplitud en su primera sección de sólo 180 m, y que aumenta hasta llegar a los 1 200 m a una distancia de 6 480 m, después de este punto, la amplitud se mantiene hasta los 15 km. La pendiente que presenta toda la superficie es constante y corresponde al 2%, es decir, llega a

una altura de 300 m en su punto más distante de la cabecera.

### Superficies de transición, horizontal interna y cónica

La superficie de transición se localiza a ambos costados de la pista (Figura 3), tiene un ancho de 315 m, alejándose lateralmente de la misma con una pendiente del 14.3%, hasta llegar a los 45 m de altura, en donde ambas partes de esta superficie se unen con la horizontal interna, misma que delimita un área que mantiene esos mismos 45 m de altura, a una distancia de 4 000 m a ambos lados de la pista medidos desde el ARP y teniendo dos radios de 4 000 m medidos desde ambas cabeceras. Contigua a ésta se localiza la superficie cónica, que tiene una distancia de 5 100 m a ambos lados de la pista medidos desde el ARP, y con dos radios también de 5 100 m medidos desde ambas cabeceras, y con una altura que va en la zona colindante a la superficie horizontal de 45 hasta 100 m de altura en su parte más lejana (OACI anexo 14, 2004).

### CARTOGRAFÍA BASE

Se realizó la corrección de errores topológicos de la cartografía base digital del INEGI para cubrir la

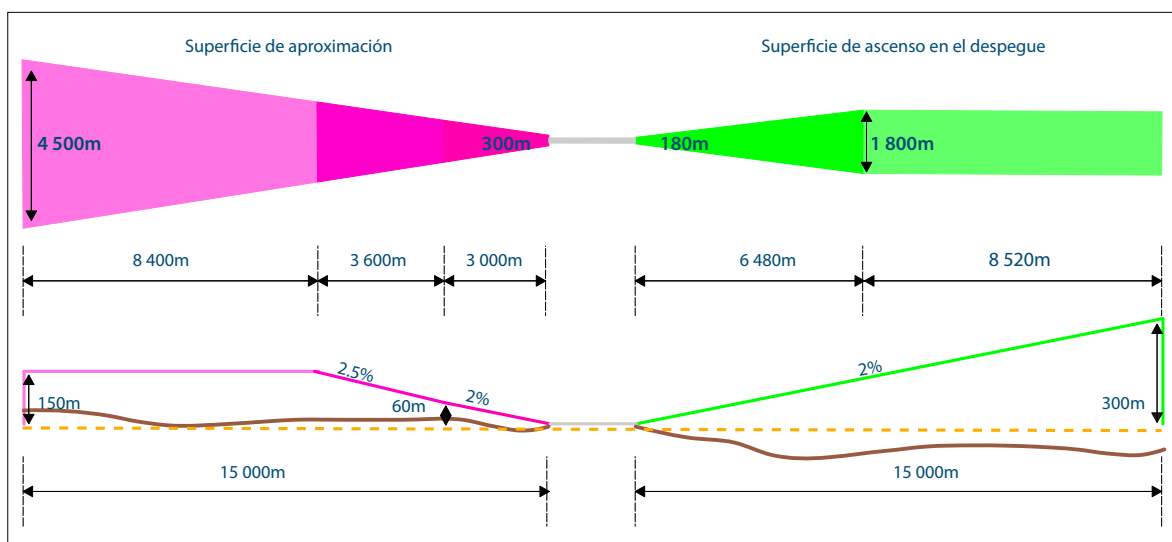


Figura 2. Superficies de aproximación y de ascenso en el despegue.

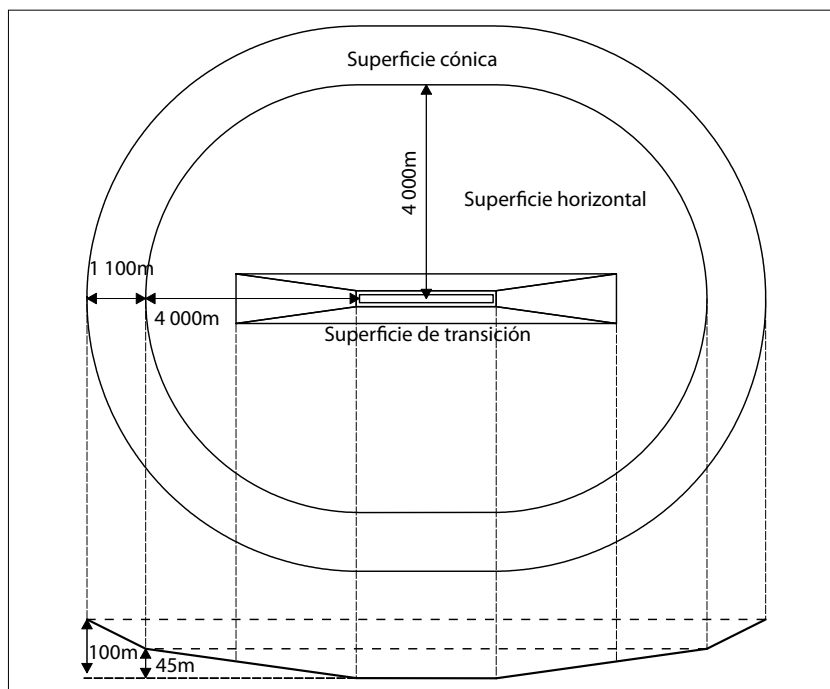


Figura 3. Vista en planta y de perfil de las superficies de transición, horizontal interna y cónica.

zona de influencia operativa de cada uno de los cinco aeropuertos. Se incluyeron curvas de nivel, hidrografía, vías de comunicación y mancha urbana. Además se generaron los metadatos de cada una de estas capas de información.

### Corrección topológica

Para llevar a cabo este proceso se establecieron las reglas básicas correspondientes para los polígonos y las capas de líneas. Para los primeros se estableció que dentro de la misma capa: 1. Los polígonos no deben superponerse unos con otros, y 2. No debe haber espacios entre ellos. Para las capas de líneas se utilizaron las siguientes reglas topológicas: *a)* las líneas no deben superponerse a ninguna otra dentro de una capa; *b)* no deben tener nodos aislados, el final de una línea debe tocar cualquier parte de otra línea o de sí misma dentro de la capa; *c)* las líneas no se deben cruzar en ninguna parte con otra dentro de la misma capa y *d)* no deben tener pseudo-nodos, es decir, el final de una línea debe tocar el final de otra línea dentro de una capa. Esto ocurre cuando se unen dos capas de información contiguas, ya que no siempre coinciden los elementos, como las carreteras, por ejemplo.

Una vez establecidas las reglas se realizaron las correcciones de errores topológicos a las capas de polígonos y de líneas, posteriormente se llevó a cabo la validación de cada capa, donde se revisó que todos los elementos del mapa cumplieran con las reglas establecidas. Una vez terminada la corrección topológica se inició la captura de metadatos a través del programa ArcGIS 9.2 (Rosales, 2009).

### Estructura de la base de datos y metadatos por capa

El diseño de las bases de datos se adaptó a las necesidades de cada capa de las cartas aeronáuticas. Los elementos fundamentales de las tablas son los siguientes: 1. FID: campo generado automáticamente por el sistema y que aumenta un registro, con un identificador interno al crear un elemento de la capa, 2. Shape: nos muestra el tipo de geometría que tiene el registro (punto, línea, polígono, etc.), 3. ID: campo creado con una numeración consecutiva como identificador externo con la finalidad de establecer la cardinalidad de las tablas, 4. Campos de atributos: se generan tantos campos como atributos tenga el elemento que se esté trabajando, puede ser su descripción, coordenadas, altura,

elevación, etc. En el caso particular de los planos de obstáculos de aeródromo, una de las capas más importantes es la de los objetos que representan una obstrucción para las operaciones de las aeronaves, esta información cuenta con un campo del nombre del obstáculo y con una etiqueta para cada elemento para diferenciarlo por tipo. Un campo de altura, que corresponde a la distancia vertical de dicho objeto sobre el terreno, y un campo de elevación, que es la suma de la altura del obstáculo más la altitud del terreno sobre el que se encuentra (la altitud es una distancia vertical medida sobre el nivel medio del mar). También se incluyen los campos *X*, *Y* que muestran la latitud y longitud, en coordenadas geográficas y UTM, de cada uno de los puntos. La construcción de cada tabla es similar, de esta forma cada capa de información cuenta con una base de datos que se puede consultar y modificar según las necesidades (Figura 4).

## FOTOGRAMETRÍA

Para obtener los mapas de aeródromo, se decidió utilizar mosaicos ortorectificados como apoyo cartográfico para trazarlos. Dichos mosaicos son un

material autorizado por la OACI, siempre y cuando se obtenga un error en la posición de cualquier punto del mismo, en el orden de 0.5 m (OACI documento 9881, 2007). Para llevar a cabo el proceso de identificar, georreferenciar y medir la altura de los obstáculos que interfieren en la operación de los despegues y aterrizajes, se utilizaron técnicas fotogramétricas, siendo este método también aprobado por la OACI (OACI documento 9881, 2007). Para cumplir con estos objetivos, se llevaron a cabo dos levantamientos aéreos en cada uno de los aeródromos: a 10 000 y 5 000 pies de altura sobre el nivel del terreno. Con las imágenes obtenidas a 10 mil pies se formó un mosaico ortorectificado que cubre el área de control de la terminal aérea y que incluye, por supuesto, la pista y las superficies limitadoras de obstáculos. Con dicho mosaico se identificaron y georreferenciaron las obstrucciones, con excepción de algunas estructuras metálicas delgadas usadas para montar antenas, que no pudieron detectarse. A partir del vuelo bajo también se formó un mosaico que cubre principalmente la pista y que sirvió para generar el plano de aeródromo, en éste se localizaron con precisión de 19 cm las calles de rodaje, la torre de control, los edificios y las demás instalaciones aeroportuarias. Dentro de

FID	Shape	ID	OBSTACULO	ALTURA	ELEVACION	X	Y	X_1	Y_1
0	Point	1	edificio	8.5	71.5	109° 48' 7.26" W	27° 21' 36.80" N	816452.041998	3026903.52247
1	Point	2	edificio	12.3	75.3	109° 48' 3.81" W	27° 21' 43.03" N	816575.115457	3027096.24794
2	Point	3	torre de alta tension	9.9	72.9	109° 49' 14.83" W	27° 22' 16.27" N	816814.095379	3028100.4477
3	Point	4	edificio	9.6	72.6	109° 49' 31.00" W	27° 22' 23.04" N	816167.940687	3026304.4557
4	Point	5	torre de alta tension	11.1	74.1	109° 49' 47.12" W	27° 22' 36.56" N	815721.109065	3026716.37583
5	Point	6	tanque	18	78	109° 50' 54.07" W	27° 23' 55.85" N	813859.411278	3031138.97878
6	Point	7	edificio	13.5	71.5	109° 50' 57.27" W	27° 23' 58.84" N	813771.422086	3031162.85602
7	Point	8	antena	17.3	75.3	109° 50' 57.82" W	27° 23' 58.86" N	813756.578348	3031142.1118
8	Point	9	arbol	13.2	71.2	109° 50' 52.38" W	27° 24' 11.14" N	813804.28909	3031810.00183
9	Point	10	poste	8.5	68.5	109° 51' 0.30" W	27° 24' 4.28" N	813888.024824	3031396.93346
10	Point	11	edificio	8.4	69.4	109° 47' 48.57" W	27° 21' 30.84" N	818987.251055	3026725.11328
11	Point	12	edificio	7.4	70.4	109° 48' 0.49" W	27° 21' 50.09" N	818664.099788	3027314.34896
12	Point	13	tanque	10.6	73.6	109° 48' 2.87" W	27° 21' 49.24" N	818604.390945	3027287.38068
13	Point	14	poste	8.4	71.4	109° 48' 0.81" W	27° 22' 1.26" N	818651.925631	3027656.58057
14	Point	15	edificio	5.0	68.0	109° 48' 5.49" W	27° 21' 56.21" N	818525.050364	3027501.2611
15	Point	16	edificio	5.1	68.1	109° 48' 18.04" W	27° 22' 30.90" N	818170.018812	3026568.01172
16	Point	17	tanque	12	72	109° 48' 35.50" W	27° 22' 32.89" N	817888.66194	3026822.67828
17	Point	18	edificio	6.5	68.5	109° 48' 33.64" W	27° 22' 51.48" N	817735.380524	3026194.4998
18	Point	19	tanque	16.5	74.5	109° 48' 44.91" W	27° 21' 11.25" N	819754.490841	3031830.88741
19	Point	20	antena	11	69	109° 48' 43.48" W	27° 24' 6.18" N	818786.150493	3031474.47936
20	Point	21	edificio	8	64	109° 49' 57.41" W	27° 24' 13.03" N	815410.874209	3031682.20746
21	Point	22	edificio	4.8	62.8	109° 50' 3.82" W	27° 24' 31.37" N	815229.275885	3032245.1294
22	Point	23	edificio	6.5	64.5	109° 50' 6.98" W	27° 24' 28.61" N	815143.240852	3032165.51801
23	Point	24	tanque	6.5	66.5	109° 50' 33.20" W	27° 24' 27.16" N	814423.751027	3032107.58201

Figura 4. Ejemplo de la información contenida en una tabla de datos de obstáculos.

cada pista se tomaron en promedio 18 puntos de control terrestre mediante receptores geodésicos de posicionamiento satelital, esto permitió obtener con alta precisión las dimensiones de la misma y a la vez contar con puntos de control terrestre para la elaboración de los ortomosaicos. Las fotografías aéreas digitales fueron interpretadas adaptando los procesos fotogramétricos convencionales, ya que las cámaras de pequeño formato no ofrecen, de inicio, los datos de calibración y las imágenes no poseen marcas fiduciales, tal como se conocen en la fotografía aérea convencional; sin embargo, este material puede ser utilizado también, con las debidas adaptaciones, para la formación de mosaicos ortorectificados (Wolf and Dewitt, 2000; Hernández, 2003; Prado *et al.* 2006, Prado y Peralta, 2012) e inclusive cumplir con estándares como el señalado por la ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) en los *Requerimientos de Precisión en las Coordenadas (X,Y) para los Detalles Planimétricos (Clase 1), para Puntos Bien Definidos* (ASPRS, 2007), donde se especifica que para un mapa a escala 1:10 000 (que es el caso del ortomosaico del vuelo alto), la precisión horizontal debe ser de  $\pm 2.5$  m. Y para el mapa del vuelo bajo, que tienen una escala aproximada de 1:4 000, la precisión debe ser de  $\pm 1.0$  m. Bajo este estándar, nuestros mapas cumplen con ese nivel de precisión e inclusive lo superan.

## LEVANTAMIENTOS AÉREOS

Para cada aeropuerto se efectuó una campaña mediante fotografía aérea digital de pequeño formato, para lo cual se utilizó una cámara NIKON D2X, con sensor de 12.21 Megapíxeles, con lente Karl Zeiss de 25 mm, y apertura de 2.8, montada en una avioneta Cessna 206. Aunque esta aeronave en particular está especialmente adaptada para vuelo fotográfico, los levantamientos aéreos con cámaras de formato pequeño pueden efectuarse con cualquier tipo de aeronave, donde sea posible montar una pequeña estructura para fijar la cámara, ofreciendo gran versatilidad en la adquisición de las imágenes (Mills *et al.*, 1996; Aber *et al.*, 2010). Para la planeación de los dos vuelos se tomó en cuenta

como parámetro más importante, el tamaño de píxel en el terreno, esto fue para poder distinguir en el vuelo alto, los obstáculos y en el bajo, las instalaciones dentro del aeródromo; aunque en ambos casos se hizo un compromiso entre cobertura y resolución. La manera de planear el vuelo, mediante el uso de cámaras digitales de pequeño formato, puede revisarse en Neumann (2005) y Prado y Peralta (2012,) donde a través de una hoja de cálculo se pueden manejar todas las variables que intervienen en el proceso, como son: altura de vuelo, cobertura, resolución, trazado de líneas de vuelo, opciones de lentes y cámaras, y considera posibles cambios en la altura de vuelo por tráfico aéreo, nubes u otras circunstancias.

### Levantamientos a 10 000 pies de altura sobre el terreno

Para las campañas aéreas a 10 000 pies se realizaron seis líneas de vuelo con una separación entre ellas de 2 041 m, obteniendo 60 imágenes por transecto (360 fotos en total) con una resolución en el terreno de 0.68 m. Por cada aeropuerto se cubrió una franja rectangular de 14 km de ancho por 40 km de largo, cubriendo un área aproximada de 560 km<sup>2</sup>. En la Figura 5 se muestra un ortomosaico que incluye la pista y las superficies limitadoras de obstáculos del aeropuerto de Chetumal, Quintana Roo, México. Esto es, la horizontal interna (8 km de diámetro) y cónica (12 km de diámetro), así como las de transición, aproximación y despegue (15 km desde ambas cabeceras de la pista).

### Levantamientos a 5 000 pies sobre el terreno

En este caso se realizaron dos líneas de vuelo, de 68 fotografías cada una, separadas 1 020 m, obteniéndose un total de 136 imágenes con una resolución en el terreno de 0.34 m. Por cada aeropuerto se hizo un levantamiento de forma rectangular de 1.35 km x 40 km abarcando la pista, las instalaciones aeroportuarias y las superficies de aproximación y despegue, cubriendo un área de 54 km<sup>2</sup>. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de un mosaico elaborado a partir de dos líneas de 16 imágenes aéreas cada una, correspondientes al Aeropuerto de Chetumal, Quintana Roo, México; el detalle logrado con esta escala (1:4 000 aproximadamente) y los puntos de

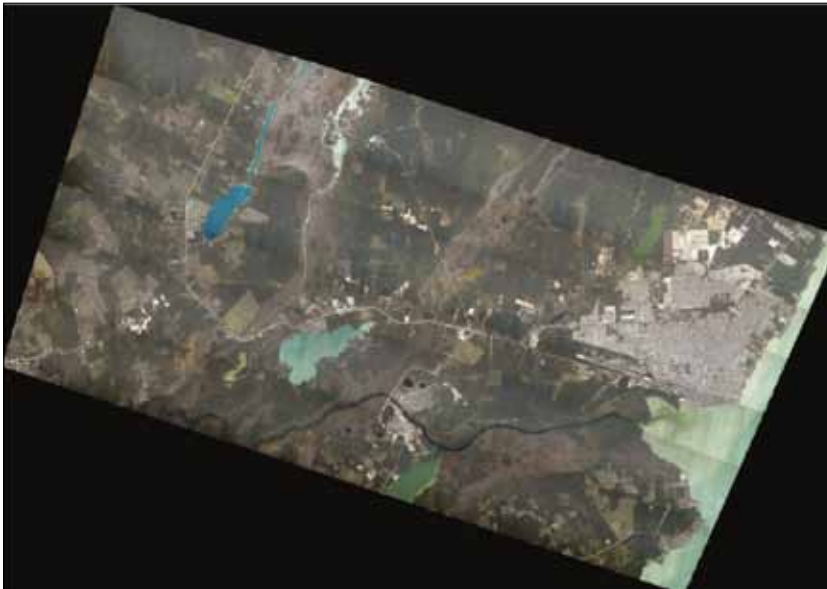


Figura 5. Mosaico de Chetumal, Quintana Roo, México. Éste se compone de 360 imágenes aéreas digitales, donde se obtuvo un error cuadrático medio de 0.40 metros.



Figura 6. Mosaico ortorectificado, obtenido a partir de imágenes del vuelo bajo del Aeropuerto de Chetumal, Quintana Roo, compuesto de 32 fotografías aéreas digitales.

control sobre la pista, permitieron la elaboración de los planos de aeródromo, con un error cuadrático medio de 0.19 m. En este caso particular se observó que las variaciones más importantes se localizaron en las inmediaciones de la carretera que corre de manera paralela a la pista, encontrándose un error

del orden de 0.5 m, aunque este parámetro todavía se encuentra dentro del intervalo permitido, de acuerdo con los lineamientos de la OACI.



## GENERACIÓN DE MOSAICOS ORTORECTIFICADOS

Para poder obtener un mosaico ortorectificado, a partir de imágenes aéreas digitales obtenidas con cámaras de pequeño formato, es necesario corregir las distorsiones geométricas presentes en toda la escena. Y al igual que en la fotografía aérea convencional, las distorsiones se deben a los desplazamientos de los puntos de la imagen, con respecto a su posición esperada, y se atribuyen a: el apuntamiento fuera de la vertical de la cámara por movimientos descontrolados de la aeronave, las distorsiones del lente y las inherentes a la perspectiva de la toma, y por último, al desplazamiento por relieve, debido a diferencias de alturas en el terreno. La corrección de estos errores nos lleva a obtener una ortoimagen, esto se logra cuando se tiene una proyección ortográfica y una escala uniforme en toda la escena (Wolf y Dewitt, 2000; Prado *et al.*, 2006). Y a la par de la fotografía aérea convencional, es necesario contar con los parámetros de orientación externa, la calibración de la cámara, por lo menos tres puntos de control terrestre por imagen y un modelo digital de elevación para poder efectuar la ortorectificación. El mismo procedimiento de formación de mosaicos fue seguido para la generación de las cartas de aeródromo de los cinco aeropuertos men-

cionados. En este caso no se obtuvieron durante el vuelo los parámetros de orientación externa de cada imagen, cuando esto ocurre, es necesario obtener en mayor cantidad y con mejor calidad los puntos de control terrestre, ya que son fundamentales para reconstruir las características geométricas entre la cámara y el terreno al momento de efectuar la toma. También son esenciales para georreferenciar y en última instancia disminuir el error en el mosaico (López, 2006; Ramírez, 2010). Las ortofotos de INEGI (INEGI, 2011a), constituyeron un insumo básico para obtener dichos puntos de control de manera adecuada y suficiente. En la Figura 7 se muestran las seis ortofotos utilizadas para generar el ortomosaico del aeropuerto de Chetumal (CTM).

### Campaña de levantamiento de puntos de control terrestre mediante receptores GNSS

Para los cinco aeropuertos se efectuaron mediciones sobre la pista, con equipos de posicionamiento satelital de tipo geodésico marca TOPCON modelo Hiper L1 (de una banda o frecuencia) trabajando en modo diferencial en postproceso. Esta información fue crucial para poder obtener un error menor de 0.5 m en promedio en los mapas de los aeródromos. Los puntos originalmente se obtuvieron en ITRF92 con el elipsoide de referencia GRS80 y posteriormente se reproyectaron al datum

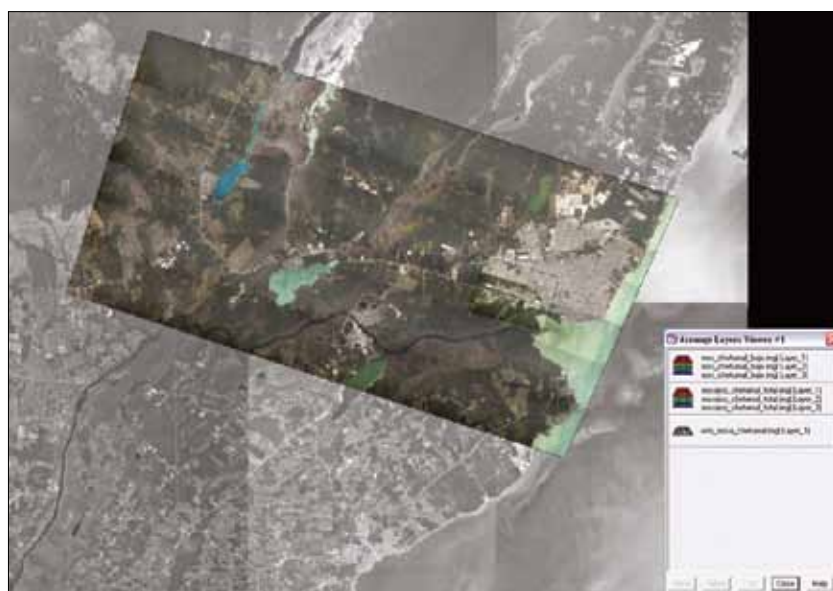


Figura 7. Seis Ortofotos fueron utilizadas para obtener puntos de control terrestre para la generación del ortomosaico del aeropuerto de Chetumal, Quintana Roo, México.

y elipsoide WGS84, a través del programa ARCGIS 9.2. La obtención de puntos se distribuyó lo más uniformemente posible a lo largo de las pistas; en la Figura 8 se muestra un ejemplo de levantamiento simultáneo de dos de ellos en el aeropuerto de Ciudad Obregón, Sonora, México. La corrección diferencial se efectuó mediante los archivos RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del INEGI (INEGI, 2011b) y en algún caso se echó mano de las estaciones de referencia de operación continua CORS (*Continuously Operating Reference Stations*) a cargo del National Geodetic Survey de Estados Unidos (National Geodetic Survey, 2012), del que la RGNA forma parte, ya que para el aeropuerto de Nuevo Laredo, Tamaulipas, la base de Laredo, Texas queda a 13.8 km. del aeródromo.

En todos los aeropuertos se trabajó con un punto de referencia que se ubicó en una esquina de la cisterna de la estación de bomberos o CREI (Cuerpo de Rescate y Extinción de Incendios). Así, en el primer paso en la corrección diferencial se obtuvo la solución de la posición de la base de referencia INEGI hacia la base CREI y después, a partir de ella, se resolvieron los demás puntos sobre la pista. Se observa claramente que la magnitud del error tiene una dependencia

directa con la distancia de la base de Referencia INEGI hacia el aeropuerto, como se puede apreciar en la Tabla 1. El error máximo se situó en 9.6 cm y, a su vez, el error máximo entre la base CREI y los puntos en la pista, fue de tan solo 15 mm. Por otro lado, en la última columna de la Tabla 1, se observan los errores máximos obtenidos para aquellas obstrucciones que están dentro de las superficies limitadoras de obstáculos y que necesitaron verificación en campo.

## IDENTIFICACIÓN DE OBSTÁCULOS

Los métodos utilizados para identificar y medir los obstáculos están basados en principios fotogramétricos y de fotointerpretación. Para ello se utilizaron las fotografías aéreas digitales de los vuelos a 10 mil y 5 mil pies, a una escala aproximada de 1:10 000 y de 1:4 000, respectivamente.

### Identificación y medición de obstáculos mediante fotointerpretación

La primera etapa de este proceso consistió en preparar las fotografías, ubicando el punto central de la foto sobre un acetato transparente. Posteriormente, siguiendo la secuencia de fotos de cada línea, se



Figura 8. Obtención de puntos de control terrestre sobre las pistas de los aeródromos, con receptores satelitales geodésicos.

Tabla 1. Errores obtenidos durante el proceso de solución de puntos sobre las pistas y de aquellos obstáculos que se revisaron en campo

Aeropuerto	No. de puntos en la pista	Error base INEGI-CREI	Error base CREI - Puntos	Distancia base INEGI- CREI	Error Base INEGI- Obstáculos
CTM	18	1mm horz 2mm vert	2mm horz 8mm vert	3 k m	4.5cm horz 4.5cm vert
CPE	14	2mm horz 4mm vert	4mm horz 10mm vert	5 km	20cm horz 29cm vert
NLD	20	5mm horz 8mm vert	4 mm horz 6mm vert	13.85 km	24cm horz 27cm vert
GYM	18	6.5cm horz 5.3cm vert	2 mm horz 4 mm vert	124 km	36cm horz 29cm vert
CEN	20	8.3cm horz 9.6cm vert	4 mm horz 15mm vert	218 km	1.02m horz 0.42m vert

transfirieron los puntos centrales por tripletas, para trazar los marcos que delimitan la zona de fotointerpretación. La segunda etapa correspondió a la interpretación e identificación de todos los obstáculos que, por su altura y su distancia con respecto al aeropuerto, sobrepasan las pendientes de las superficies de aproximación y despegue y las alturas de la horizontal interna y cónica. Dichos obstáculos son principalmente: torres de alta tensión, antenas de comunicación, edificios, grúas de construcción, tanques y arbolado, entre otros. En la tercera fase, los obstáculos previamente identificados fueron medidos utilizando una barra de paralaje para obtener las diferencias entre la base y la cima del objeto a medir. Existe una relación que permite calcular diferencias de altura a partir de diferencias de paralaje y viceversa, ya que los puntos con la misma altura, tienen el mismo paralaje absoluto, y a mayor altura corresponde un paralaje mayor, esto se puede medir directamente con una regla, en combinación con un estereoscopio de espejos (De Agostini, 1978):

$$h = \frac{H \cdot D_p}{B_f + D_p} \quad (1)$$

$D_p$  es la diferencia de paralaje en mm y  $B_f$  es la relación de la base fotográfica (también dada en milímetros).

La diferencia de paralaje es la distancia entre puntos homólogos de dos imágenes aéreas contiguas. La relación de la base fotográfica es la distancia existente entre los puntos principales y los puntos conjugados de dos fotografías aéreas que forman un estéreo. Finalmente, las alturas de los obstáculos, con su identificación correspondiente, se marcaron sobre los mosaicos ortorectificados de cada aeropuerto, utilizando un SIG. La relación de las fotografías aéreas fotointerpretadas por cada aeropuerto, se presenta en la Tabla 2.

Durante el análisis de los estereopares, con los que se midieron las alturas de la mayoría de los obstáculos, algunas estructuras metálicas utilizadas como soporte de antenas no pudieron ser reco-

Tabla 2. Relación de fotos interpretadas, obstáculos medidos y datos finales por aeropuerto

Aeropuerto	CTM	CPE	CEN	GYM	NLD	TOTAL
Número de fotos interpretadas.	65	114	86	92	107	<b>464</b>
Número de obstáculos medidos.	229	134	79	71	111	<b>624</b>
Obstáculos después de efectuado el barrido en cabeceras	19	18	73	21	13	<b>144</b>
Después de cruzar superficies en SIG	175	101	337	164	122	<b>899</b>



nocidas, por lo que fue necesario llevar a cabo un exhaustivo trabajo de campo para verificar su altura y su ubicación geográfica. En la siguiente sección se hace una descripción del procedimiento efectuado para llevar a cabo una verificación positiva de todos los obstáculos localizados alrededor de la pista. Se interpretó un total de **464** fotografías aéreas de las cuales se estimó un total de **624** obstáculos en los cinco aeropuertos. Después de la revisión desde las cabeceras de las pistas el número de obstáculos aumentó en 144, con la distribución por aeropuerto que se muestra en la Tabla 2, siendo las torres de alta tensión y las estructuras delgadas de antenas las que aportaron el mayor número de limitaciones y en menor medida los otros ya mencionados. Después de cruzar los datos correspondientes de las pendientes de aproximación y despegue, y de las superficies horizontal interna y cónica, en un SIG, se hizo la depuración de obstáculos añadiendo algunos y suprimiendo otros más. El caso de CEN es de llamar la atención, debido a que el número de torres de alta tensión, pasó de 90 a 270, ya que el análisis demostró que se encontraban dentro de la zona de limitación de obstáculos del aeropuerto.

### **Revisión de obstáculos desde ambas cabeceras de la pista**

Una manera muy práctica de resolver el problema de la identificación de las estructuras metálicas delgadas donde se ubican antenas de comunicaciones, fue a través de un barrido desde ambas cabeceras de la pista. Esto se llevó a cabo mediante el uso de unos binoculares con distanciómetro integrado, anotando la longitud y el azimut de cada obstáculo. Éstos fueron marcados en un mapa impreso y fue sencillo localizarlos en campo, medirlos y georreferenciarlos. Para el cálculo de las alturas se utilizó un método geométrico tradicional, donde a partir de una distancia medida desde la base del obstáculo, se obtiene un ángulo y se calcula la altura por medio de la función tangente. Para la georreferencia de los obstáculos se utilizaron nuevamente los receptores geodésicos TOPCON Hiper L1, trabajando en modo diferencial. El error máximo se ubicó en 1.02 m, en Ciudad Obregón, Sonora; no obstante, este valor cae dentro de la precisión exigida para este trabajo, ya que para la zona de influencia de

la terminal aérea (45 km), es de 5 m en horizontal y 3 en vertical (OACI documento 9881, 2007). En la última columna de la Tabla 1 se muestra el error máximo en la solución de la posición de los obstáculos para los diferentes aeropuertos.

### **Bases de datos de obstáculos (fotográfica y de coordenadas)**

Ya que se contó con la base de datos de los obstáculos de cada uno de los aeropuertos; que incluye una descripción del tipo al que pertenece, sus coordenadas, su altura y su elevación; se agregó un hipervínculo a cada registro que lo liga desde el mapa correspondiente, para facilitar el acceso a esta información. De esta manera, a través de las cartas en formato digital, se podrá hacer una consulta visual y conocer las características de cada obstáculo, esto será una ventaja para el operador del aeropuerto o el piloto que lo requiera, y así facilitar su identificación.

## **ELABORACIÓN DE PLANOS DE OBSTÁCULOS**

Como ya se ha mencionado, la altitud de los obstáculos en torno a los aeropuertos es de particular importancia para la operación de las aeronaves. Es indispensable pensar en tres dimensiones al momento de plasmar los obstáculos en los mapas, ya que hay que considerar distancias y pendientes medidas desde el ARP. En los planos de obstáculos de aeródromo tipos A, B y C, que son los más críticos dentro de las 17 clases de cartas manejadas por la OACI (Hajnal, 2001), se proporciona información detallada sobre la clasificación, la posición y la altura de los obstáculos. Esto permite a los usuarios efectuar los complejos cálculos de masa de despegue, considerando la eficiencia mínima de la aeronave y la distancia a la que se encuentran los obstáculos; datos necesarios para hacer frente a casos de emergencia, como la falla de un motor al iniciar el vuelo.

### **Sistema de Referencia**

El Sistema Geodésico Mundial WGS 84 ha sido adoptado como estándar en la aviación como

referencia horizontal, mientras que la altitud sobre el nivel medio del mar (snmm), constituye la referencia vertical. Para obtener la altitud snmm, es necesario utilizar un modelo geoidal adecuado, por lo que la OACI recomienda el EGM-96 (Earth Gravitational Model 1996), sin embargo, especifica que si éste no es utilizado (OACI documento 9881, 2007), entonces se señale cuál se empleó para obtener las alturas ortométricas. En el caso que nos ocupa, se echó mano del geoide gravimétrico mexicano de INEGI (INEGI, 2011c), para obtener la ondulación geoidal obteniendo la altitud sobre el nivel medio del mar, a través de la fórmula:

$$h = H - g \quad (2)$$

donde  $h$  es la altitud snmm,  
 $H$  es la altura sobre el elipsoide de referencia (WGS\_84)  
y  $g$  es la ondulación geoidal.

El error del modelo es de 36 cm, por lo que para aplicaciones más precisas es necesario recurrir a otros métodos.

### **Elaboración del plano de aeródromo**

El plano de aeródromo incluye la pista, las calles de rodaje, la torre de control y otras instalaciones aeroportuarias. A partir del mosaico ortorectificado formado con las imágenes del vuelo bajo, se trazaron los vectores correspondientes y se generó el mapa de aeródromo (Figura 9).

### **Elaboración de planos de obstáculos de aeródromo tipos A, B y C**

Estos datos se proporcionan para todo aeródromo en cuya trayectoria de aterrizaje y despegue haya obstrucciones destacadas, es decir, aquéllas que sobrepasan las alturas permitidas en las superficies limitadoras de obstáculos. En el plano de obstáculos de aeródromo tipo A, debe aparecer una vista en planta y otra de perfil de la pista y las superficies de aproximación y despegue (Figura 10), describiendo adecuadamente las distancias disponibles para el recorrido de despegue, antes de que haya alguna obstrucción. El tipo B, incluye una vista en planta de una zona que abarca 15 km desde el ARP, donde

se indican los obstáculos, la topografía, la mancha urbana y los cuerpos de agua (Figura 11). El Plano de obstáculos de aeródromo tipo C proporciona información de las obstrucciones abarcando una zona situada a una distancia de hasta 45 km desde la pista, como se muestra en la Figura 12 (OACI, 2001; OACI anexo 14, 2004; OACI documento 9881, 2007).

### **Integración de mapas de aeródromo en un SIG**

La elaboración de las cartas aeronáuticas fue un proceso que inició con la recopilación de la cartografía base en formato digital, misma que fue corregida y actualizada; la planeación y realización de los vuelos para cubrir el área de interés, considerando de manera especial las superficies limitadoras de obstáculos; los procesos de fotointerpretación para identificar y medir obstáculos; el procesamiento de las imágenes hasta formar los mosaicos ortorectificados; la verificación en campo y la identificación de obstáculos desde las cabeceras de las pistas; la revisión de los mapas por las autoridades aeronáuticas correspondientes; finalizando con el trabajo de gabinete, en el que se integró toda la información en un SIG. Al terminar la edición cartográfica para cada plano, se respaldaron los proyectos en formato MXD, propio del software utilizado (ArcGIS 9.2), y cada una de las capas agregadas, como SHP (shape). A esta información se puede tener acceso mediante ArcMap de ArcGIS para la edición, modificación y actualización de los planos, así como de sus bases de datos.

### **CONCLUSIONES**

La metodología descrita en este artículo y utilizada en la elaboración de las cartas aeronáuticas para cinco aeropuertos mexicanos, demostró su utilidad ya que permitió que se cumplieran satisfactoriamente los requisitos establecidos por la OACI. Los mapas pasaron revisiones exhaustivas por parte de autoridades aeronáuticas mexicanas, como son: la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) y Servicios para la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM), antes de ser publicados.

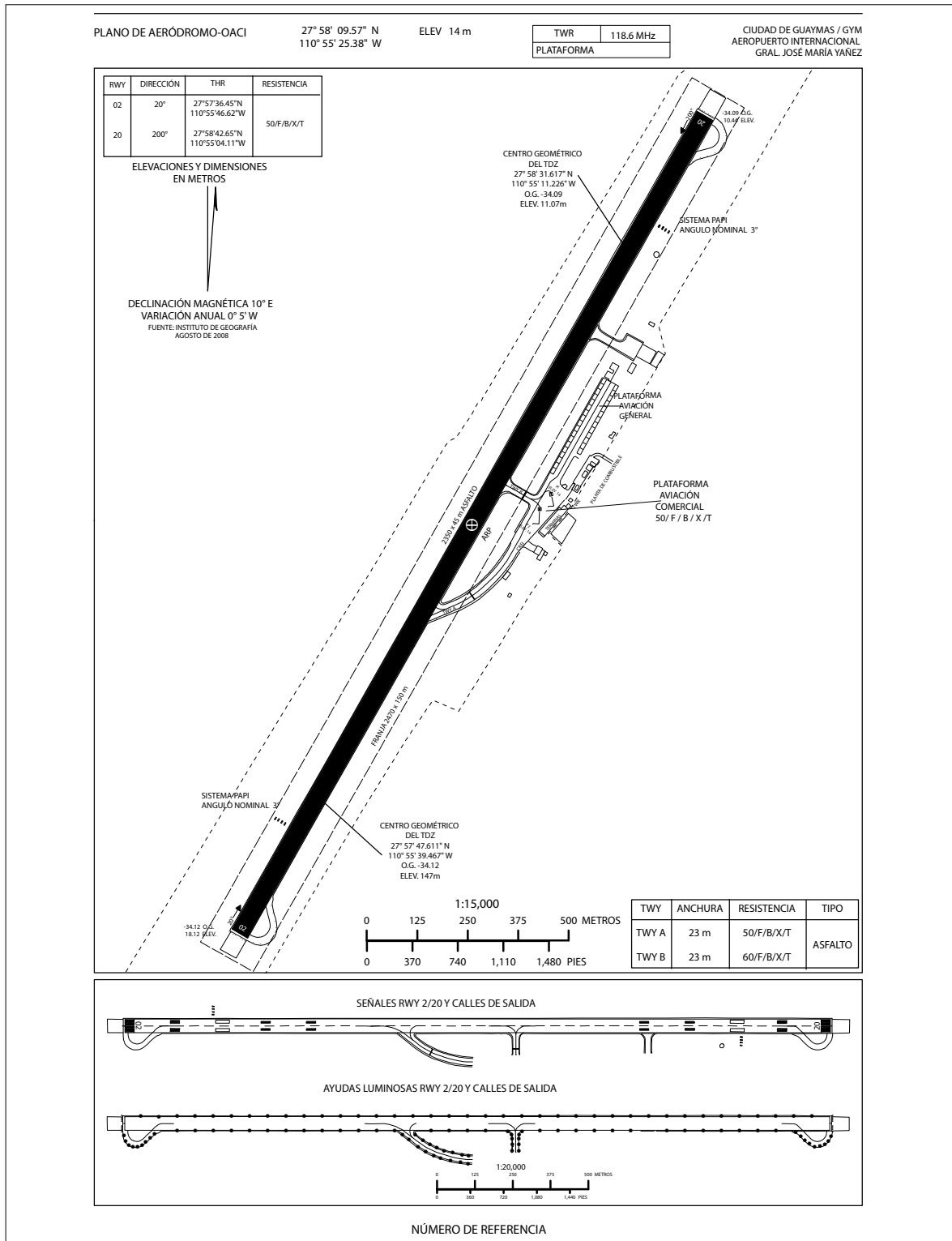


Figura 9. Plano de aeródromo de Guaymas, Sonora, México. La escala de este mapa es 1:15 000.

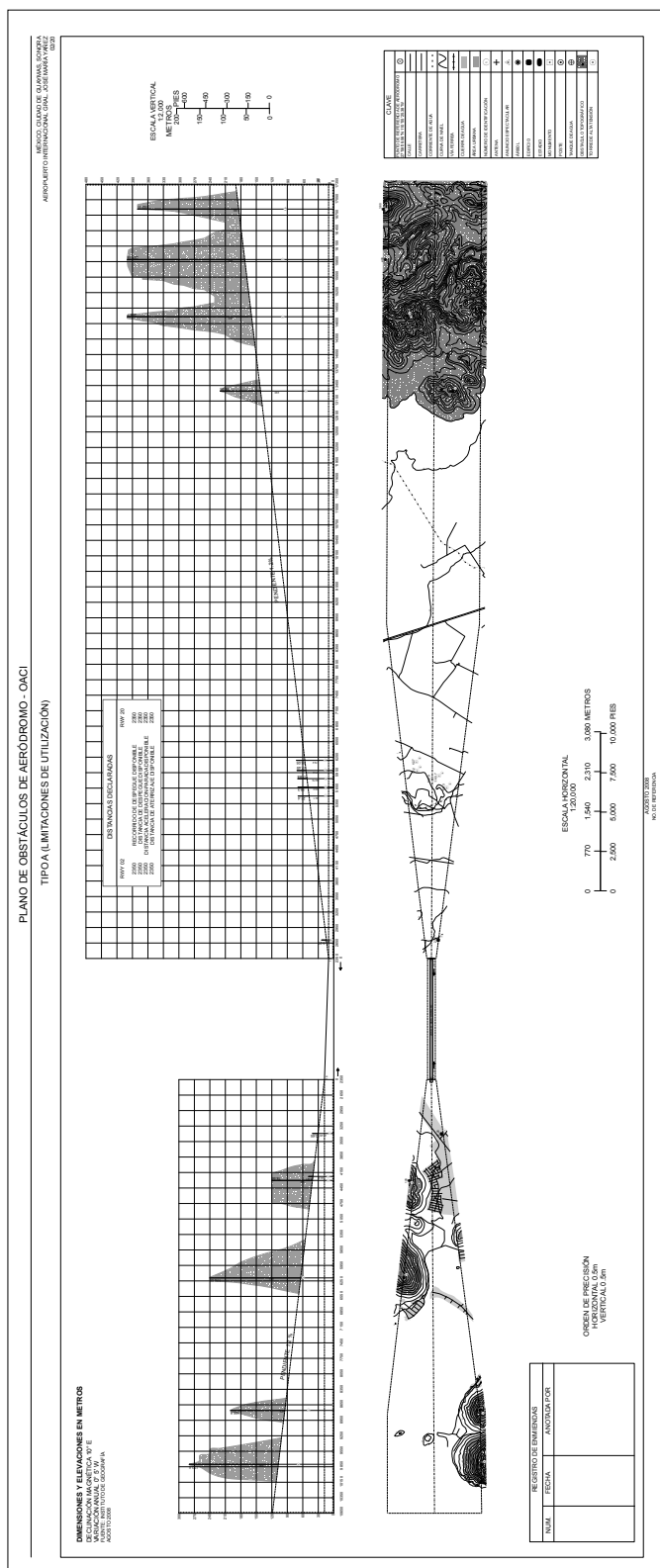
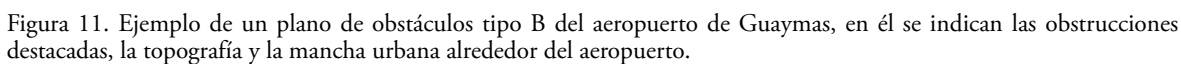


Figura 10. Ejemplo de un plano de obstáculos tipo A del aeropuerto de Guaymas, donde se indican las obstrucciones destacadas en planta y en perfil. La escala de este mapa es 1:15 000.



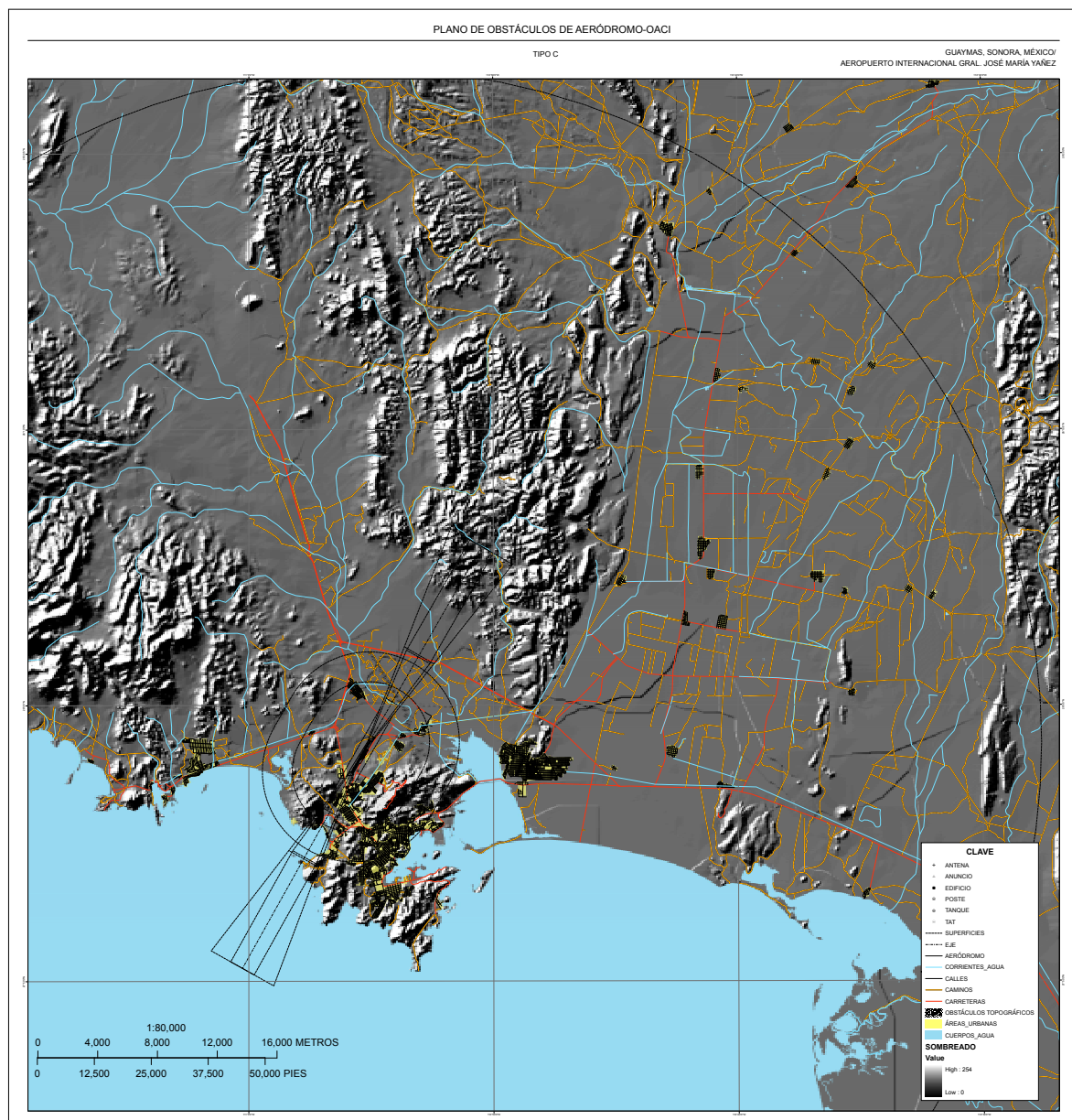


Figura 12. Plano de aeródromo tipo C, donde se muestran los obstáculos dentro de la zona de influencia del aeropuerto a 45 km desde el ARP. Aeropuerto de Guaymas, Sonora, México.

Los mapas de aeródromo y de obstáculos de aeródromo tipos A, B y C, fueron generados siguiendo las especificaciones de la norma ISO 19131 (OACI Documento 9881, 2007), esto permite que toda la información, sus atributos y las reglas de codificación de los mismos, su geometría, su mantenimiento, los requisitos de calidad y los metadatos, estén

estandarizados y que el intercambio de dicha información se pueda hacer de una manera consistente y confiable. La fotografía aérea digital de pequeño formato demostró una vez más su versatilidad y utilidad en la elaboración de mapas, en este caso con una escala de 1:10 000 en los vuelos a 10 000 pies de altura sobre el terreno y de 1:4 000 en los

vuelos a 5 000 pies, obteniéndose errores RMS del orden de 40 y 19 cm, respectivamente, que cumplen y superan los *Requerimientos de Precisión en las Coordenadas (X,Y) para los Detalles Planimétricos (Clase 1), para Puntos Bien Definidos* (ASPRS, 2007). Los métodos fotogramétricos desarrollados y adaptados en los últimos años para fotografía aérea de pequeño formato (Frayer, 1996; Wolf and Dewit, 2000; Prado *et al.*, 2006; Ahmad, 2010; Ramírez, 2011; Prado y Peralta 2012), son una herramienta muy valiosa en la elaboración de cartografía donde se exige que los errores sean del orden de 0.5 m, como en el caso aquí presentado; no obstante, fue necesario efectuar un costoso trabajo de campo para obtener puntos de control terrestre sobre las pistas, con receptores geodésicos, fundamentales para alcanzar esta precisión. La modalidad de producir los mapas de obstáculos en versiones digitales permite la actualización de las bases de datos de una manera muy sencilla, esto es muy importante, ya que muchos de los aeropuertos del mundo están inmersos dentro de las ciudades, lo que aumenta continuamente la cantidad de obstrucciones. El reporte de los pilotos así como un barrido periódico con binoculares desde las cabeceras de la pista, son actividades muy importantes para este proceso. De acuerdo con el Anexo 15 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (OACI Documento 9881, 2007), los datos de obstáculos, deben ser actualizados conforme con la programación establecida por la AIRAC (Aeronautical Information Regulation And Control) y que se establece en ciclos de 28 o 56 días. La AIRAC es una Publicación de Información Aeronáutica (AIP) emitida por las autoridades de aviación locales y que es esencial para la navegación. No hay especificaciones para actualizar los datos del terreno (área 1), es decir, estas bases de datos deben responder a las necesidades particulares de cada aeródromo.

## REFERENCIAS

- Aber, J., I. Marzolf and J. Ries (2010), *Small-format aerial photography. Principles, techniques and geoscience applications*, Elsevier, pp. 1-268.
- ASA (2012), “*Superficies limitadoras de obstáculos*”, Aero-puertos y Servicios Auxiliares (ASA) [[http://www.asa.gob.mx/wb/webasa/determinacion\\_de\\_las\\_superficies\\_limitadoras](http://www.asa.gob.mx/wb/webasa/determinacion_de_las_superficies_limitadoras): 18 de febrero de 2012].
- ASPRS (2007), “*Planimetric Feature Coordinate Accuracy Requirement (Ground X or Y in Meters) for Well-Defined Points*” [<http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-1-1005/c-4.pdf>: 6 de enero de 2012].
- National Geodetic Survey (2012), “*Continuously Operating Reference Stations*” [<http://www.ngs.noaa.gov/CORS/>: 12 de febrero de 2012].
- ESRI White Paper (2009), “*PLTS for ArcGIS Aeronautical Solution: Implementing eTOD in the AIS Data Model*” [<http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/plts-aeronautical-implementing-etod.pdf>: 22 de junio de 2011].
- ESRI aeronautical solution (2011) [<http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/aero-solution/index.html>: 17 de junio de 2011].
- De Agostini, D. (1978). *Introducción a la fotogrametría*, Centro Interamericano de Fotointerpretación, Bogotá, Colombia, pp. 1-264.
- Fernández, M. A. and H. J. Monteiro (2011), *Method to generate airport obstruction charts based on a data fusion between interferometric data using synthetic aperture radars positioned in spaceborne platforms and other types of data acquired by remote sensors*, Patent Application Publication. Pub. No. US 2011/0098986 A1, Apr. 28, 2011.
- Hajnal, P. I. (ed.; 2001), *International Information, Volume 2: Documents, Publications, and Electronic Information of International Organizations*, Libraries Unlimited, Englewood, Colorado, pp. 1-402.
- Hernández, A. (2003), *Corrección geométrica de imágenes aéreas digitales*, tesis de Licenciatura, Ingeniería en Computación, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- ICAO Annex 4, (2006), Annex 4 to the Convention on International Civil Aviation [[http://www.casa.gov.au/wcmswr/\\_assets/main/lib91135/an04\\_cons.pdf](http://www.casa.gov.au/wcmswr/_assets/main/lib91135/an04_cons.pdf): 2 de febrero de 2012].
- INEGI (2011a), “*ortofotografía / Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística Geografía e Informática*” [<http://www.inegi.gob.mx>: 3 de junio de 2011].
- INEGI (2011b), *Red Geodésica Nacional Activa* [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/rgna.aspx?p=22>: 1 de junio de 2011].
- INEGI (2011c), *Geoide gravimétrico mexicano* [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/ggm.aspx>: 2 de junio de 2011].

- López, F. (2006), *Formación de mosaicos ortorectificados a partir de imágenes aéreas digitales de formato pequeño*, tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Mills, J. P., I. Newton and R. W. Graham (1996), "Aerial photography for survey purposes with a high resolution, small format, digital camera", *Photogrammetric Record*, vol. 15, no. 88, October, pp. 575-587.
- National Geodetic Survey (2012), *Continuously Operating Reference Station*, CORS [http://www.ngs.noaa.gov/CORS/ : 12 de enero de 2012].
- Neumann, K. J. (2005), *Digital Aerial Cameras*. Intergraph Z/I Deutschland GMBH, pp. 1-5 [http://icaci.org/documents/ICC\_proceedings/ICC2009/html/nonref/1\_6.pdf : 21 de enero de 2012].
- OACI (2001), *Resumen del Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Anexos 1 a 18* [http://www.icao.int/icao/net/anx/spanish/info/annexes\_booklet\_es.pdf : Junio 11 de 2011].
- OACI anexo 14, (2004), *OACI, Convenio sobre Aviación Civil Internacional, anexo 14*. Cuarta Edición, Julio. Cap. 1-10. OACI, Montreal, Canadá.
- OACI documento A35-WP/59, (2004), "Enmienda 52 al Anexo 4" [http://www.icao.int/icao/en/assembly/a35/wp/wp059\_es.pdf : 17 de mayo de 2011].
- OACI documento 9881 (2007), *Guidelines for Electronic Terrain, Obstacle and Aerodrome Mapping Information* (Doc 9881), pp. 1-345 [http://www2.icao.int/en/pbn/ICAO%20Documentation/ICAO%20Documentation/Guidelines%20for%20Electronic%20Terrain,%20Obstacle%20and%20Aerodrome%20Mapping%20Information.pdf : 6 de enero de 2012].
- Prado, J., A. Peralta, J. L. Palacio Prieto and R. Sandoval (2006), "Airborne high-resolution digital imaging system", *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 3-23.
- Prado, J. y A. Peralta (2012), "Mosaicos ortorectificados generados a partir de fotografías aéreas digitales de alta resolución", en Quintero, J. A. (coord.), *Temas Selectos de Geomática*, Geografía para el siglo XXI, Serie libros de Investigación, núm. 9, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 17-47.
- Ramírez, M. A. (2010), *Adquisición de imágenes aéreas digitales su procesamiento, aprovechamiento a través de fotografía aérea digital y herramientas SIG*, tesis de Licenciado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Rosales, A. R. (2009), *Elaboración de cartas aeronáuticas OACI, propuesta de plano de obstáculos de aeródromo tipo C, en formato digital*, tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Uddin, W. and E. Al-Türk (2002), "Airport obstruction space management using airborne LIDAR three-dimensional digital terrain mapping", *2002 FAA Technology Transfer Conference*, Atlantic City, New Jersey, pp. 1-14.
- Uddin, W., B. Gutelius and C. E. Parrish (2011), "Airborne laser survey specifications and quality management protocols for airport obstruction Surveys", *Transportation Research Record*, vol. 2214, pp. 117-125.
- Wolf, P. R. and B. A. Dewitt (2000), *Elements of photogrammetry with applications in GIS*, Mc Graw Hill, pp. 1-608.

## GLOSARIO

**Aeródromo:** área definida de tierra o de agua (que incluye todas sus edificaciones, instalaciones y equipos) destinada total o parcialmente a la llegada, salida y movimiento en superficie de aeronaves.

**Aeropuerto:** no hay definición por parte de la OACI para aeropuerto. Sinónimos: Terminal aérea, aeródromo.

**AIRAC:** Aeronautical Information Regulation And Control.

**Altitud, elevación:** distancia vertical entre un nivel, punto u objeto considerado como punto, y el nivel medio del mar (MSL).

**Altura:** distancia vertical entre un nivel, punto u objeto considerado como punto, y una referencia especificada.

**Altura elipsoidal, altura geodésica:** la altura sobre el elipsoide de referencia, medida a lo largo de la normal elipsoidal exterior por el punto en cuestión.

**Altura ortométrica:** altura de un punto relativa al geoid, que se expresa generalmente como una elevación MSL (Mean Sea Level). Sobre el nivel medio del mar (snmm).

**ArcGIS 9.2:** programa de computadora (Sistema de información Geográfica) utilizado para crear consultas interactivas, procesar, editar datos, analizar información geoespacial y presentar los resultados de todas estas operaciones.

**ARP:** Airport Reference Point. Punto de referencia de aeródromo. Es el lugar que define las coordenadas de localización del aeródromo.

**ASA:** Aeropuertos y Servicios Auxiliares. México.

**ASPRS:** American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

**Cámara de formato pequeño:** equipo fotográfico digital cuyo sensor de imagen tiene el tamaño equivalente de una película de 35 mm, y se le llama así para distinguirla de las cámaras aerofotográficas convencionales que utilizan negativos de 23 x 23 cm.

**CREI:** cuerpo de Rescate y Extinción de Incendios. Base de bomberos localizada dentro del aeródromo.



**Corrección topológica:** en la cartografía digitalizada es común encontrar errores topológicos en los datos vectoriales, mismos que deben ser corregidos; a este proceso se le conoce como corrección topológica. Así por ejemplo, las curvas de nivel deben estar conectadas en toda su trayectoria, especialmente en la unión de dos cartas contiguas.

**Designador de aeropuerto:** es un código de tres letras que designa a cada aeropuerto del mundo.

**Detalle planimétrico:** es la precisión que se tiene en un mapa de un determinado objeto al ubicarse en el plano  $X, Y$ .

**Elevación:** distancia vertical entre un punto o un nivel de la superficie de la tierra, o unido a ella, y el nivel medio del mar.

**Elevación del aeródromo:** elevación del punto más alto del área de aterrizaje.

**Error RMS:** error cuadrático medio o *Root Mean Square* que es una cantidad que indica la desviación de una variable aleatoria a partir de un valor estándar aceptado como válido.

**Estéreoopar:** un par de fotografías mostrando ambas el mismo objeto desde un punto diferente pero muy cercano, de tal manera que cuando las dos se encuentran juntas un ojo observa una imagen y el otro observa la parte correspondiente de la otra fotografía. El resultado es un efecto tridimensional aparente.

**ESRI:** Environmental Systems Research Institute.

**FID:** Feature IDentification.

**Formato MXD:** formato del archivo de un mapa guardado desde ArcGIS para almacenamiento en disco.

**Fotogrametría:** la ciencia que determina las dimensiones físicas de los objetos a partir de mediciones sobre imágenes (usualmente fotografías).

**Geoidal:** objeto de forma casi esférica que puede tener uno o más achatamientos, como la Tierra, por lo que a esta geometría se le denomina geoide.

**Geoide gravimétrico mexicano (GGM):** es un modelo digital de altura geoidal de alta resolución que cubre la región  $14^{\circ}$  a  $33^{\circ}$  de latitud norte y  $86^{\circ}$  a  $119^{\circ}$  de longitud oeste, desarrollado por el INEGI.

**Geoide:** superficie equipotencial en el campo de gravedad de la Tierra que coincide con el nivel medio del mar (MSL) en calma y su prolongación continental. Nota.- El geoide tiene forma irregular debido a las perturbaciones gravitacionales locales (distribución desigual de masa en la Tierra, mareas, salinidad, corrientes, etc.).

**Georreferenciación:** posicionamiento con el cual se define la localización de una imagen en un sistema de coordenadas y datum determinados. Esto se hace con un mapa u otro tipo de cartografía, asignándole así una referencia sobre la Tierra.

**GNSS:** acrónimo de Global Navigation Satellite System, utilizado para denominar al conjunto de sistemas de posicionamiento satelital e incluye a los actuales GPS y GLONASS, y al sistema de la Unión Europea, actualmente en desarrollo, GALILEO.

**GRS80:** Geodetic Reference System 1980.

**ID:** IDentificación.

**Interferometría:** técnica que utiliza el patrón de interferencia creado por superposición de dos o más ondas con un desfase en la longitud de una de éstas, para hacer mediciones.

**INEGI:** Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

**ITRF92:** International Terrestrial Reference Frame, 1992.

**Levantamiento aéreo:** campaña en la que las fotografías aéreas son la fuente principal de datos.

**LIDAR:** Light Detection and Ranging. Medición de distancias por detección de luz.

**Marcas fiduciales:** el plano focal de cada cámara aerofotográfica incluye de 4 a 8 puntos de referencia, conocidos como marcas fiduciales. Éstas son posiciones medidas de manera precisa en el marco de exposición de cada fotografía y sirven para representar un marco de referencia de fotocoordenadas  $X, Y$ .

**Metadatos:** datos respecto a datos (ISO 19115). Nota: Datos que describen y documentan datos.

**OACI:** Organización de Aviación Civil Internacional.

**Obstáculo:** todo objeto fijo (ya sea temporal o permanente) o móvil, o partes del mismo, que esté situado en un área destinada al movimiento de las aeronaves en la superficie o que sobresalga de una superficie definida destinada a proteger a las aeronaves en vuelo.

**Ondulación geoidal:** la distancia del geoide por encima (positiva) o por debajo (negativa) del elipsoide matemático de referencia.

**Ortoimagen:** imagen aérea que fue corregida geométricamente, compensando los errores introducidos por la cámara, la variación en el apuntamiento durante el vuelo y la diferencia de alturas del terreno y que representa una proyección plana de una porción del terreno o una superficie.

**Ortomosaico, Mosaico ortorectificado:** acomodo secuencial de imágenes en el cual cada una de ellas muestra solamente una parte de una región, puestas de tal manera que cada punto en la región, aparece una y solo una vez en el ensamble. Siendo una representación plana del terreno que mantiene una escala uniforme a lo largo de toda su superficie.

**Planimetría:** representación a escala de los detalles del terreno sobre una superficie plana prescindiendo de su relieve y que se representa en una proyección horizontal.

**Punto de control geodésico:** es un punto geométrico obtenido a partir de una referencia bien conocida (red geodésica), cuya localización en el terreno ha sido determinado a través de un proceso que tomó en cuenta las características físicas de la tierra.

**Receptor GPS geodésico:** receptor satelital capaz de corregir su posición a partir de las correcciones diferenciales obtenidas de una base colocada en un punto geodésico con coordenadas precisas expresadas en un marco de referencia geocéntrico o global. El error de posición es de centímetros o milímetros.

**RGNA:** Red Geodésica Nacional Activa. INEGI, México.

**RINEX:** Receiver Independent Exchange format. Formato de intercambio de archivos independiente del receptor.

**SENEAM:** Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano.

**Shapefile o shape:** es un archivo informático propietario de datos espaciales desarrollado por la compañía ESRI, actualmente convertido en formato estándar, para el intercambio de información geográfica. Formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos.

**SIG:** sistema de información geográfica.

**WGS84:** Word Geodetic System 1984.