



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**ADQUISICIÓN DE IMÁGENES AÉREAS DIGITALES SU
PROCESAMIENTO, APROVECHAMIENTO A TRAVÉS DE
FOTOGRAFÍA AÉREA DIGITAL Y HERRAMIENTAS SIG.**

**INFORME ACADÉMICO POR ACTIVIDAD PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA
P R E S E N T A :
MIGUEL ÁNGEL RAMÍREZ BELTRÁN**

Asesor de Informe: Biol. Armando Peralta Higuera



México, D.F.

Diciembre de 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicada a mis padres

María Luisa Beltrán Palomares y Ceferino Ramírez Salazar

AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de formarme no sólo profesionalmente, sino también como persona.

A la Facultad de Filosofía y Letras por haberme formado y enseñado la importancia de mi profesión.

Al Instituto de Geografía por darme un lugar para desarrollarme y aprender constantemente.

Agradezco ampliamente a mi director de tesis, **Biólogo Armando Peralta Higuera**, por haber guiado este trabajo tan certeramente y especialmente por su amistad, por compartir conmigo los conocimientos, los proyectos y el gusto por la fotografía aérea. Por su apoyo y confianza en mi trabajo.

A mis sinodales quienes enriquecieron este trabajo con sus valiosos comentarios:

Dr. Raúl Aguirre Gómez. Gracias por brindarme sus conocimientos sobre Percepción Remota.

Dr. Jorge Prado Molina. Por su amistad y ayuda en todo momento mientras escribía mi tesis.

Dra. Irasema Alcántara Ayala. Por su paciencia y asesoría que me incentivaron a concluir este trabajo.

Mtro. José Antonio Quintero Pérez. Su tenaz ayuda y apoyo a mi trabajo dentro del LAGe han sido muy valiosos.

A todos ellos por su amistad.

A mis compañeros y amigos de trabajo: Leslie Caballero, Paulina Sigüenza, Juan Ruiz, René Ramos, Moisés Zamora, Rogelio Santacruz, Mayeli Hernández, Alberto Rico, Ana Rosales, Luis Ramírez, René Mandujano.

Al INEGI y la SEDENA, porque a pesar de las dificultades siempre permiten que pueda realizar mi trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. PERFIL DEL INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM	5
1.1 Laboratorio de Análisis Geoespacial, LAGe	7
CAPÍTULO 2. ORGANIZACIÓN DE LEVANTAMIENTOS DE FOTOGRAFÍA AÉREA DIGITAL	11
2.1 Requerimientos del Inventario de Áreas Verdes del Distrito Federal (IAVDF)	11
2.2 Descripción de los métodos empleados	13
2.2.1. <i>Sensores</i>	14
2.2.2. <i>Calibración del sensor</i>	19
2.2.3. <i>Plataformas</i>	21
2.2.4. Delimitación de la zona de estudio y parámetros del levantamiento	25
2.2.5. Líneas de vuelo	26
2.2.6. Sobreposición entre líneas	27
2.2.7. Tamaño de pixel / altura de vuelo	30
2.3 Acciones previas al levantamiento de foto aérea	30
2.4 Acciones durante el levantamiento de foto aérea	31
CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTOS PARA LA ORTOCORRECCIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS DIGITALES Y LA FORMACIÓN DE ORTOMOSAICOS	33
3.1. Procesamiento de las fotos aéreas	33
3.2. Incorporación de la banda infrarroja	34
3.3. Ortocorrección de imágenes	37

CAPÍTULO 4. IMPORTACIÓN AL SIG.....	56
4.1 Uso del mosaico ortocorregido para extraer información de áreas verdes.	57
4.2 Creación y actualización de los polígonos de las áreas verdes.	60
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	65
5.1 Experiencia profesional.....	65
5.2 Técnicas aprendidas.	65
5.3 Utilidad y aportaciones de los levantamientos de foto aérea para el IG y el país.	68
5.4 Que cambios han generado en mi persona y como profesionalista	70
BIBLIOGRAFÍA.....	71

INTRODUCCIÓN

En nuestros días existen diferentes caminos para obtener información cartográfica, medios de observación terrestre, maneras de analizar la información, cada una con sus respectivas ventajas y desventajas; sin embargo, la curiosidad e interés del hombre por ver en su totalidad el terreno que habita tiene mucho tiempo. En la segunda mitad del siglo XIX se tomaron las primeras fotografías desde un globo que mostraban la ciudad de París. A partir de este momento se dieron grandes avances tecnológicos en la teledetección u observación remota, en la medición (técnicas fotogramétricas), en la fotografía y en la aeronáutica, dando lugar a los satélites y la fotografía aérea como la conocemos hoy.

El Informe Académico de Actividad Profesional que a continuación presento, tiene por objeto dar cuenta de mi experiencia a lo largo de mediocres años realizando campañas de fotografía aérea digital aplicada a diferentes proyectos dentro del Instituto de Geografía (IGg) de la Universidad Nacional Autónoma de México, que desde 1997 ha generado su propio material con cámaras digitales de pequeño formato.

Buscaré proporcionar un informe técnico que permita comprender el proceso para levantar una campaña de foto aérea y la metodología usada para obtener fotos que sirvan en la construcción de mosaicos ortorrectificados a partir de imágenes digitales y a su vez, se pueda alimentar un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Cabe mencionar que he trabajado en el Laboratorio de Análisis Geoespacial del Instituto de Geografía en la realización de más de veinte levantamientos aéreos y en el aprovechamiento de las imágenes obtenidas, pero desde el año 2000, cuando esta unidad se denominaba Laboratorio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, participé en decenas de proyectos como especialista en el manejo y programación de varios paquetes, como ArcGIS, ILWIS y ENVI. En todos esos casos, fui invitado a participar por los

responsables de los proyectos y me he dedicado de tiempo completo, siendo ésta mi actividad profesional principal. Como un ejemplo de mi integración a las actividades del Instituto a lo largo de todos estos años, cabe mencionar que soy la única persona autorizada para operar el escáner de gran formato utilizado para digitalizar cartografía, que se encuentra en la Biblioteca Antonio García Cubas del Instituto, a pesar de que no me desempeño como parte del personal de base o académico, sino como participante en proyectos de ingresos extraordinarios. También he trabajado en proyectos con empresas privadas en temas relacionados con mi carrera y mi especialidad.

Para este trabajo me basaré en los métodos de fotogrametría digital desarrollados en los últimos años. La fotogrametría es una técnica para conseguir mediciones (propiedades geométricas) confiables de objetos a partir de fotografías.¹ La utilización de barredores, ha permitido la transformación de imágenes aéreas convencionales a imágenes digitales utilizando este material para realizar procesos fotogramétricos de manera digital. La fotogrametría digital permite derivar información de relieve del terreno y a su vez poder generar productos cartográficos más precisos, por eso es uno de los métodos más rápidos y manejables utilizados actualmente.

También el uso de computadoras ha representado un gran avance al contar con equipos con mayores capacidades o programas con los que se pueden realizar los procedimientos que anteriormente se hacían con herramientas analíticas. La creciente necesidad de muchos investigadores de diversas disciplinas, así como los avances en computación gráfica dieron la pauta para la creación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) a mediados de los años 60's. Los SIG's son sistemas informáticos diseñados para la solución de problemas como los catastros, la administración de recursos naturales, el análisis urbano, ordenamiento territorial, ubicación de zonas industriales, comerciales, redes de servicio e infraestructura, medio ambiente, agricultura, usos militares y muchos más. Los productos cartográficos finales tienen usos y beneficios en diversas áreas de forma inmediata, pero al mismo tiempo se pueden emplear como base de comparación para infinidad de estudios multitemporales.

¹ Ron Graham, Roger E. Read, *Manual de fotografía aérea*, Barcelona, Edit. Omega, 1990, p. 12.

La variabilidad espacial y temporal en que se manifiestan los fenómenos físicos y sociales dificulta la adquisición de información actualizada y de calidad, lo que nos obliga a buscar alternativas que sean más rentables tanto económica como tecnológicamente de manera que se cumplan las expectativas de los proyectos o de los usuarios. En este sentido, la fotografía digital con cámaras de formato pequeño le ha permitido al IGg obtener material de forma inmediata para su almacenamiento, interpretación y análisis.

Justificación

Procuraré dar a los posibles lectores un informe que les permita entender el proceso de una campaña de fotografía aérea, su organización, la metodología usada para procesar las imágenes, la construcción de mosaicos ortorrectificados a partir de imágenes aéreas digitales y dar ejemplos de los diversos usos y utilidad de este trabajo. Agregado a ello presentaré algunas definiciones que complementen este análisis. Del mismo modo evaluaré de manera crítica, los beneficios e inconvenientes que puedan presentar las técnicas empleadas, así como la experiencia y conocimientos que me ha dejado este trabajo, tanto en lo profesional como en lo personal.

Considero importante desarrollar estos temas porque los productos cartográficos finales son de mucha utilidad para investigadores de diversas áreas, empresas y gobierno; por lo tanto es indispensable que se forme personal en esta área, ya sea dirigido a la docencia, o bien, en proyectos prácticos.

Objetivos

El objetivo general de mi Informe de Actividad Profesional es demostrar mi dominio de las técnicas para llevar a cabo un levantamiento de campaña de fotografía aérea, así como el correcto manejo de los conceptos usados en esta área de la Geografía.

Además, al hacer una descripción exhaustiva de los procedimientos de una campaña, el objetivo particular es que mi informe pueda ser usado como una guía para geógrafos interesados en el tema o para quien se quiera acercar a los métodos usados en el Instituto de Geografía.

Metodología

El método consistirá en hacer un análisis y descripción de cada uno de los pasos que realizo para la obtención de material cartográfico a partir de fotografías aéreas, desde la organización de rutas hasta el tratamiento de las imágenes para su interpretación y uso inmediato o posterior.

Para hacer más clara la información, la descripción irá acompañada de un ejemplo real de levantamiento de campaña de fotografía aérea vigente, así como algunas definiciones de conceptos usados dentro del Informe.

Para ello también se revisarán las fuentes bibliográficas necesarias como apoyo para algunas de las explicaciones del proceso de fotografía aérea; por ejemplo, sobre la corrección geométrica de imágenes, calibración de cámaras digitales de pequeño formato y formación de mosaicos ortorrectificados.

CAPÍTULO 1

PERFIL DEL INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

El Instituto de Geografía (IGg) de la Universidad Nacional Autónoma de México se fundó en 1943 en un edificio de la calle de Palma en el centro de la Ciudad de México; luego fue ubicado en la Ciudad Universitaria en 1954; pero fue hasta 1975 que lo situaron en el lugar que hoy conocemos. Desde entonces se ha dedicado a promover, organizar y efectuar proyectos de investigación científica tanto básica como aplicada, así como a difundir el conocimiento geográfico generado. También se ha caracterizado por su interés en valorar el potencial del territorio, los recursos naturales, sociales y económicos con el fin de optimizar su aprovechamiento.

La labor investigadora le ha exigido al IGg mantener contacto estrecho con otras dependencias de la UNAM y con instituciones externas –públicas o privadas- para la realización de proyectos de trabajo conjunto y multidisciplinario con investigadores dedicados a las ciencias económicas, físicas, sociales, etc. Para ello, ha sido necesaria la identificación de temas en los que se requiera análisis geográfico; además de establecer los mecanismos que permitan la discusión de las nuevas investigaciones, la enseñanza de técnicas o la transmisión de nuevo conocimiento; estos medios de comunicación y discusión se encuentran en los seminarios y congresos que se organizan dentro del Instituto.

Asimismo, como parte del compromiso que tiene el IGg con el país y siendo la Geografía una disciplina humanística, existe un acercamiento a los problemas que se enfrentan actualmente; por ejemplo el ordenamiento territorial, la degradación ambiental, la crisis de energéticos,

prevención de desastres, dificultades con el abastecimiento del agua, migración, estructura urbana, el impacto de la actividad turística, entre otros; de ese modo, no sólo se ha ampliado el campo de estudio y aptitudes de los geógrafos, sino que se han creado alternativas para la solución de los mismos brindando asesoría científica, técnica y docente a instituciones de investigación, enseñanza, de servicio público o privado, cuando lo solicitan.

El Instituto de Geografía está organizado en tres departamentos de investigación, un laboratorio, una sección editorial y dos unidades de apoyo académico:

- Departamento de Geografía Económica
- Departamento de Geografía Física
- Departamento de Geografía Social
- Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGe)
- Sección Editorial

Las unidades de apoyo académico son:

- Biblioteca y Mapoteca
- Unidad de tecnologías de la Computación.

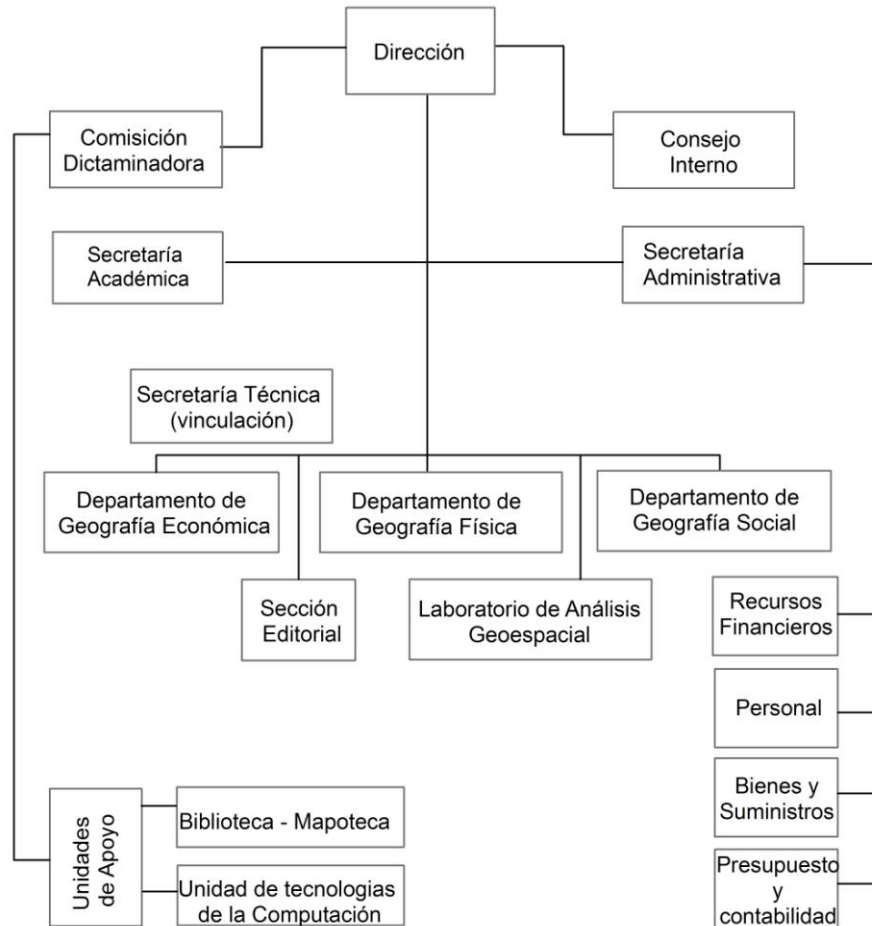


Figura 1. Estructura organizativa del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.

1.1 Laboratorio de Análisis Geoespacial, LAGe

El LAGe es el Laboratorio de Análisis Geoespacial, por medio del cual el IGg ha podido mantenerse a la vanguardia en la investigación y construcción de información cartográfica, fuente de estudio, análisis y trabajo de los geógrafos. En este laboratorio se obtienen imágenes desde diferentes plataformas para luego analizarlas, se crean modelos espaciales y digitales del terreno, se actualiza y corrige cartografía, se aplica y desarrolla tecnología para Percepción Remota (PR) y Sistemas de Información Geográfica (SIG); todo esto destinado a la solución de diferentes problemas ambientales, demográficos o comerciales.

La investigación realizada en el LAGe se enfoca en las áreas de SIG y PR, actividades que particularmente me incumben, ya que el conocimiento generado por estas áreas surge del trabajo que he realizado en este laboratorio, tanto en proyectos propios del IGg como externos. Actualmente las principales líneas de investigación del LAGe están orientadas a la aplicación del análisis espacial a los problemas del ordenamiento ecológico, la degradación de los ecosistemas, las características físicas de los océanos y su relación con la productividad y los patrones climáticos, el desarrollo y estructura urbana, y la prevención y mitigación de desastres. También se dedica a proponer nuevos conceptos y tecnologías para la obtención y gestión de información geoespacial, así como a proporcionar asesoría técnica y científica a dependencias gubernamentales, empresas y al resto de las áreas del Instituto. Participa en proyectos de los tres Departamentos y en iniciativas institucionales, tanto de la dependencia como de la UNAM, a través de sus diferentes capacidades.

Sistemas de Información Geográfica (SIG). Existen muchas definiciones de un SIG, unas enfocadas en su funcionamiento, otras en su composición y otras en sus aplicaciones; sin embargo nos quedaremos con la de Borrough, que lo explica como un “conjunto de herramientas para reunir, almacenar (en computadora), recuperar, transformar y representar datos espaciales del mundo real para un grupo particular de propósitos...”²

Dentro del LAGe, las principales líneas de trabajo que se ha desarrollado en relación con los SIG han sido las de integración de sistemas dedicados a aplicaciones específicas, principalmente en los ámbitos académico y gubernamental, y el Análisis Espacial; es decir, el desarrollo de métodos y técnicas para evaluar las características del territorio y de la expresión espacial de los procesos sociales, económicos, físicos y biológicos. Sin embargo, se impulsan otras líneas que son igualmente importantes, como la Cartografía Digital y Visualización; la Administración de Acervos de Información Geográfica en Red; el Modelado Espacial; y los Sistemas de Soporte de Decisiones Espaciales. Estas líneas de estudio permitirán la presentación de información espacial en línea, la creación de métodos de búsqueda en los

² Para un resumen de las diferentes definiciones que hay de un SIG, ver Montserrat Gómez Delgado, José I. Barredo Cano, *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*, 2ª edición, México, edit. Alfaomega, 2005, p. 2. En este libro los autores sugieren que, ante tantas definiciones, se tome la que más se aproxime al contexto en el que se está utilizando.

acervos, el desarrollo de estándares de documentación y protocolos de intercambio de información, para la integración de redes de servidores con datos geoespaciales, la visualización de procesos espacio-temporales en 2 y 3 dimensiones, el estudio de algoritmos para la representación, modelación y simulación de procesos espaciales y el aprovechamiento de todo ello en la investigación y las aplicaciones propias de la disciplina geográfica.

Percepción Remota (PR). Las actividades de percepción remota se orientan hacia diferentes líneas de estudio:

- **Percepción Remota Marina.** Esta se enfoca en la adquisición y análisis de información de los mares y océanos, principalmente de México; en este caso, se usan principalmente sensores satelitales.
- **Monitoreo de Recursos Naturales.** Se encarga de investigar el estado de la vegetación, agua, atmósfera y detección de recursos minerales por medio de imágenes satelitales y aéreas.
- **Percepción Remota Alternativa.** Dedicada a la investigación y desarrollo de tecnología en cuanto a sensores y plataformas para la obtención de información de la superficie terrestre y sus aplicaciones de forma económica y oportuna, así como al desarrollo e introducción de tecnologías avanzadas, como los satélites pequeños, los barredores LIDAR y las aplicaciones de los GPS.
- **Procesamiento Digital de Imágenes.** Esta es línea de estudio de la Percepción Remota que investiga y desarrolla técnicas o métodos que ayuden a automatizar la extracción de rasgos de las imágenes obtenidas por un satélite o en fotografías aéreas.
- **Recepción de imágenes satelitales a través de la Estación Receptora de Imágenes Satelitales (ERISA) instalada en el LAGe.** Se capturan, procesan, almacenan y distribuyen imágenes GOES, AVHRR y MODIS, de las cuales se extraen entre otras cosas datos de temperatura marina y de superficie terrestre. Se desarrollan proyectos con otras instituciones para el análisis climático, oceanográfico y la detección temprana de plagas, entre otros proyectos.

La actividad que he desarrollado en los últimos dos años dentro del LAGe se enfoca en la PR Alternativa, tomando fotografías aéreas desde avionetas que se rentan para estudios concretos. El trabajo de este grupo ha permitido al IGg tener imágenes de calidad con menores recursos y, sobre todo, incidir en temas de gran relevancia, como el monitoreo anual de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, evaluar inundaciones y deslizamientos tras el paso de huracanes y tormentas tropicales (Paulina, Wilma, Stan, entre otros), participar en la definición y monitoreo de áreas naturales protegidas, evaluar periódicamente el crecimiento del Área Metropolitana de la Ciudad de México y la invasión del Suelo de Conservación, la detección de sitios arqueológicos, el mapeo de numerosas islas mexicanas (independientemente y en colaboración con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas), apoyar la gestión del Campus de Ciudad Universitaria y la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, la determinación de la existencia de la Isla Bermeja y otras más. Este grupo introdujo el uso de la fotografía aérea digital en México en 1997. Fue el primero en utilizar cámaras digitales en el país para levantamientos aéreos y como herramientas experimentales en investigaciones en ingeniería y física, así como en aplicar los métodos fotogramétricos a las imágenes obtenidas con cámaras digitales de formato pequeño. Modifica equipos para la obtención de imágenes infrarrojas y desarrolla plataformas, manuales y automatizadas, para la instalación de sensores en aviones, helicópteros, globos y aeronaves no tripuladas. El IGg ha obtenido aproximadamente 500,000 fotografías aéreas digitales en color y en el infrarrojo cercano desde 1997 a través de 130 levantamientos aéreos y las ha utilizado en más de cien proyectos de investigación básica y aplicada. Paralelamente, el grupo desarrolla instrumentación para uso espacial y sistemas para la integración de satélites pequeños, que se han exportado a otros países. Actualmente forma parte del grupo que coordina las actividades espaciales en la UNAM y trabaja en el desarrollo de un satélite pequeño de percepción remota.

CAPÍTULO 2

ORGANIZACIÓN DE LEVANTAMIENTOS DE FOTOGRAFÍA AÉREA DIGITAL

Ejemplo de aplicación: Actualización del Inventario de Áreas Verdes Urbanas del Distrito Federal, 2010.

Para mostrar con mayor claridad cómo aplico mi formación profesional de geógrafo para contribuir a resolver problemas reales, así como el tipo de habilidades y conocimientos que he tenido que desarrollar, a continuación presento un ejemplo de proyecto real. Éste es representativo del tipo de actividad que he tenido que llevar a cabo en muchos otros, y requirió que yo preparara un informe técnico detallado, que fue parte de los productos entregados. El proyecto de Actualización del Inventario de Áreas Verdes Urbanas del Distrito Federal se llevó a cabo en el LAGe durante 2010, y para cumplir con sus objetivos fue necesario realizar un levantamiento aéreo, producir un mosaico a partir de imágenes ortocorregidas, interpretarlo, generar la cartografía digital por medio de un SIG y expresar sus resultados por medio de un sistema en línea.

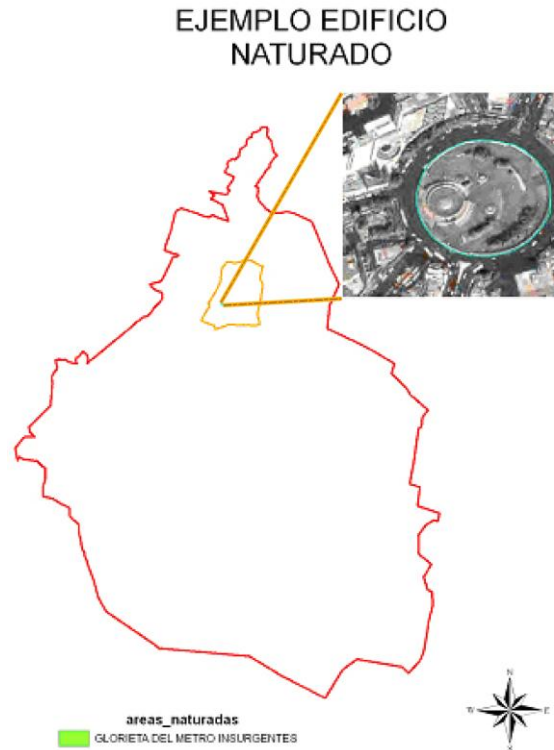
2.1 Requerimientos del Inventario de Áreas Verdes del Distrito Federal (IAVDF).

Como punto de partida, utilizamos inventarios de Áreas Verdes y Barrancas realizados en años anteriores, para los cuales la identificación y clasificación de las Áreas Verdes Urbanas se hicieron con base en imágenes de satélite SPOT-5, así como listados de parques, jardines, plazas, camellones, etc., que nos han facilitado la mayoría de las delegaciones, en coordinación con la Dirección General de Bosques Urbanos y Educación Ambiental, así como

la subdirección de Parques y Jardines del Distrito Federal. Sin embargo, para lograr que esta actualización del Inventario tuviese información más precisa y completa que las anteriores, se decidió tomar en consideración todas las áreas verdes con una superficie a partir de 50m². Esto significa que era necesario utilizar imágenes con una mayor resolución espacial, con un tamaño de píxel que no sólo depende de la superficie de las áreas verdes que se pretendía detectar, sino también de su forma. El área especificada puede corresponder a un cuadrado de 7 por 7 metros, que es detectable en la imagen pancromática de 2.5 metros/píxel de SPOT, aunque tratándose de una imagen en tonos de gris, no es posible distinguirla inequívocamente como un área provista de vegetación, por ejemplo, pasto o arbustos. La imagen multispectral de SPOT, en cambio, permite detectar la vegetación a partir de su color y su rendimiento espectral en el infrarrojo cercano, pero tiene una resolución de 10 metros/píxel (100 m²), es decir, que un píxel es más grande que el área verde mínima establecida, por lo que no es posible definir la forma de las áreas verdes más pequeñas. Por otra parte, la superficie mínima de 50 m² también puede ser la de un camellón de 100 metros de longitud, y 50 centímetros de ancho. También pueden existir casos más exagerados, por ejemplo 250 metros de largo y 20 centímetros de ancho, pero su funcionalidad como área verde es cuestionable. Se determinó que una resolución de 50 cm/píxel era adecuada para identificar visual y espectralmente áreas verdes rectangulares, y también las presentes en camellones, debido a que muestran un patrón lineal identificable, aún cuando los rasgos que representan tengan un tamaño inferior al del píxel. En todo caso, no se esperaba que los camellones estrechos, de menos de 50 cm de ancho, constituyesen una parte importante de las áreas verdes.

Hasta el momento, todas las Áreas Verdes Urbanas del D.F. se han organizado a través de un Sistema de Información Geográfica en cuatro capas de información en formato *shape* de polígonos:

1. Áreas Verdes Públicas
2. Áreas Verdes Privadas
3. Áreas Verdes con Tarifa
4. Áreas Verdes Naturadas (Azoteas Naturadas)



***Figura 2.** Ejemplo de un área verde naturada en azotea, en este caso junto a la glorieta del Metro Insurgentes, ubicada en la delegación Cuauhtémoc. También se puede observar el trazo de dicha glorieta, que muestra la importancia de la resolución para digitalizar los polígonos que forman la base del IAVDF, para definir su forma y cuantificar su superficie.*

La figura 3 muestra un ejemplo de uno de los polígonos digitalizados y cómo es conveniente contar con la banda infrarroja mencionada para discernir mejor los rasgos vegetativos, que en esta banda aparecen en tonos de gris claro cercanos al blanco, en azoteas aledañas a la Glorieta del Metro Insurgentes.

2.2 Descripción de los métodos empleados.

La fotografía vertical se usa para crear cartografía topográfica y temática, hacer mediciones de terreno y espacios, por lo que es importante que reflejen esos datos lo más cercano a la realidad. “Una característica importante de toda prospección aérea es la obtención de una cobertura adecuada con el máximo grado de exactitud, y tan económicamente como sea

posible.”³ En este caso describiré los métodos que hemos estado usando y los sensores que empleé para llevar a cabo la actualización del *Inventario de Áreas Verdes Urbanas del D.F. 2010*.

En un levantamiento de fotografía aérea se busca obtener imágenes verticales, es decir, que el eje óptico de la cámara se encuentre lo más perpendicular al terreno fotografiado; esto se logra cuidando varios aspectos desde la planificación, de acuerdo con el objeto de estudio, el clima, el sensor usado y la plataforma empleada en la campaña. Desde luego también será importante el desempeño, experiencia y conocimiento del operador del avión y del fotonavegante.

En materia de elaboración de ortofotos, mosaicos fotogramétricos y espaciomapas de las Áreas Verdes Urbanas del Distrito Federal, los espaciomapas finales se obtuvieron de las fotografías aéreas tomadas en marzo del año 2010. Las tomas se realizaron los días 27/03/2010, 28/03/2010, 29/04/2010 y 30/04/2010. Estas imágenes son de alta resolución espacial: 50 cm. por pixel, lo que permite, en varios casos, identificar y/o afinar trazos de las Áreas Verdes Urbanas como parte de los productos finales del proyecto.

Para hacer la ortocorrección se marcan puntos de control para asignar atributos geo-espaciales de todas las fotos aéreas. Para este fin se está utilizando la herramienta “OrthoBASE” del programa ERDAS IMAGINE, versiones 8.4 y 9.2; de esta manera se elaborarán los mosaicos aéreos del Distrito Federal y de las delegaciones, como base para las coberturas de las Áreas Verdes Urbanas.

2.2.1. Sensores.

Los sensores son dispositivos capaces de detectar la radiación electromagnética que emiten o reflejan objetos, terrenos, etc., para luego convertirla a un valor físico que pueda ser registrado y procesado. Existen diferentes tipos de sensores remotos; dependiendo del blanco que se tenga, será de más utilidad uno u otro.

³ Ron Graham, Roger E. Read, *Op. cit.*, p. 12.

- Sistemas de adquisición secuencial (SAS). Adquieren información de la escena línea por línea. Se dividen en sensores pasivos y activos; ejemplos de estos sensores son: Radiómetros, radar, LIDAR, sonar.
- Sistemas de adquisición global (SAG). Son capaces de registrar una escena completa de manera instantánea; por ejemplo, cámaras fotográficas, cámaras de video y TV, RBV (LANDSAT).

A esta última categoría pertenecen los sensores CCD (dispositivo de cargas eléctricas interconectadas) y CMOS utilizados por las cámaras digitales. Estos sensores son matrices rectangulares compuestas por millones de foto-detectores, cada uno de los cuales captura información sobre la luminosidad de la parte de la imagen que el lente proyecta sobre él. La cuantía de estos detectores determina la resolución del CCD y el tamaño de su unidad de información, conocido como píxel.

Las cámaras digitales que utilicé en el levantamiento de fotografía aérea correspondiente al *Inventario de Áreas Verdes Urbanas del D.F. 2010* son de formato pequeño y cuentan con una resolución de 24 millones de píxeles en el espectro visible, y de 6 millones de píxeles en el infrarrojo cercano. El término “formato pequeño” se refiere exclusivamente a las dimensiones físicas del sensor y no a las capacidades de estas cámaras. Aún cuando este formato comprende también las cámaras de uso casero, que con los criterios adecuados también pueden usarse en levantamientos aéreos, en el LAGe empleamos cámaras semi-profesionales y profesionales, entre ellas las de mayores capacidades disponibles en el mercado. En este caso, utilizamos el modelo de mayores prestaciones de la marca Nikon, la D3x, para obtener las imágenes visibles, así como un modelo semi-profesional, la Canon Rebel Digital (EOS-300D), que fue modificada en el LAGe para captar imágenes en el infrarrojo cercano (banda de 850 a 1,100 nm).

La cámara que define la resolución útil del levantamiento es la Nikon D3x, porque proporciona el mayor detalle interpretable. Tanto los parámetros del levantamiento, como la orientación interior obtenida de la calibración, que se describen más adelante, se hacen con base en esta cámara. Como los dos tipos de imagen se obtienen con cámaras distintas, es necesario hacerlas coincidir para que los píxeles de ambas representen el mismo punto en el terreno, antes de proceder a la aerotriangulación y ortocorrección. Por ello, las imágenes

infrarrojas se superponen a las imágenes visibles, remuestreándolas para hacerlas coincidir en toda su extensión *dando lugar a una imagen multispectral con cuatro bandas*. Como resultado de este ajuste, la imagen infrarroja pierde sus propiedades geométricas originales y queda incorporada en la visible como un canal adicional, es decir que adquiere la forma geométrica de la imagen visible. Ésta última no se modifica geométricamente, por lo que las distorsiones, desplazamientos y escala siguen siendo las que tenía al momento de la toma. Las fotografías infrarrojas no se utilizan como base puesto que tienen una resolución menor en el terreno (y un número menor de píxeles en el sensor); incorporar las visibles en las infrarrojas resultaría en imágenes con una resolución menor, lo que carece de sentido. La situación ideal sería contar con una cámara infrarroja idéntica o muy similar a la visible, pero por limitaciones presupuestales no ha sido posible modificar una cámara de 24 millones de píxeles, cuyo costo supera los \$100,000 pesos en México.

Tabla 1. *Características técnicas de la cámara Nikon D3x empleada para obtener las imágenes visibles.*

Colores admitidos	Color 36 bits
Tipo de sensor óptico	CMOS
Total de píxeles	25.720.000 píxeles
Resolución eficaz del sensor	24.500.000 de píxeles, 4032 x 6048 píxeles
Tamaño del sensor	24 x 35.9mm
Factor de recorte de campo de visión (respecto de un negativo de 35mm)	1.0
Sensibilidad a la luz	ISO 50 – 6400
Procesador de imágenes	EXPEED
Efectos especiales	Neutro, Vivo, monocromo
Velocidad máxima del obturador	1/8000 seg.
Velocidad mínima del disparador	30 seg.
Velocidad de sincronía X	1/250 de segundo
Medición de exposición	Compensado en el centro, punto, medición matricial de color 3D II
Modos de exposición	Lámpara, automático, manual, prioridad de abertura, prioridad de velocidad
Rango de exposición	EV 0-20
Compensación de exposición	Intervalo ± 5 EV en pasos de 1, $\frac{1}{2}$ o $\frac{1}{3}$ EV
Rango de exposición automática	9 pasos en $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ o 1 pasos EV
Compensación de blanco	Personalizar, automático, preajustes
Preajustes de compensación de blanco	Incandescente, fluorescente, luz del sol, Flash, sombra, temperatura °K o calibrado por el usuario.
Agrupación de balance de blancos	Sí
Formato de imágenes fijas	JPEG, TIFF, RAW + JPEG, NEF (RAW)
Velocidad de toma continua	5 cuadros por segundo
Control remoto	Nikon, conector de diez contactos MC30 y superior
Peso con baterías sin lente	1300 g



Figura 3. Cámara digital Nikon D3x, de 24 millones de píxeles, con un lente gran angular de 35mm (AF Nikkor 35mm f/2 D)

Se utilizó un lente gran angular de 35mm de marca Nikon, (AF Nikkor 35mm f/2 D), que proporciona un ángulo visual equivalente al de un lente de 150mm instalado en una cámara aerofotogramétrica de gran formato (23 x 23 cm). Este ángulo visual es el más utilizado, porque proporciona un compromiso adecuado entre cobertura en el terreno, deformación nominal (propia del lente) y altitud del vuelo. Un lente más corto enfatizaría las diferencias en la altura de los objetos representados, pero produciría desplazamientos muy marcados y deformación de las líneas rectas cerca de las orillas, haciendo muy difícil la corrección posterior de las imágenes. Un lente más largo (50 u 80mm), resultaría en una deformación menor, es decir, una mayor precisión posicional en el plano horizontal, pero su uso obligaría a volar a una altitud mucho mayor (entre los 22,000 y los 35,000 pies). Esta altitud es imposible de lograr con los aviones aerofotográficos disponibles en México, y requeriría aeronaves con turbinas y presurizadas.

En la cámara infrarroja, se empleó un lente zoom Canon AF 17-40mm “L” USM, que corresponde a la línea con especificaciones más rigurosas de esta marca. No debe olvidarse

que aunque el cuerpo de la cámara determina la cantidad de píxeles, la durabilidad, la consistencia de la exposición y otras características de operación, el elemento más importante en la calidad de la imagen, es el lente. En este caso, se optó por un lente zoom que tiene una distorsión muy baja, para poder ajustar la distancia focal, es decir, el ángulo del campo visual, para que exceda ligeramente el de la cámara visible y así poder absorber pequeñas imprecisiones en el apuntamiento de ambos lentes. De lo contrario, correríamos el riesgo de tener franjas sin información infrarroja en algún borde de la imagen multispectral.

Tabla 2. Características técnicas de la cámara Canon Rebel Digital (EOS-300D) empleada para obtener las imágenes en el infrarrojo cercano (850-1100nm).

Colores admitidos	Color 24 bits
Tipo de sensor óptico	CMOS
Total de píxeles	6.5 millones de píxeles
Resolución eficaz del sensor	6.3 millones de píxeles, 2048 x 3072 píxeles
Tamaño del sensor	15.1 x 22.7 mm
Factor de recorte de campo de visión (respecto de un negativo de 35mm)	1.6
Sensibilidad a la luz	ISO 100 – 1600
Procesador de imágenes	DIGIC
Efectos especiales	Neutro, Vivo, monocromo
Velocidad máxima del obturador	1/4000 seg.
Velocidad mínima del disparador	30 seg.
Velocidad de sincronía X	1/200 de segundo
Medición de exposición	Compensado en el centro, punto, medición matricial de color de 35 zonas
Modos de exposición	Lámpara, automático programado, manual, prioridad de abertura, prioridad de velocidad, 7 modos de escena
Rango de exposición	EV 1-20
Compensación de exposición	Intervalo ± 2 EV en pasos de 1, $\frac{1}{2}$ o $\frac{1}{3}$ EV
Rango de exposición automática	± 2 pasos en $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ o 1 pasos EV
Compensación de blanco	Personalizar, automático, preajustes
Preajustes de compensación de blanco	Incandescente, fluorescente, luz del sol, Flash, sombra, temperatura °K o calibrado por el usuario.
Agrupación de balance de blancos	Sí
Formato de imágenes fijas	JPEG, TIFF, RAW + JPEG, RAW
Velocidad de toma continua	1.5 cuadros por segundo
Control remoto	Por cable, conector estéreo de 3.5mm
Peso con baterías sin lente	835 g

Las cámaras de pequeño formato pueden instalarse con relativa facilidad en diferentes tipos de aeroplanos y helicópteros para lograr fotografías verticales. Sin embargo, para obtener los mayores beneficios de cada hora de vuelo, es conveniente lograr una serie de condiciones

mínimas, que garanticen la calidad del levantamiento y la obtención de productos finales con la mayor precisión posible.

2.2.2. Calibración del sensor.

Los sensores electrónicos de las cámaras digitales son muy estables y no cambian significativamente su geometría frente a cambios de temperatura y vibración. Generalmente están instalados de manera muy consistente durante la fabricación, pero aunque se trata de cámaras de nivel profesional, diseñadas para un uso continuo en ambientes adversos, para la mayoría de las aplicaciones previstas no se requiere que queden colocados con una precisión de micras en el cuerpo de la cámara. Es importante considerar que para fines fotogramétricos, un desplazamiento de algunos píxeles tiene un efecto notable en la calidad de la ortocorrección y las mediciones realizadas sobre los ortomosaicos. Si consideramos que típicamente un píxel tiene una dimensión física de alrededor de 5 micras por lado, resulta evidente que cambios muy leves en la posición del sensor tienen un efecto importante en la calidad final. Sin embargo, es posible determinar su posición respecto del eje óptico del lente bajo un modelo matemático que permite tener un resultado óptimo, de muy alta precisión. A este proceso se le conoce como calibración de la cámara. Las cámaras digitales en general, son susceptibles a perder esta calibración debido a que se utilizan lentes intercambiables y a que el montaje del sensor no es rígido, por lo que la configuración geométrica del sistema electro-óptico, es decir la relación entre las posiciones del lente y del sensor, puede variar con cambios de temperatura, vibración, desgaste de las bridas de montaje de los lentes (roscados o de bayoneta) y otros factores. Aunque no es común que en las cámaras profesionales el sensor se desplace de su posición original, para su instalación se utilizan piezas con materiales plásticos, tornillos y separadores que no tienen especificaciones de alta precisión, por lo que es posible que en casos extremos ocurra. Por lo tanto, es importante manejar con cuidado la cámara y la lente entre las misiones o bien, volver a hacer la calibración, si es necesario.

Las cámaras digitales de formato pequeño y mediano comercializadas para su uso en levantamientos aéreos, suelen ser cámaras de nivel profesional para uso comercial en las que el montaje del sensor y del lente (sistema lente-sensor) se hace con mayor precisión, utilizando piezas especiales y adhesivos para rigidizarlo. Estas modificaciones, sean hechas por el

fabricante original o por un tercero, resultan en un incremento desproporcionado en el precio de los equipos, por lo que cada usuario debe evaluar muy cuidadosamente si sus requerimientos de precisión justifican este costo, o si es suficiente con calibrar regularmente sus cámaras y tratarlas con cuidado. Las cámaras construidas específicamente para uso aerofotogramétrico utilizan los mismos sensores de las comerciales, generalmente de entre 30 y 60 millones de píxeles, pero instalados en cuerpos rígidos maquinados con gran precisión; en algunas de ellas se utilizan arreglos de varios sensores, o grupos de dos o más cámaras individuales cuyas imágenes son fusionadas digitalmente. Algunos lentes también son versiones modificadas de los disponibles comercialmente. Estos son equipos de muy alta precisión y el fabricante incluye un certificado de calibración, cuya renovación requiere devolver periódicamente el equipo para reajustarlo y recalibrarlo. Para ciertas tareas, como el catastro, las obras civiles y algunos casos de cartografía oficial, es indispensable el uso de este tipo de cámara, cuyo precio es del orden de los cientos de miles de dólares.

Considerando que las técnicas desarrolladas en el Instituto de Geografía tienen el propósito de incrementar la disponibilidad de imágenes aéreas para una mayor cantidad de usuarios, con costos y recursos técnicos accesibles, la estrategia adoptada es utilizar cámaras comerciales de formato pequeño, haciendo la calibración correspondiente y determinando (y haciendo explícito) el nivel de error resultante, con el fin de garantizar que la exactitud sea adecuada para los proyectos en los que se utilizan. Muchas aplicaciones necesitan información temática detallada, que estas cámaras pueden proporcionar adecuadamente, pero no requieren de la máxima exactitud posicional posible, por lo que el uso de estas metodologías las hacen viables técnica y financieramente.

Los parámetros determinados mediante la calibración describen la orientación interior de la cámara e incluyen:

- a) La distancia focal del lente
- b) El punto principal de la cámara (posición del eje óptico en el sensor) y
- c) La distorsión radial del lente

La calibración puede lograrse midiendo las diferencias entre la proyección de la imagen de cualquier objeto, con detalles identificables medidos en tres dimensiones, y la posición de esos mismos puntos en la matriz de la imagen digital resultante. Para ello pueden utilizarse

fotografías aéreas de zonas para las cuales se conoce exactamente la posición X, Y y Z de los rasgos del terreno. Si conocemos los seis parámetros de orientación exterior de la cámara y las dimensiones precisas del sensor (tamaño del píxel y tamaño del recuadro formado por los píxeles que forman la imagen), entonces podemos determinar las diferencias y deformaciones debidas al desplazamiento del eje óptico y a la distorsión radial del lente. También podemos estimar la distancia focal real del lente, ya que la especificada por el fabricante es solamente nominal. Es decir que, un lente de 35mm casi nunca tendrá esa distancia focal precisa, sino una aproximada a ella, como 34.8mm, por ejemplo. Para que este método sea confiable es preciso utilizar al menos dos fotografías aéreas para aplicar los principios de la triangulación, así como el uso de programas especializados, como Orthobase de ERDAS. La calibración también puede hacerse en el laboratorio, tomando fotografías de patrones planos de calibración que consisten en una retícula, de preferencia con las mismas proporciones que las del sensor. En este caso sólo se requiere una imagen, aunque deben hacerse varias réplicas de las determinaciones para diluir los errores de medición. En el LAGe se han desarrollado programas de calibración basados en algoritmos convencionales, y también hemos empleado programas de calibración comerciales como los incluidos en el paquete ENSO Mosaic.

2.2.3. Plataformas.

Como ya mencioné, la condición más importante es la verticalidad del eje de toma –o del eje óptico del sistema-, pues es un requisito indispensable para aplicar el método de aerotriangulación. Para que el material sea aceptable, la fotografía no debe tener una inclinación mayor a 5°; pero en general, se pueden lograr imágenes con sólo 3° o menos de inclinación.⁴

Una fotografía vertical consta de nueve elementos de orientación, seis corresponden a la orientación externa y tres a la interna. Los elementos de orientación externa se dividen en traslacionales y rotacionales; los primeros corresponden al plano, X, Y, Z; y los segundos, ϕ , ω , κ , corresponden a los movimientos de cabeceo, alabeo, guiñada o deriva respectivamente (Ver fig. 1 y 2). Estos movimientos de la aeronave deben minimizarse, ya sea a través de un

⁴ *Ibid.*, p. 11.

vuelo “estable y nivelado” o por medio de mecanismos de orientación y estabilización de las cámaras, conocidos como elementos de orientación interna, los cuales tienen que ver con el manejo de la cámara, por lo tanto es más fácil tener conocimiento y control de ellos; éstos son: la Distancia Principal o Focal calibrada de la cámara, el Punto Principal que se desplaza en (x, y) , así como los coeficientes de deformación radial del lente.

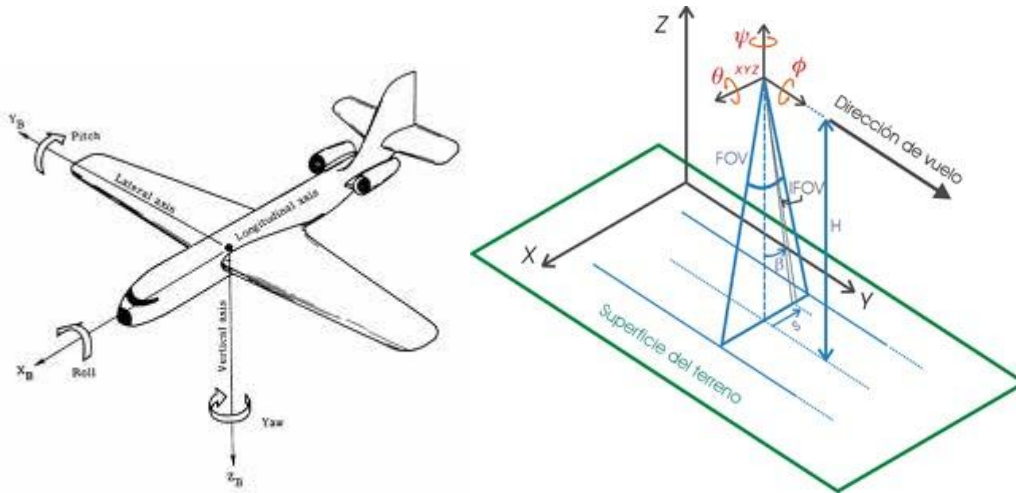


Figura 4. Elementos de la orientación exterior de la cámara; ésta está definida por el ángulo en los tres ejes de giro y por su posición X, Y, Z en una proyección cartográfica y un dátum de referencia. El uso de plataformas estabilizadas puede reducir las desviaciones en los tres primeros.

La deriva o giro de la imagen sobre el eje vertical, se produce cuando el eje de la aeronave no está alineado con la dirección del vuelo debido al viento cruzado; aún cuando no se apliquen métodos fotogramétricos, corregirla durante el vuelo facilita el trabajo posterior en tareas como la construcción de mosaicos no controlados o la interpretación estereoscópica.

Existen otras funciones que deben cumplir las plataformas; por ejemplo, la reducción de la vibración de la aeronave y la protección de las cámaras contra condiciones ambientales extremas de temperatura, humedad, lluvia, polvo e impactos. Para minimizar estos factores, se han desarrollado dentro del LAGe varias formas de instalación de los sensores o cámaras, así como plataformas especializadas que han evolucionado con base en la experiencia y siguiendo criterios de bajo costo, facilidad de construcción, transporte, instalación y control.

En cuanto a la instalación de las cámaras, se ha aprovechando la existencia de registros o herrajes presentes en algunas aeronaves para ubicar en ellos cámaras de formato pequeño; permitiendo la utilización de aviones y helicópteros no especializados; aunque es muy importante no interferir con los sistemas de la aeronave ni alterar su aerodinámica. Algunos aviones pequeños y la mayoría de los helicópteros no especializados están certificados para volar sin una o más puertas, facilitando así la instalación del sensor. A pesar de la apariencia sencilla de estas instalaciones, éstas permiten obtener imágenes de alta calidad y productos métricos con una exactitud aceptable, si el vuelo se realiza adecuadamente. Es de particular importancia evitar el alabeo a lo largo de toda la línea de vuelo y contar con un dispositivo, aún cuando sea manual, para compensar la deriva.

Para tener el control de los sensores durante el vuelo es importante mantener el acceso a las cámaras o contar con dispositivos y programas que permitan manejarlas remotamente. La mayoría de las cámaras actuales permiten el control desde una computadora, así como la transferencia directa de las imágenes al disco duro, al tiempo que se despliegan y registran los datos GPS para la navegación. Del mismo modo, es posible monitorear la cámara desde una pantalla portátil y realizar los disparos por medio de un intervalómetro electrónico, aprovechando la pantalla del GPS y la memoria interna para navegar y guardar el recorrido.

A continuación describiré algunos de los diseños desarrollados en el LAGe para instalar sensores y las consideraciones en que se basan.



Figura 5. *Instalación de las plataformas en helicópteros y aviones pequeños no especializados.*

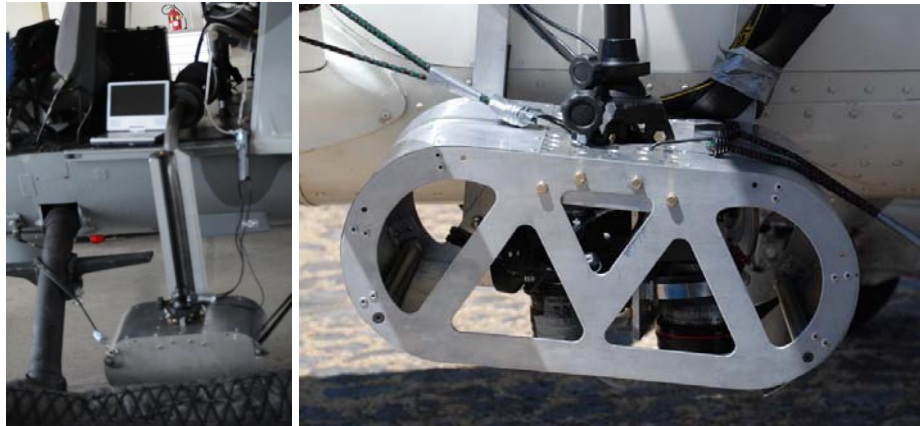


Figura 6. Esta plataforma en forma de cápsula permite la instalación de dos cámaras tipo réflex, con o sin estabilización. La base que sostiene a las cámaras cuenta con amortiguación con resortes y material viscoelástico, y la orientación puede lograrse remotamente por medio de actuadores eléctricos. También es posible acoplarla a un sistema inercial para estabilizarla automáticamente. Para hacer reversible esta plataforma y reducir el arrastre, se usaron perfiles aerodinámicos idénticos adelante y atrás.



Figura 7. Instalación de varias cámaras digitales en el orificio de un avión adaptado para aerofotografía. En este caso, se colocó una cámara visible independiente (derecha), y un par visible-infrarrojo en una placa común, para garantizar que los dos lentes siempre apunten en la misma dirección, aún cuando las cámaras se desmonten en repetidas ocasiones. Esta placa se instala también en los contenedores externos junto con una articulación esférica multidireccional.

Para contener las cámaras, se puede utilizar un marco cuya orientación se ajusta de modo aproximado estando en tierra. Ese marco o caja se sostiene por una pieza de tubo doblado y se amortigua con unos cilindros de neopreno que absorben casi por completo la vibración de baja

frecuencia del rotor. El marco que sostiene el sensor gira sobre el eje del tubo para compensar el cabeceo, que es particularmente marcado y continuamente variable en los helicópteros (Ver figura 9).

Se han desarrollado varios tipos de contenedores que se colocan en el extremo del tubo, o en soleras reforzadas en forma de gancho que se cuelgan de las ventanas o de los esquís de helicópteros para su fijación a la aeronave. El diseño y la construcción de éstos ha evolucionado y se han incorporado mejoras sucesivas en el Laboratorio. La versión más reciente sirve para instalar dos cámaras (visible e infrarroja), tiene un perfil aerodinámico simétrico de bajo arrastre y control de orientación en tres ejes por medio de una sola palanca, con un solo punto de apoyo basado en una articulación esférica (ver figuras 10 y 11). En versiones previas se utilizaron sistemas de varias palancas para corregir alabeo, cabeceo y deriva desde el interior de la aeronave, pero eran pesados y mecánicamente complicados, por lo que se remplazaron con este sistema, que permite corregir los tres ejes con una sola palanca. Se diseñó para ser instalada rápidamente y de forma segura en aeronaves no especializadas sin necesidad de hacer modificaciones. El control de las cámaras y el almacenamiento de datos se hacen desde el interior de la aeronave. Actualmente se prepara la documentación para someterla a aprobación por parte de las autoridades aeronáuticas (DGAC). Para ello es necesario realizar planos y cálculos detallados que demuestren que no se compromete la seguridad de la aeronave o de las personas en tierra.

Otro tipo de plataforma desarrollada en el LAGe es aquella con control de orientación en tres ejes, estabilizada por medio de un sistema inercial integrado por giróscopos, acelerómetros y sensor electrónico de deriva. Las pruebas del prototipo mostraron un funcionamiento adecuado de los circuitos y programas de control, capaces de mantener el apuntamiento con precisión de 0.1° en alabeo y cabeceo. Esta plataforma se diseñó para aeronaves especializadas, con orificio en el piso, pero puede modificarse para su aplicación en plataformas externas.

2.2.4. Delimitación de la zona de estudio y parámetros del levantamiento.

La delimitación del levantamiento de fotografía aérea se hizo tomando en cuenta los límites delegacionales con una tolerancia que permitiera cubrir completamente su territorio: 7 km. en la parte norte, 3 km. en el este, 3 km. al oeste y 5 km. al sur. El área rectangular se encuentra

comprendida entre las siguientes coordenadas: esquina superior izquierda en $x=461500$, $y=2173000$; esquina inferior derecha $x=508115$, $y=2100000$. Las coordenadas están referidas a la zona 14 (Ver fig. 1.).

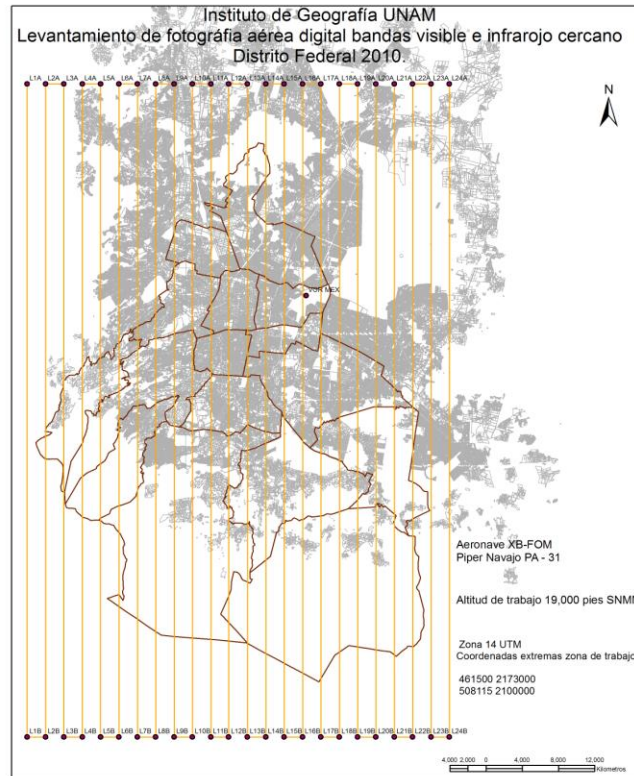


Figura 8. Plan de vuelo sobre el Distrito Federal seguido en los levantamientos aéreos de 2010. Consiste en una parrilla de líneas paralelas que garantizan una sobreposición lateral mínima del 30% entre fotos adyacentes.

2.2.5. Líneas de vuelo.

El diseño de las líneas de vuelo se hizo utilizando un software desarrollado por el Instituto de Geografía (Ver fig. 13), que calcula la distancia entre línea y línea y el traslape entre fotos, así como el tamaño del pixel de acuerdo a la altitud de vuelo, con diferentes tipos de cámaras y lentes. Las coordenadas obtenidas se introdujeron en un navegador GPS (Global Positioning System) marca Garmin GPS60Cxs por medio del programa MapSource, de la misma compañía (Ver fig. 14). Este aparato utilizado para la navegación durante el levantamiento,

indispensable donde existe una gran diferencia entre las zonas altas y las bajas del levantamiento.

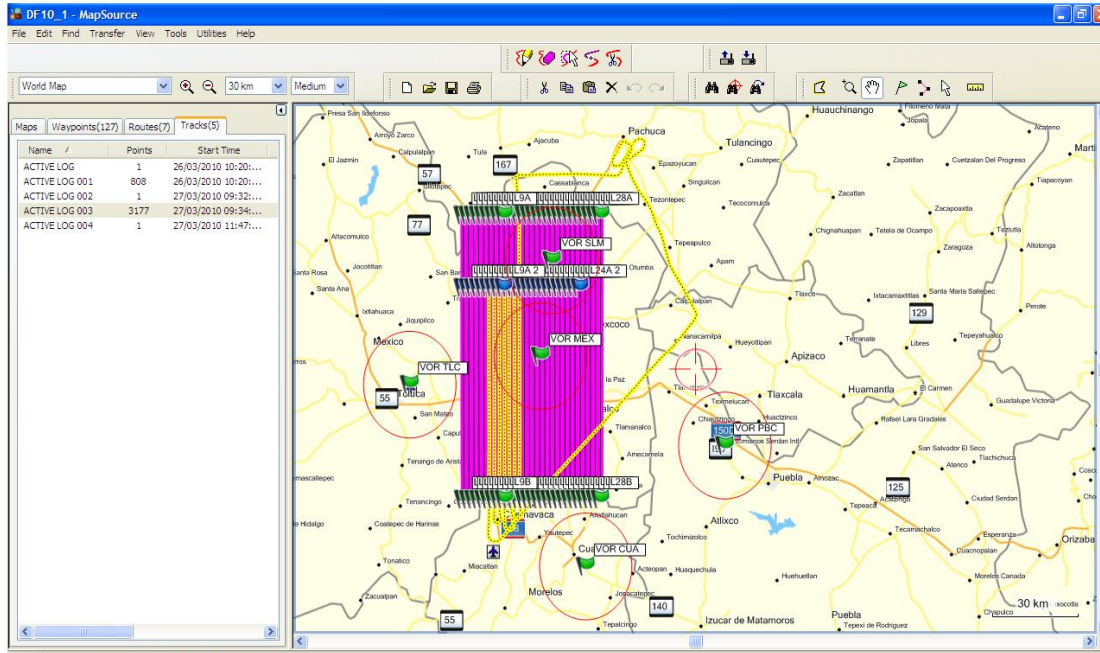


Figura 10. Plan de vuelo introducido en el programa utilizado para intercambiar la información con el navegador GPS Garmin. En amarillo aparece el recorrido registrado por el GPS durante un día de trabajo. Los círculos muestran la posición del VOR (radiofaro) de los aeropuertos de Ciudad de México, Puebla, Toluca y Cuernavaca, para proporcionar información sobre la distancia entre éstos, las líneas de vuelo y la aeronave, cuando sea solicitada por el Centro México de Control Aéreo.

En el caso del Distrito Federal hay diferencias importantes (2,300 a 3,500 metros SNMM), pero el objetivo de este levantamiento son las zonas bajas donde se encuentra la mayor parte del área urbana. En las montañas se obtuvo una resolución (escala) mayor y fue necesario reducir el intervalo entre imágenes, resultando en una mayor cantidad de éstas, pero siempre con las superposiciones mínimas de 60 y 30%, por lo que son perfectamente utilizables. Pueden tratarse como un levantamiento separado para otros estudios, o degradar su resolución para incorporarlas en un mosaico de todo el territorio de la entidad.

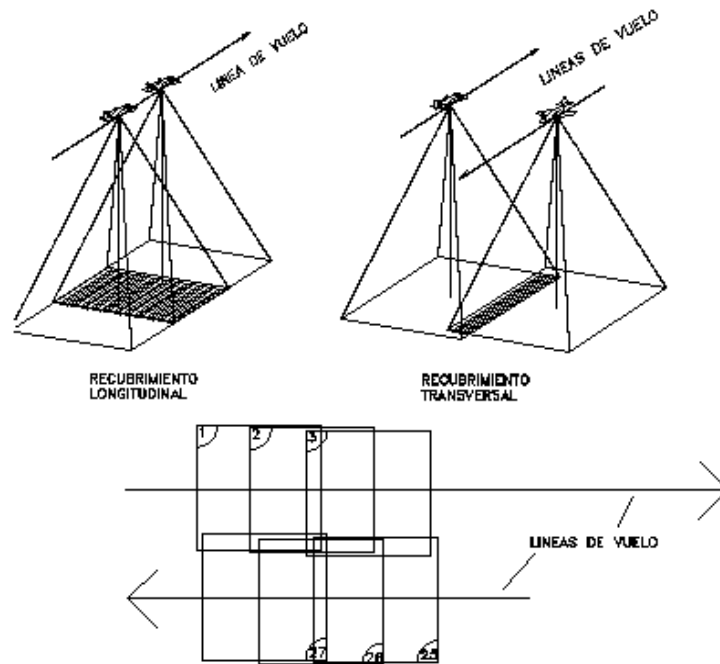


Figura 11. Sobreposición longitudinal y lateral de un levantamiento aéreo.

Tabla 3. Modelos de cámaras digitales utilizados por el LAGe desde 1997 y aumento de la resolución en el terreno para una misma cobertura. Se agrupan arriba las cámaras visibles y abajo las infrarrojas.

Cámara	Año	Cantidad de píxeles (millones de píxeles)	Tamaño de píxel en el terreno @ 1,770 x 1,140 m por imagen (m/píxel).
Kodak DCS 420 color	1997	1.54	1.12
Nikon D1	2000	2.66	0.85
Nikon D1X	2003	6.00	0.60
Kodak DCS 14n Pro	2005	14.21	0.40
Nikon D2X Lente Nikkor 24mm	2006	12.40	0.40
Nikon D2X Lente Zeiss 25mm ZF	09-11	12.40	0.40
Canon EOS 1DS Mark II	2009	16.61	0.30
Nikon D3x Lente Nikkor 35mm	09-11	24	0.29
Kodak DCS 420 monochrome (IR)	99-01	1.542	1.12
SONY DSC-F707 (IR)	02-05	4.91	0.80
Canon EOS Rebel Digital (IR)	06-11	7.96	0.55

2.2.7. Tamaño de pixel / altura de vuelo.

El cálculo de la altitud del vuelo fue de 19,000 pies sobre el nivel medio del mar (5791.2 metros), considerando que las elevaciones en el Distrito Federal oscilan entre 2300 y 3500 metros. Cuando se vuela a altitudes superiores a los 11,000 pies, es indispensable el uso de máscaras de oxígeno suplementario, ya que en general se rentan aeronaves no presurizadas. Como referencia para mostrar las ventajas en resolución que proporciona el avance en las características de las cámaras, en la tabla 3 se muestran los modelos y resoluciones que ha utilizado el LAGe desde que introdujo en México el uso de cámaras digitales para realizar levantamientos aéreos, mucho antes de que estuviesen disponibles en el mercado las cámaras digitales desarrolladas específicamente para aerofotografía. El aumento en resolución ha ido acompañado de una disminución de los precios.

2.3 Acciones previas al levantamiento de foto aérea.

Antes de realizar el vuelo para levantamiento de fotografía aérea, es importante considerar varios aspectos como son los permisos y la revisión del equipo, para garantizar su buen funcionamiento, la obtención de material útil y la seguridad de las personas que están en tierra.

La Dirección General de Geografía y Medio Ambiente del INEGI es la encargada de otorgar el permiso para hacer vuelos de fotografía sobre el territorio de nuestro país; por eso se debe enviar una solicitud que indique cubrimiento, líneas de vuelo planeadas para el proyecto, nombres de los tripulantes, así como el modelo y características de la aeronave. Posteriormente, la misma institución responde con un número de autorización, que cuenta con 74 días de vigencia.

Algunas condiciones establecidas por INEGI son:

1. Reportar oportunamente el vuelo al servicio de control de tránsito aéreo y activar el código transponder.
2. Llamar tres días antes del vuelo a la Dirección General de Cartografía de la Secretaría de la Defensa Nacional para que ésta asigne un elemento que supervise la aeronave, el equipo y a la tripulación desde tierra. También deben avisar al término del programa, al Centro de Mando y Control del Sistema Integral de Vigilancia Aérea (S. I. V. A.), especificando los horarios y áreas de reconocimiento.

3. Reportar a la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente del INEGI la fecha, hora y aeropuerto donde se iniciará el vuelo.
4. Está prohibido sobrevolar y tomar fotografías de instalaciones militares.
5. La Dirección General de Geografía y Medio Ambiente debe tener el nombre, domicilio y teléfono del encargado del vuelo, mismo que custodiará los datos adquiridos.
6. La altura y orientación del vuelo debe corresponder a lo estipulado en la solicitud del permiso.
7. Se deben entregar dos copias del material obtenido a la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, además de un informe detallado del vuelo en los 60 días siguientes a la realización de éste.

El clima es otra variable a considerar, ya que la nubosidad, la lluvia, la bruma o la turbulencia pueden causar la cancelación del trabajo. Para ello revisamos diferentes herramientas de diagnóstico del tiempo en Internet, como por ejemplo:

<http://www.accuweather.com>

<http://clima.msn.com/>

<http://weather.msfc.nasa.gov/GOES/goeseastconusir.html>

http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=54&Itemid=57

2.4 Acciones durante el levantamiento de foto aérea.

Una vez que el equipo está instalado, asegurado y funcionando, siempre es conveniente verificar que a bordo hay baterías de repuesto, tarjetas de memoria y accesorios que podríamos intercambiar durante nuestra campaña. Es necesario realizar pruebas de disparo de las cámaras y revisar si la calidad de las imágenes es satisfactoria. Entonces podemos comenzar el levantamiento de fotografía aérea digital.

- Una vez que el piloto tramita el plan de vuelo, estamos listos para despegar hacia nuestra zona de estudio. Debemos presentar nuestros permisos al personal de la SEDENA (Secretaría de la Defensa Nacional). Es conveniente llevar siempre copias tanto de permisos como de facturas de las cámaras, que presenten sus características y acrediten nuestra posesión de las mismas.
- Desde el despegue, el GPS debe estar activado, para grabar el track o ruta de vuelo y poder guiarnos hacia nuestra zona de estudio, además que este track nos servirá para poder crear nuestro índice de fotos recolectadas. Previo al vuelo y durante el mismo, es importante coordinarse con el piloto, intercambiando opiniones sobre las posibles contingencias que se puedan presentar, sugerir cuáles líneas levantar primero en caso de que haya nubosidad. Para comenzar el levantamiento se debe observar la altitud de vuelo, la velocidad y dirección de vientos y el tiempo de disparo de las cámaras. Ya en el vuelo, hay que monitorear los tiempos de recorrido.
- Entrando a las líneas, se debe cuidar que las cámaras estén disparando al mismo tiempo y revisar que vaya capturando la sobreposición correcta de algún elemento en el terreno. Otro punto a observar es la alineación correcta; en el caso de no ser así, hay que corregir la deriva o cabeceo que llegara a presentar la aeronave al recorrer nuestra línea de trabajo.
- Examinar continuamente que nuestras cámaras estén grabando imágenes; que las dos cámaras tengan el mismo número de archivos; que se cubran completamente todas las líneas, cotejando con la ruta en el GPS para confirmar que el área quede completamente cubierta.
- Si hay alguna duda respecto a la sobreposición, captura o nubosidad, se tendrá que repetir toda la línea. Una vez que estamos seguros que se realizó correctamente el levantamiento, coordinamos con el piloto para regresar a nuestra base.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTOS PARA LA ORTOCORRECCIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS DIGITALES Y LA FORMACIÓN DE ORTOMOSAICOS

3.1. Procesamiento de las fotos aéreas.

Una vez que se descargan las imágenes de las cámaras, se procede al tratamiento de las mismas; debe hacerse un respaldo de éstas en su formato original, sin ningún tipo de proceso. El tratamiento de las fotos en color consiste en hacer un ajuste de brillo y contraste, así como de color en algunas de sus bandas (Ver figura 16). Para ello se modifica el histograma y además se hace que el valor mínimo de luminosidad tenga un valor de 2 en todas las bandas, para evitar que las sombras en la imagen sean interpretadas por los programas como “fondo” de las imágenes, que los programas tratan como un valor transparente. Este proceso requiere de conocimiento previo de los colores que se aprecian en la foto y de como se observan en la realidad para no exagerar los colores. En algunos casos, si la foto lo amerita, se les corre un gradiente para tratar de compensar los tonos más oscuros con los claros que puedan existir entre fotos de una línea de vuelo y otra. Una de las principales razones por las que existen variaciones en los tonos de las fotos es la iluminación y el grado de inclinación del sol, además de la bruma, la humedad y la contaminación. Con este proceso se tratan de hacer más consistentes los tonos, para que en el producto final, en este caso el mosaico ortorrectificado, no se aprecie un efecto de bandeo o elementos comunes con diferencias muy marcadas en sus tonos. En otros casos, si el terreno es homogéneo, no se hace ningún tipo de modificación.

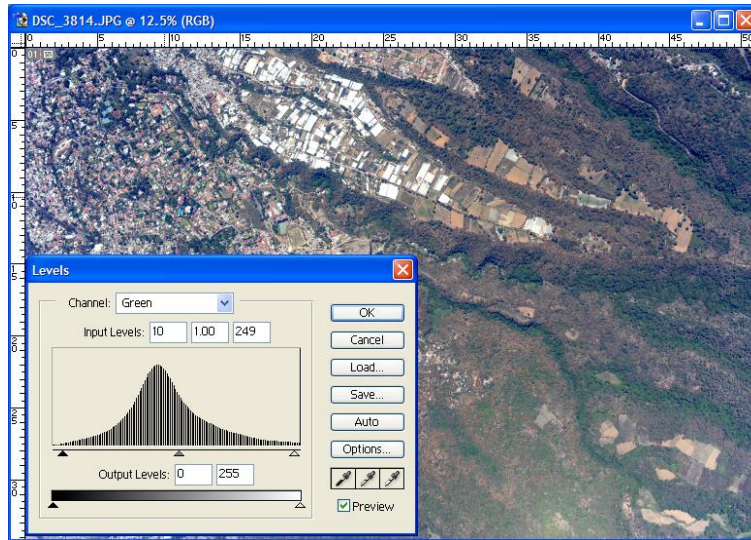


Figura 12. Ajuste del histograma para homogeneizar brillo, contraste y color de las imágenes visibles.

3.2. Incorporación de la banda infrarroja.

Se hace una correlación por fecha y hora de la toma, con el registro del GPS –conocido como ruta o track- para ordenar los archivos por línea de vuelo (Ver figura 17), ya que en otra parte del proceso se tendrán que girar las fotos para su acomodo e integración al proyecto de ortorrectificación.

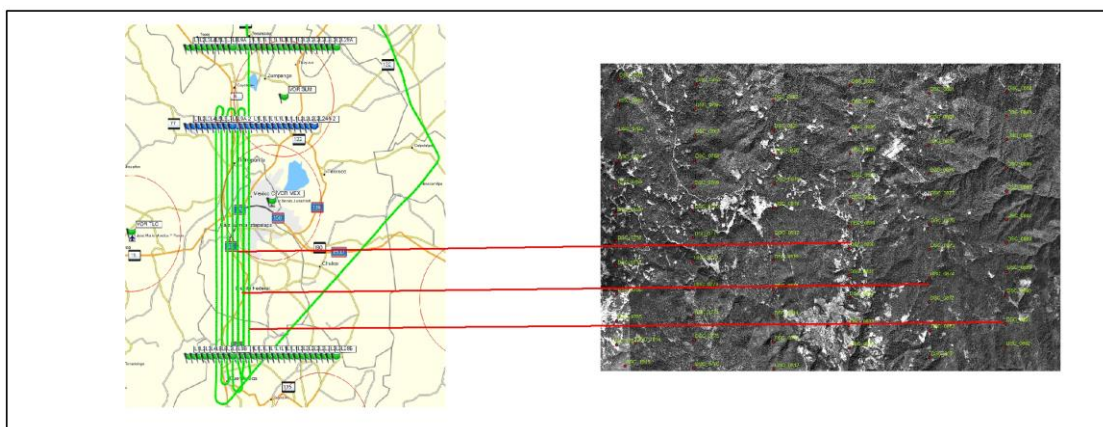


Figura 13. Índice de vuelo de las fotografías (fotoíndice), que muestra la posición de cada una en el terreno. Este archivo facilita su manejo y localización para, entre otras cosas, determinar qué imagen de la cámara infrarroja corresponde a cada foto visible.

Una vez clasificadas las fotos, y conociendo el archivo de la imagen infrarroja que corresponde a cada una, se creó un macro (secuencia de comandos o acciones automáticas) en el programa PhotoShop, al que en este caso denominamos “Registra_DF10”. Este sirve para empatar las fotos infrarrojas con las visibles, guardándolas en un sólo archivo TIF que contiene las cuatro bandas: rojo, verde y azul (RGB), más un canal Alfa que corresponde al infrarrojo. Para ello, cambia las dimensiones y posición de la foto infrarroja, y le aplica una transformación geométrica para hacerla coincidir píxel a píxel.

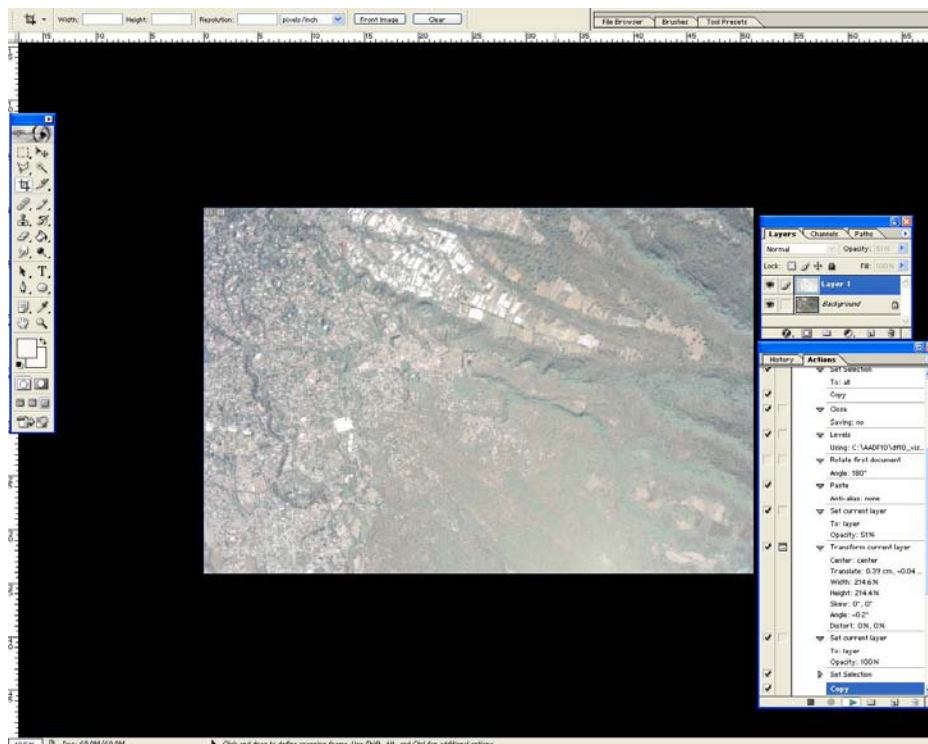


Figura 14. Ejemplo de un macro con comandos (acciones) para hacer coincidir la foto infrarroja sobre la visible. La banda infrarroja se hace semitransparente para visualizar el ajuste entre ambas imágenes.

Acciones:

- Seleccionar la imagen infrarroja
- Convertirla a escala de grises.
- Aplicar un gradiente de luminosidad si es necesario, y ajustar los niveles de brillo y contraste. En este punto puede corregirse el “viñeteado” (oscurecimiento de las esquinas) producido por el lente.

- Rotar la imagen 180° para que coincida con la visible (las cámaras visible e infrarroja van montadas en orientaciones opuestas, para ahorrar espacio).
- Seleccionar la imagen infrarroja y pegarla a la visible. Ajustar la transparencia al 50%
- Activar el comando “**Transform**” para ajustar la infrarroja sobre la visible. Si es necesario, aplicar varios tipos de transformación, de preferencia en el mismo paso. Una vez ajustada, se acepta la transformación.
- Añadir a los canales RGB un nuevo canal “alpha” y copiar en él la imagen infrarroja ajustada. Eliminar la capa que se utilizó para alojar la imagen infrarroja durante la transformación.
- Guardar la imagen en formato TIF (nos referiremos a las imágenes resultantes como “VIR_TIF”). Si es necesario, la imagen se gira 180° de acuerdo con la dirección del vuelo.

Se utilizó también otro macro llamado “Falso_Color_DF”, que reasigna las bandas a los canales de color RGB que utiliza la computadora, para crear una imagen en falso color con la combinación Ir, rojo, verde (el azul se elimina), comúnmente utilizada en el campo de la percepción remota para visualizar la vegetación y los cuerpos de agua. Este macro tiene por objeto verificar que la banda infrarroja esté presente y que se haya registrado adecuadamente con la visible. También se puede utilizar para exportar la imagen en falso color, cuando se requiera.

Acciones:

- Copiar el canal verde y pegarlo sobre el azul.
- Copiar el canal rojo y copiarlo sobre el verde.
- Seleccionar la imagen infrarroja contenida en el canal “alpha” y pegarla en el canal rojo. Eliminar el canal “alpha”.
- Ajustar el histograma de la imagen en falso color resultante. Usar un solo ajuste de histograma para todas las imágenes, con el fin de que para que el resultado sea consistente en todo el levantamiento.

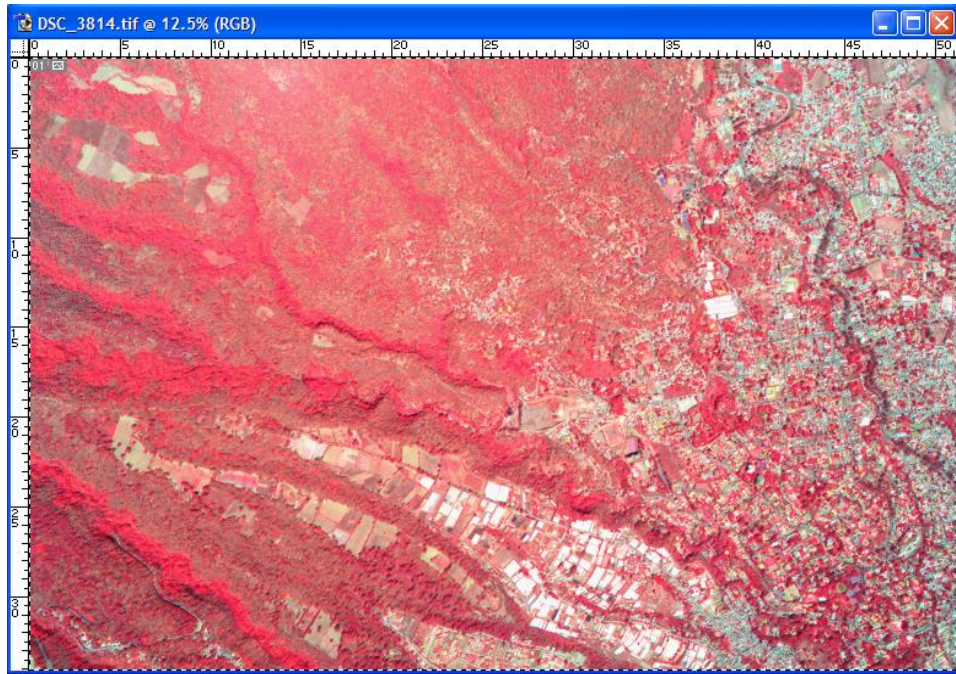


Figura 15. Imagen en falso color, obtenida mediante la reasignación de las bandas infrarroja (canal rojo), roja (canal verde) y verde (canal azul). Muestra la presencia y condiciones de la vegetación en tonos de rojo. En estas imágenes, el único rasgo del terreno que aparece en tonos de rojo, es la vegetación.

3.3. Ortorecorrección de imágenes obtenidas con cámaras digitales de pequeño formato utilizando el módulo Orthobase de ERDAS Imagine.

Aunque pueden servir para identificar rasgos fisiográficos como ríos, lagos, carreteras o pueblos, las imágenes adquiridas, ya sea por medio de satélites o por fotografías aéreas, son imágenes crudas que no cuentan con ningún tipo de referencia espacial, sólo muestran una perspectiva del terreno. Los desplazamientos causados por la inclinación del sensor o por el mismo relieve del terreno son algunas de las razones por la que se debe establecer un método de ortorrectificación de dichas imágenes; sólo de esa manera se pueden establecer escalas constantes, distancias exactas, direcciones correctas y realizar mediciones con precisión.

La elección del método de ortorecorrección depende del sensor con la cual se adquieren las imágenes, ya que estos producen diferentes errores; o bien, de la identificación de las diversas fuentes de distorsión en el momento en que son obtenidas; estas fuentes pueden ser: la orientación del sensor y su velocidad de barrido; errores sistemáticos como el relieve topográfico, la curvatura de la Tierra, la inclinación del eje terrestre o el movimiento de

rotación.⁵ A partir de esto, la ortocorrección que se elija se puede identificar como paramétrica o no paramétrica.

Para hacer una ortorrectificación paramétrica, se debe tener pleno conocimiento de las especificaciones del sensor y de su ubicación (orientación interior y exterior) en el momento de la adquisición de las imágenes; ya que se intenta manipular las fuentes de error geométrico conocidas; es decir los errores sistemáticos ya mencionados. En el caso de los sensores de observación global, la corrección orbital es indispensable, ya sea porque son de baja resolución o porque se dificulta la obtención de Puntos de Control en espacios como el mar, océanos y costas; pero, aunque es un método más automático, se corre el riesgo de obtener imágenes con nubosidad o sin puntos de control confiables, además es común no conocer la ubicación exacta del satélite.⁶ Para las fotografías aéreas, los parámetros geométricos necesarios en relación con la orientación del sensor, se determinan por la información sobre el modelo del sensor, los Puntos de Control (GCP) y los datos de vuelo (posición, velocidad, orientación).⁷

La ortocorrección no paramétrica precisa de una persona que, de manera inductiva, establezca puntos de control (GCP) en las imágenes obtenidas, teniendo como base otra imagen de referencia con coordenadas conocidas o ya establecidas y consideradas como válidas o representativas. Este método resulta más exacto cuando se trabaja sobre zonas en las que los rasgos comunes entre la imagen y el mapa son fáciles de identificar, ya que la calidad de la corrección dependerá “del rigor con que se localicen esos puntos”.⁸ Este proceso consta de tres fases:

1. Localización y establecimiento de puntos de control comunes entre el mapa (imagen de referencia) y la imagen obtenida.

⁵ Okeke, F.I., “Examen de Técnicas de ortorrectificación de imagen digital”, Departamento de Geomática y Topografía, Universidad de Nigeria, campus Enugu, Nigeria, http://www.gisdevelopment.net/technology/ip/fio_3.htm

⁶ Emilio Chuvieco, *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*, Barcelona, Edit. Ariel Ciencia, 2002, pp. 292 y 293.

⁷ Okeke, *Op.cit.*

⁸ Emilio Chuvieco, *Op.cit.*, p. 192 y 293.

2. Cálculo de de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y el mapa o imagen de referencia.
3. Transferencia de los puntos originales a la nueva posición, definida por la transformación previa.

Las funciones de transformación pueden ser proyectivas o por polinomios. En la rectificación proyectiva, es necesaria una transformación entre el plano de la imagen y el plano proyectivo. Para hacer el cálculo de los ocho coeficientes desconocidos de la transformación proyectiva, es necesaria una transformación geométrica entre el plano de la imagen y el plano proyectivo; además es obligatorio tener por lo menos tres GCP en la imagen objeto; sin embargo, entre más puntos se localicen el ajuste será más fino. La transformación proyectiva se puede aplicar a fotografías aéreas de terrenos planos, o a imágenes de fachadas de edificios.

La transformación polinomial consiste en aplicar una función a la superficie y la adaptación de los polinomios a una serie de puntos de control (GCP). Este procedimiento elimina el efecto de inclinación y puede ser aplicado tanto a imágenes de satélite como a fotografías aéreas.

4. Creación del bloque para aerofototriangulación

Los pasos que se siguen son los siguientes:

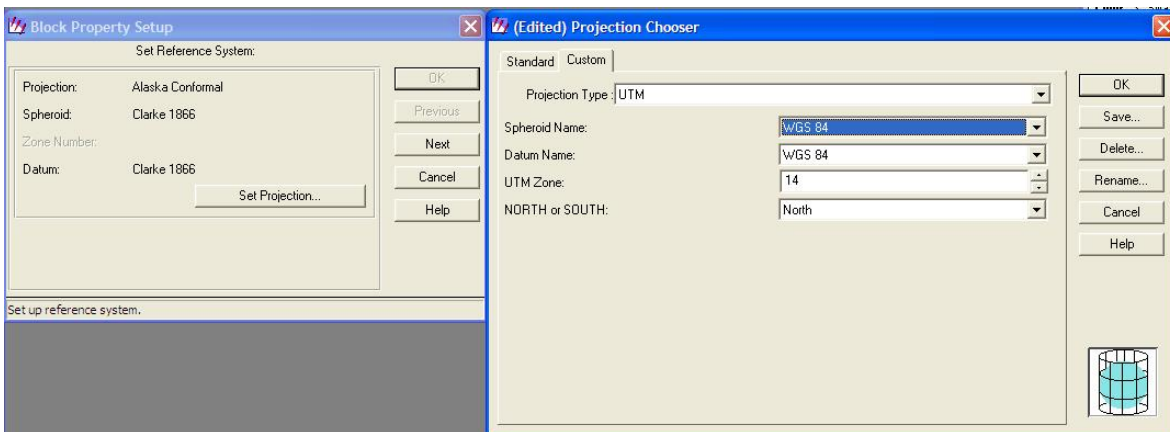


1. Hacer click en el botón “**Orthobase**” de los botones del menú principal. Seleccionar la opción “**Create New Orthobase Project**” y asignar un nombre al proyecto. Este archivo se distinguirá en el directorio de trabajo por su extensión “**.blk**”

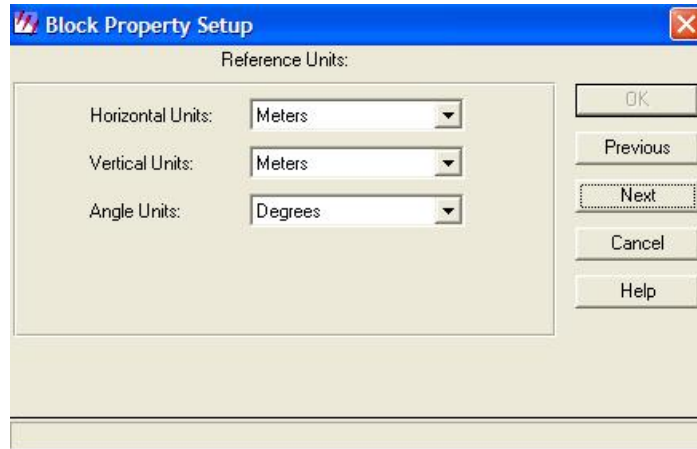


2. En “Geometric model”, seleccionar la opción “Digital camera” y hacer click en “Ok”.

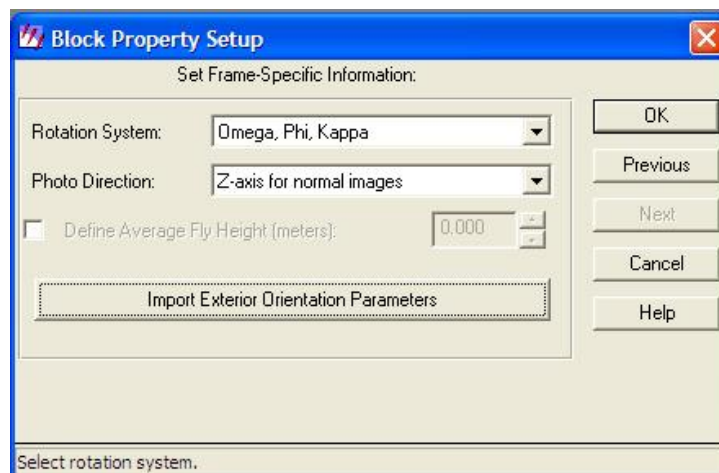
3. En la ventana “Set reference system” que aparece a continuación, seleccionar en caja “Custom” la proyección UTM, el Datum WGS84 y la zona UTM 14 Norte. Hacer click en “Ok” y luego en “Next”.



4. Seleccionar metros como unidades de referencia horizontales y verticales, y grados (“Degrees”) para los ángulos.

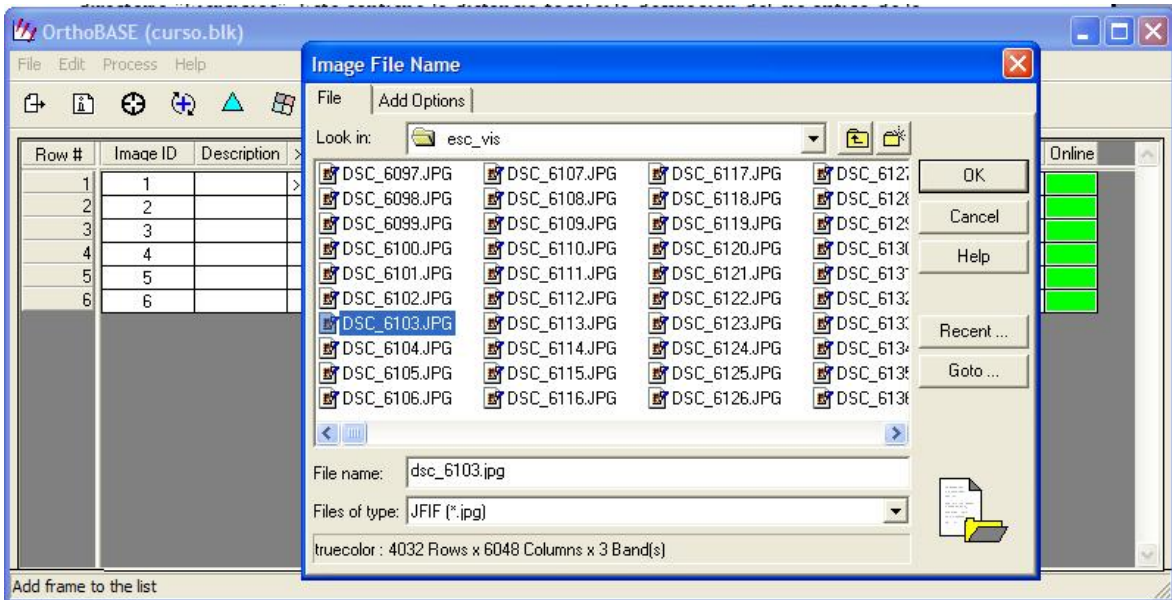


5. Seleccionar la opción “**Omega, Phi, Kappa**” para el sistema de rotación y “**Z-axis for normal images**” para la dirección de las fotos. Esta es la configuración para fotos aéreas verticales. Hacer click en “**Ok**”.



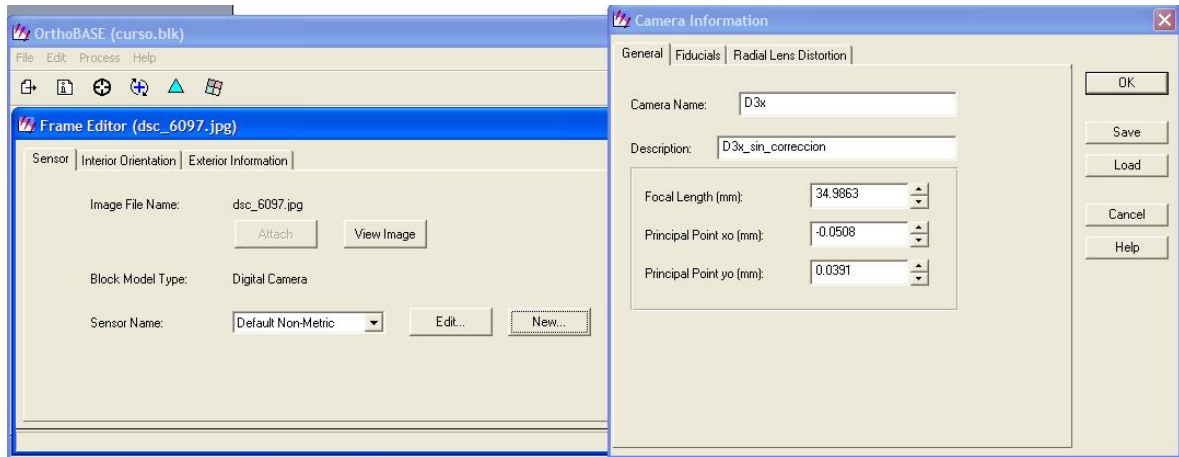
6. En la tabla que aparece, utilizar el icono para agregar fotos (pequeña página con una flecha hacia la derecha) y seleccionar las imágenes. Comenzar de arriba hacia abajo y de la línea izquierda (línea #2) hacia la derecha (Línea #4). Ver archivo “**Guía fotos.jpg**” para ver la ubicación de las imágenes digitales. Utilizar el icono para cada imagen que se introduce en el proyecto seleccionarla y hacer click en “**Ok**”. Las imágenes se encuentran en el subdirectorio “**Fotos**”. Desde la extracción de la primera imagen, se debe mantener seleccionado el tipo de

archivo “JFIF (jpg)” de la lista desplegable que aparece en la parte inferior del diálogo de selección de imágenes.

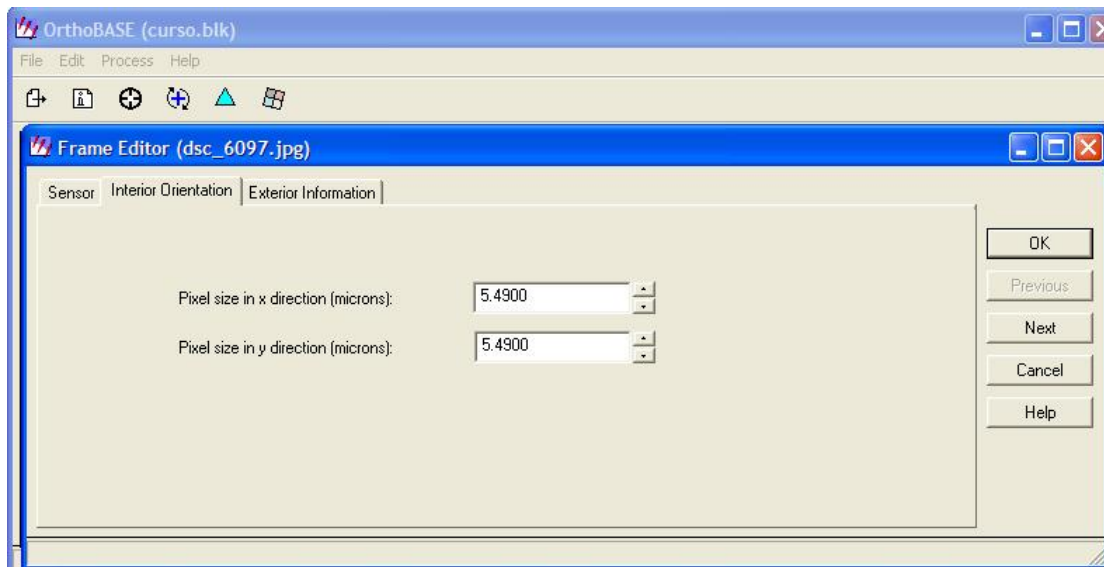


7. Una vez introducidas las imágenes, ir a la primera de ellas y colocar el indicador “>” en el cuadro correspondiente de la columna “>”.

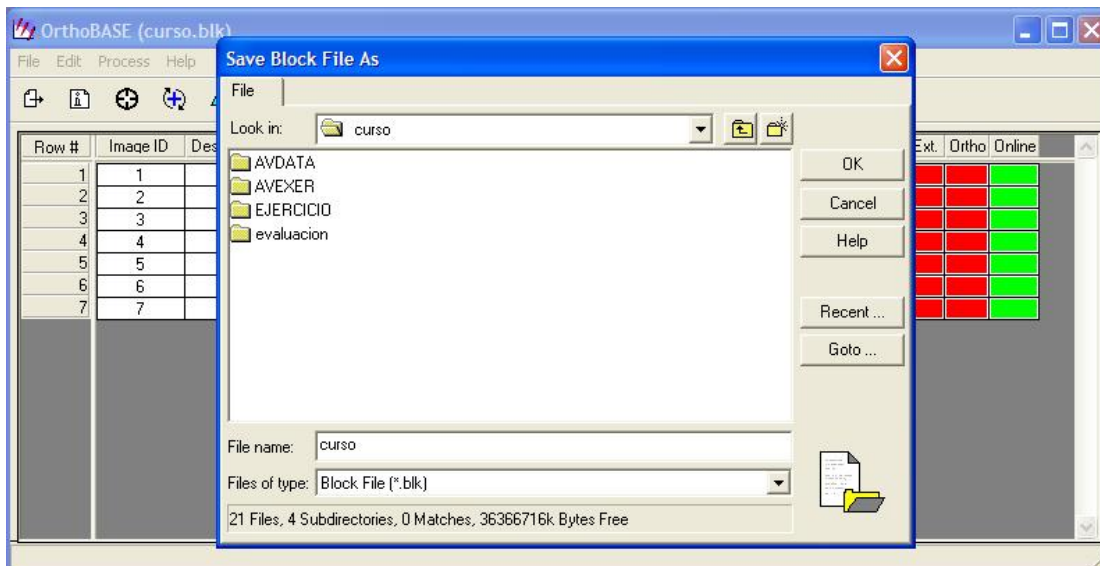
8. Hacer click en el icono con la letra “i”. En el cuadro que aparece, seleccionar el sensor haciendo click en “New” y luego en “Load”. Seleccionar el archivo “Nikon D3x.cam” en el directorio “Ejercicios”. Este contiene la distancia focal y la desviación del eje óptico de la cámara, obtenidos de la calibración previa.



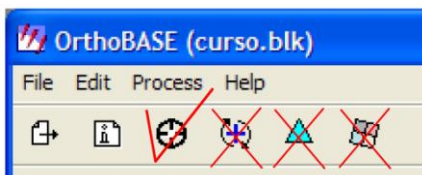
9. En la caja “**Interior orientation**”. Introducir 5,49 micras para el tamaño del pixel, tanto en X como en Y. No entrar en la caja “**Exterior orientation**”. Hacer click en “**Next**” para pasar a la siguiente imagen. Los valores de sensor y tamaño de pixel se transferirán automáticamente a las siguientes imágenes. Si es así, simplemente oprima “**Next**” sucesivamente hasta recorrer todas las imágenes. Si los valores no se transfieren automáticamente, habrá que repetir los pasos 14 a 16 de modo manual para cada imagen.



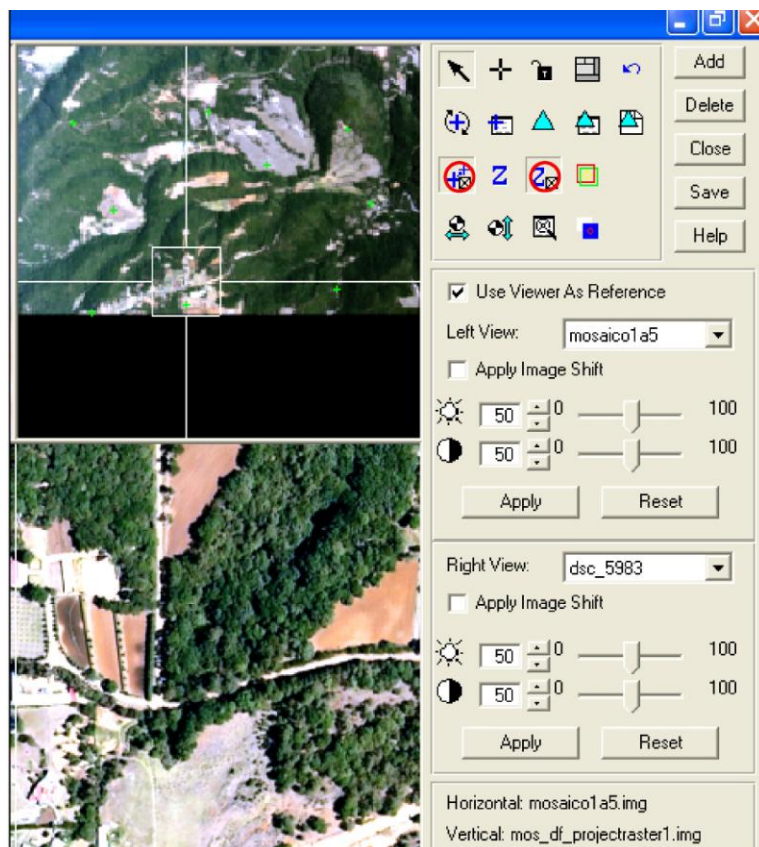
10. Guarde el bloque con “**Save**” como precaución.



11. Toque el segundo icono (círculo con una cruz dentro) que abre la ventana de introducción de puntos de control (“**Point measurement tool**”). NO TOQUE los otros tres íconos todavía, especialmente el que tiene un signo “+” con dos flechas circulares alrededor, que servirá posteriormente para generar puntos de amarre de modo automático.



12. Active las dos casillas indicadas por el signo “+” y por una “Z”, para obtener automáticamente el valor de elevación de cada punto a partir del (MDE) y para desplazarse automáticamente a la posición estimada de los puntos en cada imagen. Esto último funciona sólo cuando hay más de dos puntos en una imagen, o cuando ya se ha calculado su posición en el terreno por medio de la triangulación.

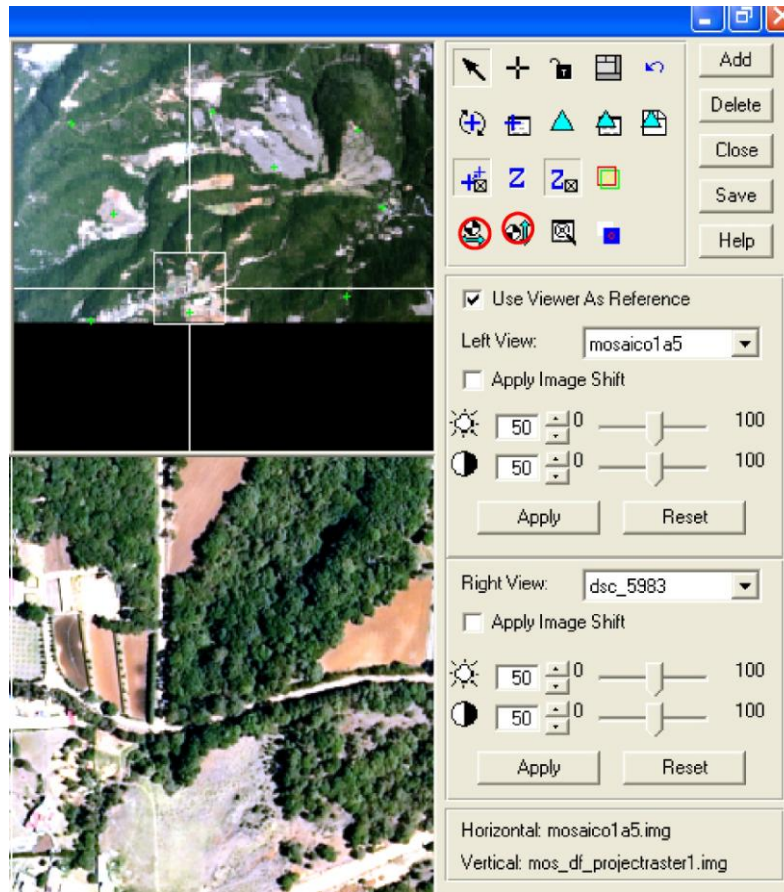


13. Con los dos íconos de flechas horizontales y verticales, seleccione la referencia horizontal (“**ortofoto de INEGI**”) y vertical (modelo digital de elevación) que se utilizarán. Como referencia horizontal, seleccione la imagen (“**Image layer**”) “**mosaico_df_2000_inegi.bil**” y como referencia vertical (**DEM**). No olvide seleccionar el tipo de imagen (**BIL ó IMG**) en la lista desplegable que se encuentra en la parte inferior del cuadro de diálogo de selección.

La referencia horizontal “**mosaico_df_2000_inegi.bil**”, corresponde a la cartografía base o mapa de referencia, ya sea una ortofoto, una imagen de satélite, etc. Estos mapas de referencia son importantes, ya que el resultado de la ortorrectificación dependerá de la exactitud de la misma; estas deben contar con un sistema de proyección, esferoide, datum, zona UTM, o unidades en el mapa (metros, grados). Para el proyecto *Inventario de Áreas Verdes Urbanas del D.F. 2010* se utilizó la proyección UTM (Universal Transversa de Mercator), zona 14 Norte, con datum WGS84y.

La referencia vertical “**dem_dfwgs84.img**” o **DEM** (Modelo Digital de Elevación) es una imagen con las elevaciones codificadas, es decir, una capa de datos raster que contiene valores

de elevación de un lugar, permitiendo que el software haga un modelo de la superficie terrestre (diferencia en elevaciones) y de esta manera eliminar el efecto de desplazamiento del relieve.



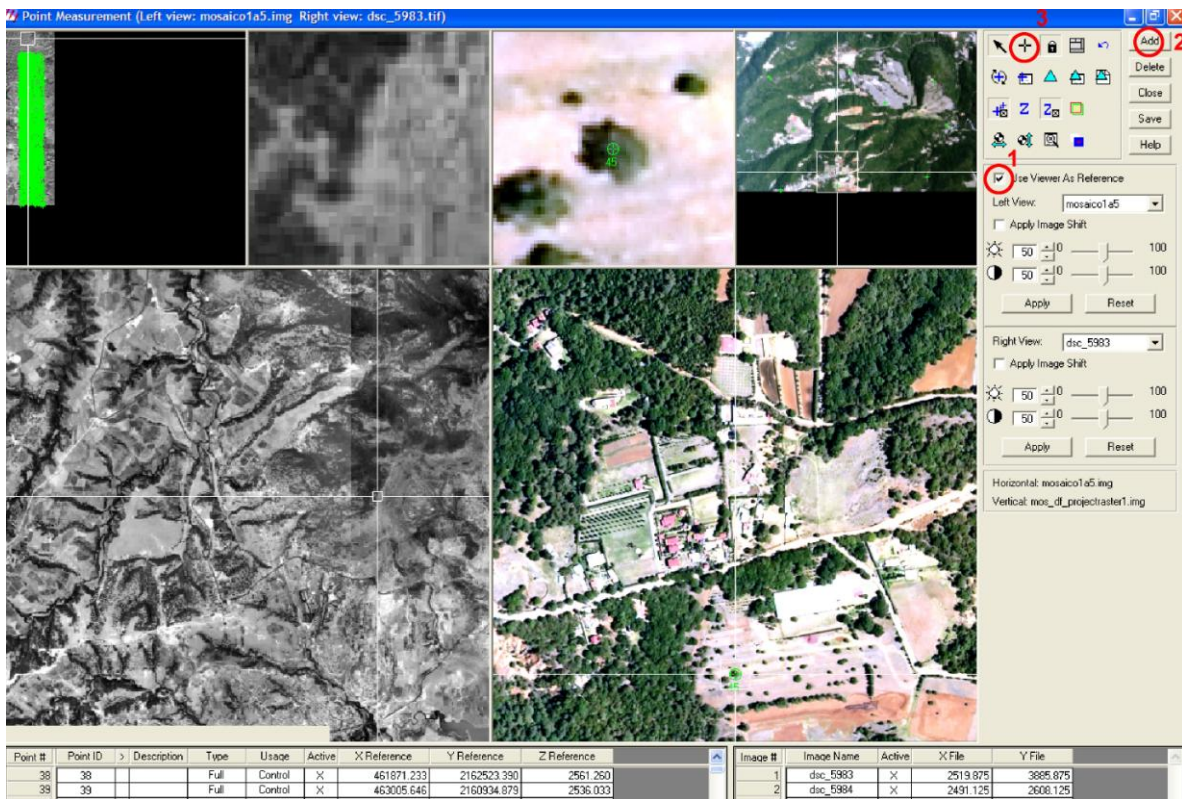
5. Obtención de puntos de control y puntos de amarre.

Los puntos de control (GCP's) son elementos identificables en la superficie terrestre (ríos, carreteras, puentes, etc.) que tienen coordenadas conocidas (X, Y, Z); por lo tanto, sirven para establecer una relación exacta entre las imágenes de un proyecto, la cámara o sensor, y el terreno.

En cambio, un punto de amarre puede o no tener coordenadas de terreno conocidas, pero se puede reconocer visualmente en el área de traslape entre dos o más fotografías. Las posiciones de imagen correspondientes a los puntos de amarre que aparecen en las áreas de traslape se deben identificar y medir, ya sea manual o automáticamente.

14. Active la casilla “Use viewer as reference” y la ortofoto de INEGI aparecerá en la ventana izquierda. Para introducir puntos nuevos, haga click en “Add”. Busque un punto específico en la imagen de referencia y en la foto digital en color y márkuelo haciendo click en la ventana grande inferior, y afine su posición en la ventana superior de zoom. No olvide crear un punto nuevo para cada nueva posición.

Es un error común introducir marcas en diferentes imágenes sin crear un punto nuevo, provocando que un sólo punto tenga coordenadas de distintos objetos en distintas imágenes, dando lugar a errores grandes y de difícil detección.



15. Repita la creación de nuevos puntos y márkuelos en la foto de referencia y en las imágenes correspondientes, hasta que tenga al menos tres puntos de control terrestre por imagen. Cambie el tipo de todos los puntos a “Full” y el uso a “Control”, si están marcados en la imagen de referencia.

Para crear puntos de amarre, simplemente busque el mismo objeto en las imágenes sucesivas en que éste aparezca y no lo marque en la imagen de referencia. En este caso, los puntos deben ser de tipo “None” y uso “Tie”.

Es conveniente hacer primero sólo puntos de control de modo sistemático y luego sólo puntos de amarre, ó viceversa, en lugar de ir creando puntos de ambos tipos intercalados, ya que su manejo se dificulta en etapas posteriores.

Point #	Point ID	Description	Type	Usage	Active	X Reference	Y Reference	Z Reference
1013	1019		Full	Control	X	458201.148	2109229.974	2962.681
1014	1020		Full	Control	X	458393.648	2109936.974	2984.121
1015	1021		Full	Control	X	459510.148	2104117.474	2694.030
1016	1022		None	Tie	X	459320.896	2109751.044	3020.000
1017	1023		Full	Control	X	470036.648	2102177.974	2390.000
1018	1024		Full	Control	X	471660.148	2101769.474	2276.041
1019	1025		Full	Control	X	468456.148	2101141.474	2242.225
1020	1026		None	Tie	X	468954.896	2100648.491	2112.226

Image #	Image Name	Active	X File	Y File
1	dsc_5983	X	2519.875	3885.875
2	dsc_5984	X	2491.125	2608.125
3	dsc_5985	X	2425.375	1327.375

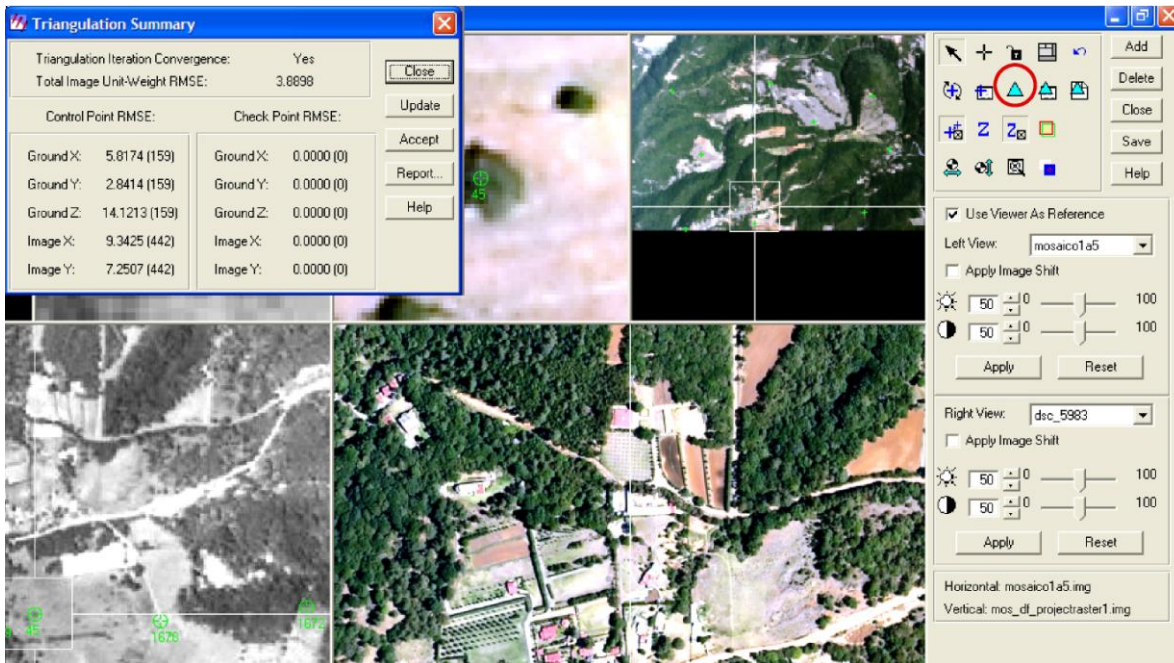
6. Triangulación.

La triangulación es el proceso por el cual se define la relación matemática entre un bloque de imágenes, el sensor y el terreno. Una vez definida esa relación, es posible crear imágenes e información precisa con respecto a la superficie terrestre.

La triangulación en bloque considera simultáneamente lo siguiente:

- La posición (X, Y, Z) y la orientación (omega, phi, kappa) de cada imagen en un bloque, tal y como existía al momento de la toma (por ejemplo, los parámetros de orientación exterior).
- Las coordenadas X, Y y Z de los puntos de amarre recaudados del bloque de imágenes (por ejemplo, la determinación de puntos y posicionamiento). Una vez que las coordenadas X, Y y Z de los puntos de amarre han sido reunidas, pueden convertirse en puntos de control.
- Los parámetros internos asociados a la cámara o sensor.
- Parámetros adicionales que caracterizan errores sistemáticos en el bloque de imágenes y observaciones (por ejemplo, distorsiones del lente).

16. Cuando tenga al menos tres puntos de control en cada una de las imágenes, oprima el botón para efectuar la triangulación (triángulo azul). Si se requiere de más puntos, el programa lo indicará, especificando la imagen en la que faltan.



17. Revise el resultado de la triangulación y evalúe la conveniencia de introducir más puntos de control o de amarre. Verifique si la triangulación converge y el valor del error cuadrático medio (**RMS**). El RMS es la distancia entre la ubicación de entrada de un punto de control (la que proviene del mapa de referencia) y la ubicación de salida del mismo punto, o bien, la diferencia entre la coordenada real del punto de control y la coordenada deseada de salida.

Si éste es elevado, se deben buscar los errores e introducir más puntos de amarre. Dependiendo de las características de cada proyecto, el objetivo es lograr un error menor a 1 píxel, aunque en algunos casos es difícil lograr que sea menor a 5 ó 6 píxeles.

18. Cuando la triangulación converge, el error está dentro de lo aceptable y el despliegue gráfico de las imágenes (icono con cuadro azul oscuro) las muestra sin grandes deformaciones; entonces puede procederse a la generación de ortofotos. Guarde el proyecto con frecuencia, para evitar perder trabajo en caso de que ocurra una falla.

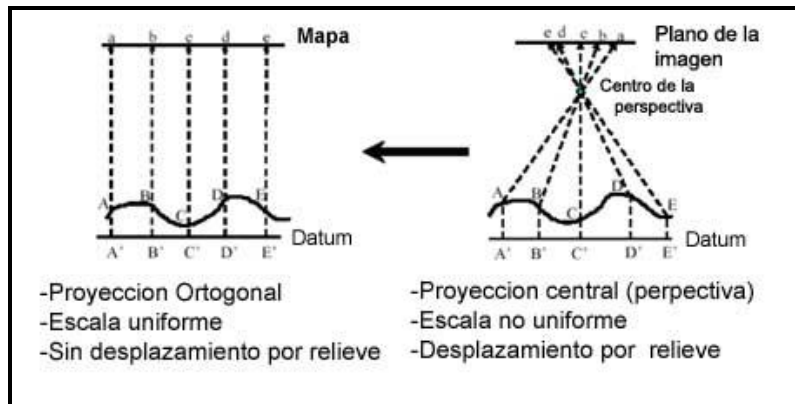
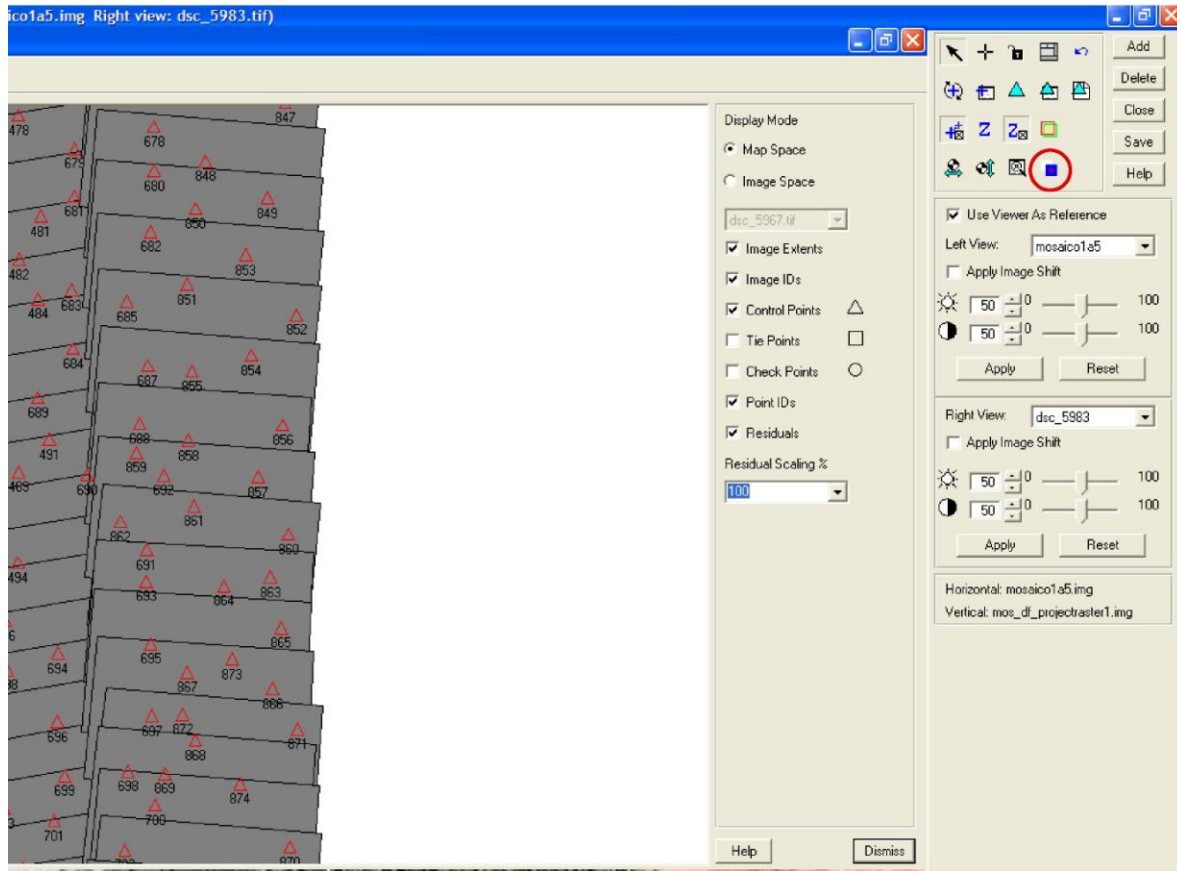
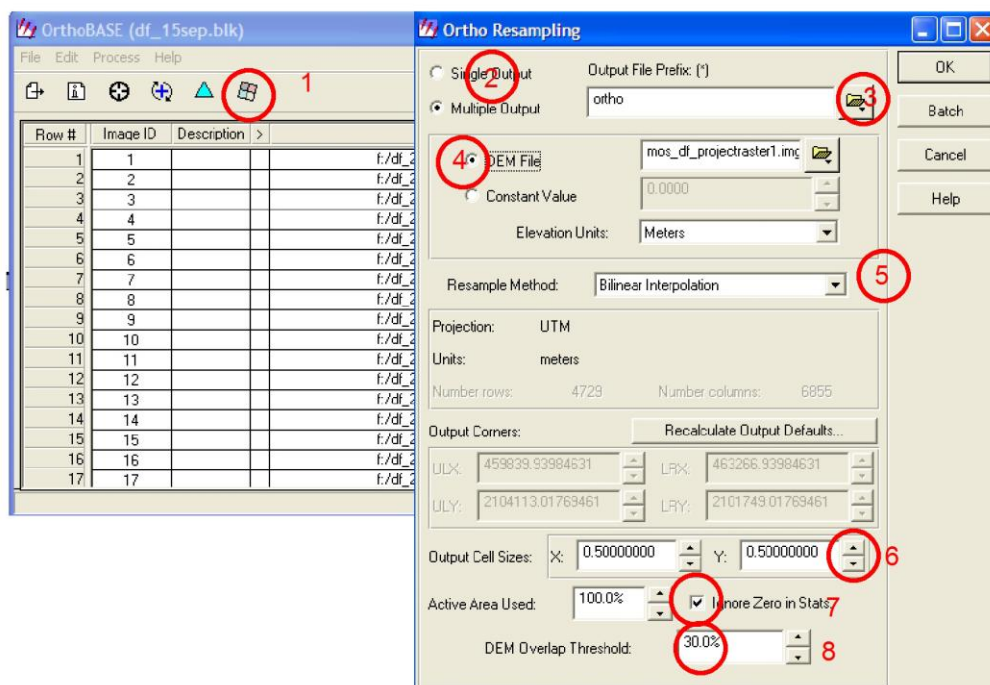


Figura 16. Diferencia entre la proyección central ó de perspectiva característica de una fotografía aérea, y la proyección ortogonal de una foto ortocorregida, que permite colocarla directamente sobre una carta, con la escala y la posición correcta.

3.3.4. Ortorección de imágenes.

La ortorrectificación u ortorección consiste en cambiar la proyección central de la imagen de una superficie en líneas de proyección perpendiculares (proyección ortogonal), eliminando la distorsión causada por las variaciones del terreno fotografiado. El resultado se conoce como ortoimagen u ortofotografía.

1. En la ventana principal de nuestro proyecto, activar el icono de ortorección. Aparecerá una ventana en la cual se nos presentan las opciones de una “salida simple” y otra “salida múltiple”.

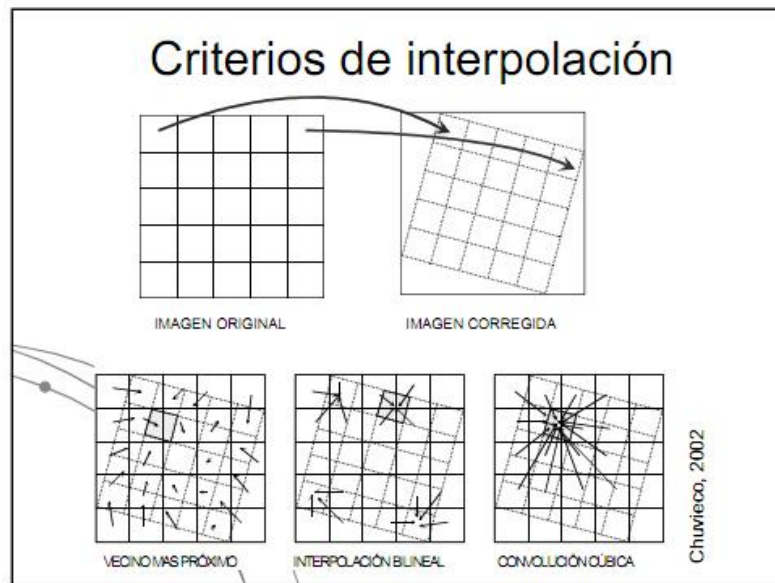


2. Es conveniente activar primero la opción de “salida simple” para comprobar el resultado de nuestra ortofoto, verificar su posicionamiento en el visor teniendo como base la imagen de referencia y evitar posibles desplazamientos o errores.

3.- En este paso se elige la carpeta de destino con el prefijo “orto”, para distinguir las imágenes ortorectificadas.

4.- Se carga el Modelo Digital de Elevación con el cual trabajamos en nuestro proyecto.

5.- Elegir el método “**resampling**” (interpolación radiométrica). En este caso seleccionamos el método de interpolación “**bilinear**” (cuatro celdas) o “**convolución cúbica**” (dieciséis celdas). Para cada celda de la imagen corregida se aplica la media de los ND (Nivel Digital de cada Pixel) de las cuatro o dieciséis celdas de la imagen original que estén más cerca. Es una media ponderada en función de la distancia del pixel original al corregido.



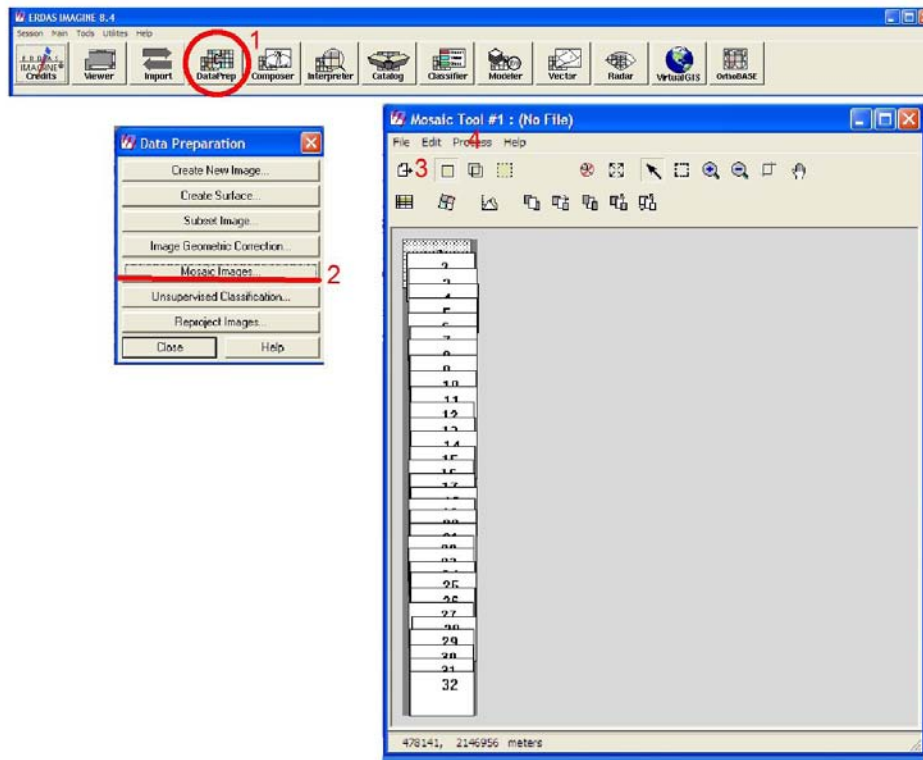
6. El programa da un tamaño de salida aproximado del pixel (**Output cell sizes**) de acuerdo al proceso de aerotriangulación; entre mas pequeño es el pixel, más grande será el tamaño del archivo de salida.

7. Activar la casilla “**Stat ignore value**” (ignora los valores en cero).

8. En la casilla de “**DEM, Overlap Threshold**”, seleccionar: sobreposición al 30 %.

9. Activar el botón “**OK**” para comenzar con el proceso de creación de imágenes ortorrectificadas. Al terminar, se activará una ventana con el siguiente diálogo: “**JOB STATUS al 100%**”, esto indica que se termino exitosamente el proceso. Seleccionar “**OK**” para concluir con esta etapa.

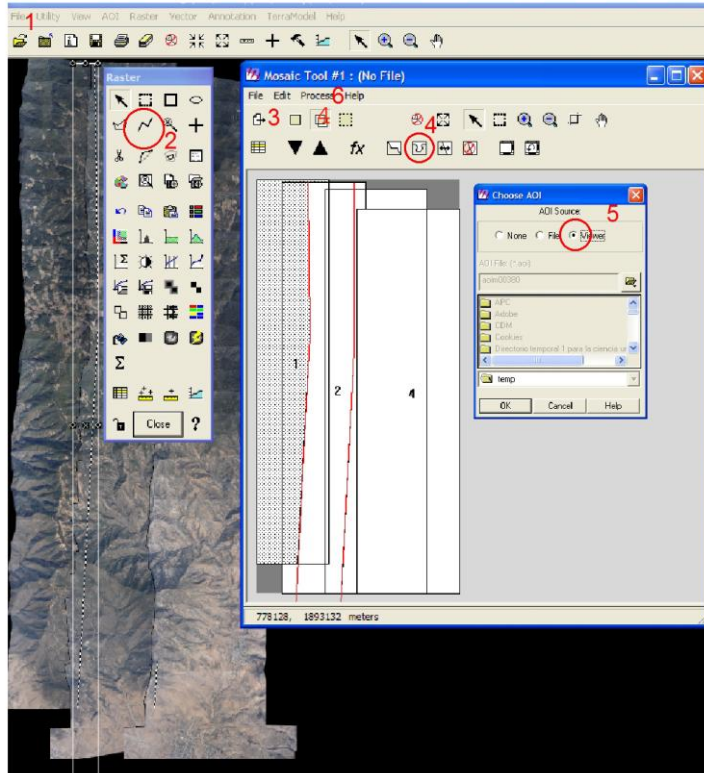
3.3.5. Creación de mosaicos para cada línea de vuelo a partir de las ortofotos.



1. En el menú principal de ERDAS, seleccionar el módulo llamado **“Data Drep”**.
- 2.- Elegir la opción **“Mosaic image”**; esta abrirá una ventana
3. Una vez abierta esta ventana de trabajo, agregar las imágenes ortorrectificadas. Es importante conservar el orden en el cual fueron colocadas en nuestro proyecto.
4. En la opción **“Process”**, activar la acción **“Run process”**, que abrirá la ventana que nos permitirá dar destino a nuestro archivo de salida. Activar la opción **“Stat ignore value”**, y seleccionar **“OK”**. Una vez terminado el proceso, aparecerá el diálogo **“JOB STATUS al 100%”**, entonces se seleccionará **“OK”**. Para verificar resultado, abrimos el archivo creado en nuestro visor.

7. Creación del ortomosaico completo.

Este proceso consta de la unión de todas nuestras líneas de vuelo para formar una sola imagen de nuestra área de estudio.



1.- En el menú principal, abrir una ventana o visualizador de imágenes, cargar los mosaicos con las respectivas líneas de vuelo para verificar su posición con respecto al mapa de referencia, observar sus deformaciones, si estas existen, se puede intentar ordenando y acomodando las líneas para determinar cual ajusta mejor sobre nuestra referencia.

2. Cuando está listo el orden correcto, elegimos la opción “**raster**” en el menú y activamos en submenú “**Tools**”; este mostrará una ventana con herramientas, de la cual hay que elegir la de “**corte**”; ahí, marcaremos lo que consideremos con menor desplazamiento o deformación, para hacer coincidir nuestras líneas.

3. En la ventana de “**creación de mosaico**”, agregamos nuestros archivos o mosaicos por línea, con el orden que consideremos mejor, tal y como está en nuestro visualizador de imágenes.
4. En este caso elegimos la opción de corte que nos permitió importar los vectores de corte.
5. Al activarse la opción para importar los vectores de nuestra vista, se tendrán que seleccionar uno a la vez, interactuando con esta ventana hasta seleccionar todos los vectores de corte, para, por último, correr el proceso de creación de mosaico “**Run mosaic**”.

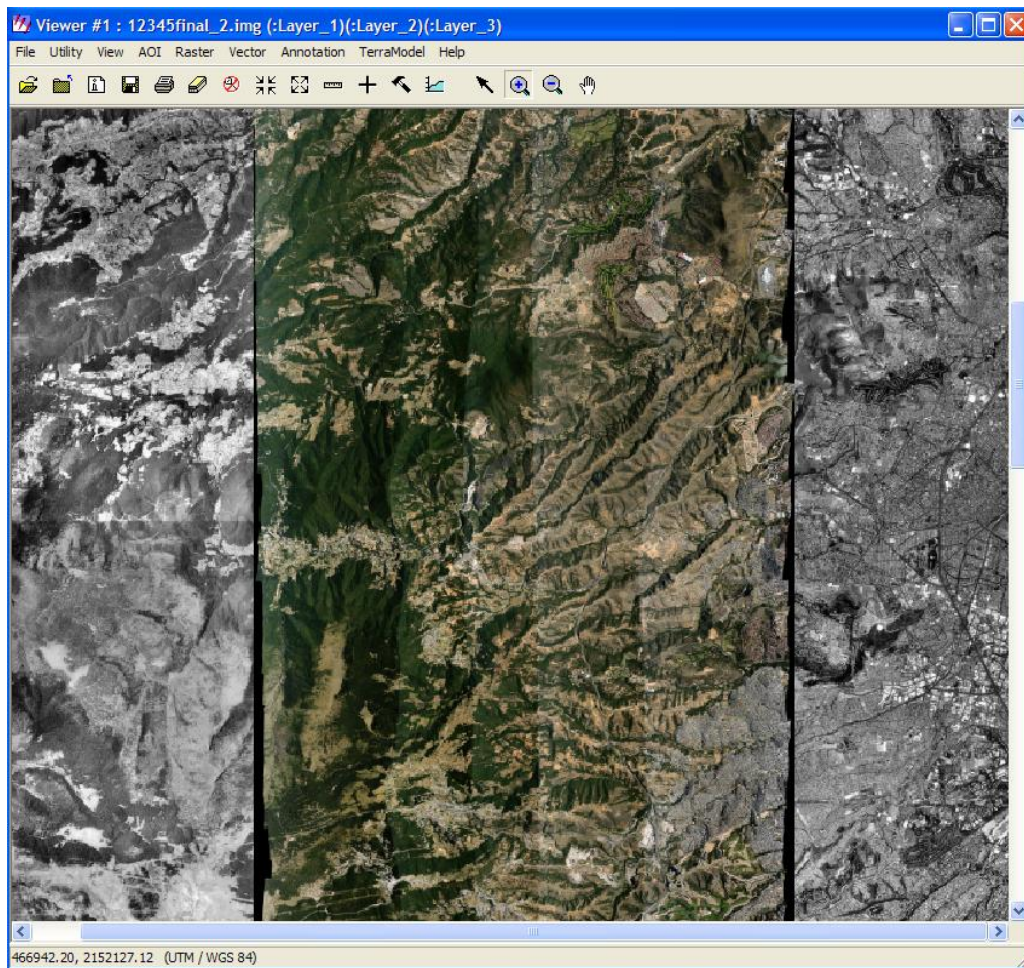


Figura 17. Mosaico de varias líneas de vuelo, sobrepuesto a la imagen utilizada como referencia para extraer los puntos de control. Es posible verificar el grado de ajuste entre ambas imágenes.

CAPÍTULO 4

IMPORTACIÓN AL SIG

Como el mosaico final ya está proyectado cartográficamente y referido a un sistema de coordenadas específico, puede ser importado a un SIG, como una imagen georreferenciada. Considerando que los mosaicos ocupen más de 2 Gbytes (en este caso, tiene un tamaño de alrededor de 57 Gbytes), si el equipo y los programas que se utilizan no tiene capacidad para abrir archivos de este tamaño, es conveniente subdividirlos en partes. Es importante verificar que su referencia geográfica sea correcta, comparándola con otras imágenes o con vectores, cuya posición conozcamos con exactitud. También hay que identificar desfases o desplazamientos sistemáticos pequeños, ya que si se trabaja con escalas grandes, la precisión puede resultar insuficiente. Una vez que hemos determinado la precisión, o el error cuadrático medio, podemos considerarlo de manera confiable como un producto cartográfico digital, siempre y cuando especifiquemos el error y la escala de trabajo equivalente. Es posible que, debido a la acumulación de errores pequeños durante la ortocorrección el mosaico tenga una exactitud posicional determinada, que lo hace adecuado para trabajar en cierta escala, pero tenga una exactitud temática correspondiente a una escala mayor, esto es, que no logramos corregir las imágenes para lograr una escala de trabajo acorde con su resolución. Lo ideal es que ambas coincidan.

Al convertir las imágenes individuales en un producto cartográfico integrado, podemos compararlas con imágenes de otros años o de otros sensores, como los satelitales, así como sobreponer vectores, modelos de elevación y otras capas de información.

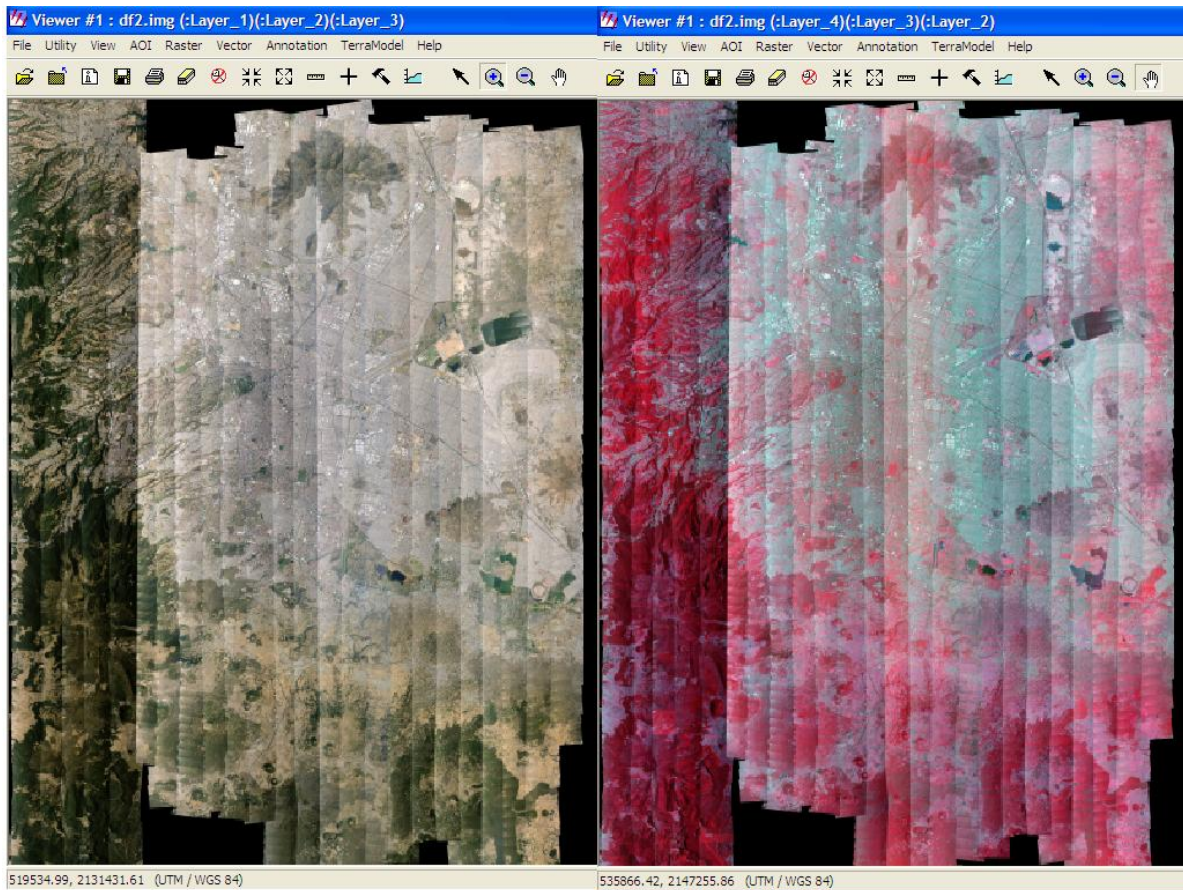


Figura 18. Mosaico terminado con todas las líneas de vuelo. Puede observarse que algunas líneas son más oscuras, debido a que se obtuvieron en fechas distintas, ya a que se procesaron en computadoras con calibración diferente del color de la pantalla. El brillo de estas líneas puede ajustarse independientemente. A la izquierda se muestra la combinación normal de bandas visibles y a la derecha la combinación en falso color (Ir,R,G), que indica dónde hay vegetación.

La resolución espacial que se logró para el Inventario de Áreas Verdes Urbanas del D.F. 2010 se encuentra alrededor de los 50 cm por pixel, que concuerda con los requerimientos y con lo planeado para hacer el levantamiento. Por otra parte, la banda infrarroja nos permite visualizar la vegetación para identificar rápidamente todas las áreas verdes, independientemente de su tipo (ver figura 18).

4.1 Uso del mosaico ortocorregido para extraer información de áreas verdes.

Para aprovechar los mosaicos en el IAVDF, en primer término superpusimos las capas vectoriales correspondientes a los inventarios anteriores, con el fin de verificarlas y de no

crear polígonos que ya estuviesen registrados anteriormente, para evitar duplicidad de datos. Si bien es posible interpretar las fotografías digitales individuales imprimiéndolas y visualizándolas con un estereoscopio, sólo utilizamos este procedimiento cuando el relieve es muy irregular, cuando la vegetación no permite identificar los límites administrativos de un área verde, o cuando hay dudas sobre la presencia de bardas o rasgos que nos proporcionen información para asignarla a una categoría específica. En general, dada la resolución del mosaico, es suficiente con digitalizar los polígonos en pantalla para registrar correctamente la mayoría de ellas.

Una vez que agregamos el mosaico al sistema de información geográfica, podemos generar capas de información temática de acuerdo a las características particulares de cada capa. En este caso, utilizamos dos métodos para generar los polígonos, uno manual y otro automatizado, dependiendo de la manera en la que extrajimos la información de la imagen.

La forma manual consiste en crear en el modulo de ArcCatalog, del programa ArcGIS 9.3, que utilizamos para crear el SIG, un nuevo archivo “shape” (forma, en español) digitalizado directamente en pantalla. Los archivos “shape” son utilizados por ArcGIS para almacenar información vectorial geométrica (líneas, puntos y polígonos), con una referencia espacial. Además es posible agregarles una tabla de atributos, expresados como datos alfanuméricos, a la cual se agregan todos los campos con los datos que se desea recolectar, por ejemplo son uso de suelo, dirección, observaciones etc.

En el nuevo shape de polígonos creado, el cual nombramos Areas_verdes.shp, se editó para crear nuevos polígonos ó “features”, trazados de manera manual de acuerdo a nuestra interpretación visual guiándonos por las formas y colores de la imagen.

El detalle dependerá de la escala de trabajo que tengamos en la vista, que para nuestros fines fue de 1: 2000, cuidando de no sobreponer polígonos. Al final se hace una revisión para detectar posible errores de sobreposición y se calculan las áreas en metros para poder cuantificar, actualizar, y comparar con información ya existente. Estas estadísticas se pueden cruzar con otros tipos de información, como tipo de suelo, numero de habitantes, etc. Los resultados de estos cruces dependerá el tipo análisis que se quiera lograr.

El mosaico tuvo que ser fraccionado por delegaciones y exportado a formato GeoTIF, el cual además de conservar la referencia espacial, es un formato ampliamente compatible y manejable con cualquier programa.



Figura 19. Trazo o digitalización manual de los polígonos sobre el mosaico. A la derecha se muestra la tabla de atributos relacionada con ellos.

La forma automatizada de obtener áreas verdes es calculando un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), con el programa ENVI 4.7. En este software se utiliza el comando “Transform”, aplicando la opción NDVI, y se escogen las bandas 3 y 4 de nuestro mosaico, que corresponden al rojo y al infrarrojo cercano. El resultado del NDVI se expresa como una imagen, cuyos valores de píxel reflejan la presencia y tipo de vegetación según su ubicación en el espectro electromagnético, pero sin discriminar entre ellos.

Con la imagen NDVI se realizó una clasificación no supervisada se asignaron asignamos 10 clases, para después verificar cuáles de ellas corresponden a la vegetación, obteniendo así un archivo “raster” o de imagen, que muestra los píxeles correspondientes a la vegetación, aún cuando ésta no se pueda percibir a simple vista por color y textura en la forma manual, como es el caso del pasto seco, por ejemplo. Entre las características que pueden influir en su clasificación se encuentran la fenología, floración, foliación, estado de hidratación y tipo de vegetación.

La última fase es convertir este raster a vectores en formato shape, suavizando los bordes de los polígonos resultantes, que generalmente aparecen serrados puesto que siguen la forma de

los píxeles. Para ello se usa el comando “smooth polygon” que producirá un mejor ajuste del vector con la imagen (y con el área verde real) como se muestra en la siguiente figura.

Este proceso se utilizó principalmente para discriminar y cuantificar todas las áreas verdes para las cuales no se determinaron límites administrativos o catastrales. Todas las áreas gestionadas por el GDF se trazaron manualmente, ya que para estas los límites son de importancia administrativa y legal, en tanto que las privadas y las que forman parte del suelo de conservación, se obtuvieron automáticamente, reflejando la cobertura vegetal total, más que límites de predios.

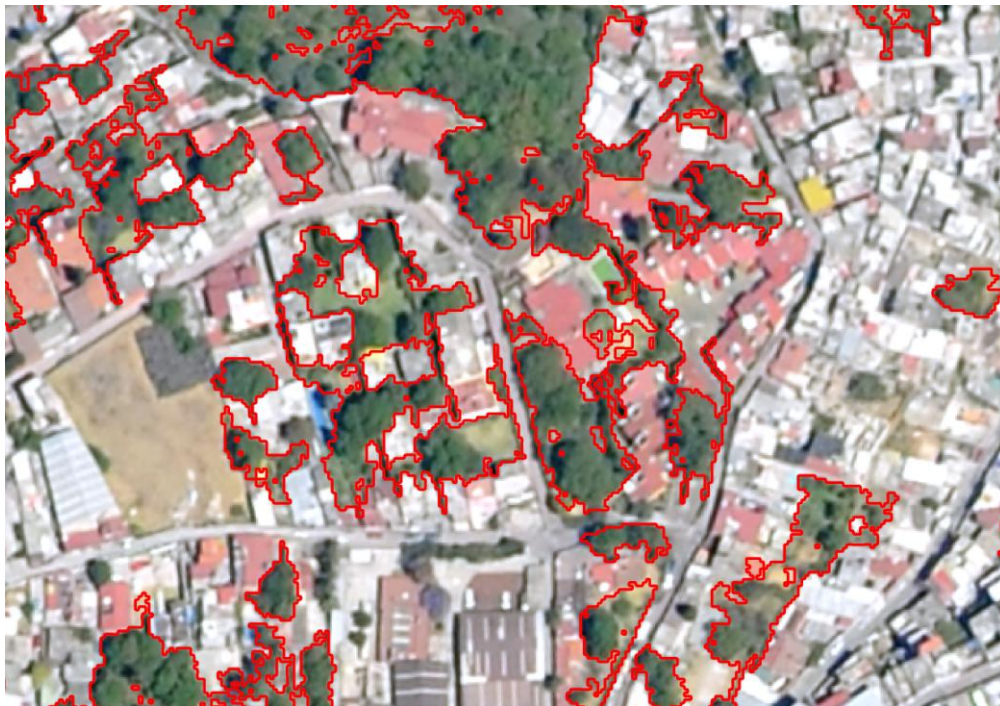


Figura 20. Polígonos con los bordes suavizados. Aún después del proceso de suavizado, los que corresponden a árboles muestran límites curvilíneos, que en ocasiones es necesario editar para representar los límites administrativos.

4.2 Creación y actualización de los polígonos de las áreas verdes.

Como se mencionó en el Capítulo 2, todas las Áreas Verdes Urbanas del D.F. se han organizado a través de un Sistema de Información Geográfica en cuatro capas de información en formato shape de polígonos:

1. Áreas Verdes Públicas
2. Áreas Verdes Privadas
3. Áreas Verdes con Tarifa
4. Áreas Verdes Naturadas (Azoteas Naturadas)

Para la presente actualización del inventario se mantuvo esta clasificación siguiendo un criterio técnico y administrativo, cuyo propósito es maximizar su utilidad en la gestión pública de estos espacios.

La base de datos de los cuatro *shapes* o capas de información consta de cuatro campos o variables que corresponden a los atributos geográficos de las Áreas Verdes Urbanas: TIPO DE AV, NOMBRE, DELEGACIÓN y UBICACIÓN.

FID	Shape	TIPO AV	NOMBRE	DELEGACION	UBICACION
0	Polygon	ANP	RESERVA ECOLOGICA UNAM	COYOACAN	CIUDAD UNIVERSITARIA
1	Polygon	ANP	RESERVA ECOLOGICA UNAM	COYOACAN	CIUDAD UNIVERSITARIA
2	Polygon	ANP	RESERVA ECOLOGICA UNAM	COYOACAN	CIUDAD UNIVERSITARIA
3	Polygon	ANP	RESERVA ECOLOGICA UNAM	COYOACAN	CIUDAD UNIVERSITARIA
4	Polygon	ANP	RESERVA ECOLOGICA UNAM	COYOACAN	CIUDAD UNIVERSITARIA
5	Polygon	ANP	RESERVA ECOLOGICA UNAM	COYOACAN	CIUDAD UNIVERSITARIA
6	Polygon	ESCUELAS Y/O DEPENDENCIAS PUBLICAS	UNAM	COYOACAN	CIUDAD UNIVERSITARIA
7	Polygon	ESCUELAS Y/O DEPENDENCIAS PUBLICAS	UNAM	COYOACAN	CIUDAD UNIVERSITARIA
8	Polygon	VIALIDADES		IZTAPALAPA	
9	Polygon	VIALIDADES	CAMELLON PLUTARCO ELIAS CALLES	IZTAPALAPA	RIO CHURUBUSCO Y EJE 6
10	Polygon	VIALIDADES	GLORIETA	BENITO JUEREZ	CALZ. DE TLALPAN Y RIO CHURUBUSCO
11	Polygon	VIALIDADES	CAMELLON AV. CALZADA DEL HUESO	COYOACAN-TLAL	DE CALZ. DE TLALPAN A CANAL NACIONAL
12	Polygon	VIALIDADES	CAMELLON AV. MIGUEL A. DE QUEVEDO	COYOACAN	AV. INSURGENTES A CALZ. DE TLALPAN
13	Polygon	VIALIDADES	CAMELLON DE AV. PASEO DEL RIO	ALVARO OBREGO	DE M. ANGEL DE QUEVEDO A EJE 10 SUR, COL. COPILCO
14	Polygon	OTROS		COYOACAN	
15	Polygon	PARQUE		COYOACAN	
16	Polygon	VIALIDADES	CAMELLON PROL. AV. MOCTEZUMA	COYOACAN	
17	Polygon	VIALIDADES	CAMELLON AV. CALZADA DEL HUESO	COYOACAN	CALZ. DEL HUESO ESQ. S. ROSA FLORES Y EL ROSARIO
18	Polygon	PARQUE		COYOACAN	
19	Polygon	VIALIDADES	CAMELLON CARMEN SERDAN	COYOACAN	PROLOG. CAFETALES ENTRE TEPETLAPA Y LA VIRGEN
20	Polygon	PARQUE	PARQUE EX-EJIDO SAN PABLO TEPETLAPA	COYOACAN	ROSARIO CASTELLANOS Y ELVIRA VARGAS
21	Polygon	PARQUE		COYOACAN	
22	Polygon	PARQUE	PARQUE PISTA PPRIMETRAI	COYOACAN	CAI 7 DE LAS ROMBAS Y M. CASTRI L ANOS

Figura 21. Tabla de la capa del SIG de Áreas Verdes Públicas. Esta capa de información tiene que ver con todos los espacios verdes mayores a 50 m² que no tengan alguna restricción de acceso y es la de mayor cobertura areal, tanto a nivel federal como delegacional.

1. Áreas Verdes Públicas. Esta capa de información tiene que ver con todos los espacios verdes mayores a 50 m² que no tengan alguna restricción de acceso y es la de mayor cobertura en superficie, tanto a nivel de toda la entidad, como por delegaciones.

Para facilitar la identificación, clasificación, tabulación y trazo de las Áreas Verdes Públicas, el trabajo se organizó por delegación. Esta capa se ha definido y subdividido en las siguientes categorías:

- a) Áreas de Valor Ambiental (AVA's)
- b) Áreas Naturales Protegidas (ANP)

- c) Escuelas y/o dependencias públicas
- d) Parques (parques, jardines, plazas, deportivos, plazuelas)
- e) Alamedas
- f) Vialidades (camellones, glorietas, isletas, triángulos, bordos, canales)
- g) Unidad Habitacional
- h) Panteón
- i) Vivero
- j) Bosque
- k) Barrancas

Existen otras dos categorías: “Otros” o “Sin Datos”, que aparecen en la mayoría de los mapas de las Áreas Verdes Públicas; estas corresponden a los espacios verdes que por falta de información no se han clasificado, o bien, pueden sugerir áreas potenciales para ser catalogadas como Área Verde Pública.

También por falta de información, existe un número considerable de polígonos que sólo cuentan con la referencia “Tipo AV” dentro de la base de datos; o bien, muchos Tipos de Área Verde no corresponden con el calificativo asignado en el campo de “Nombre”; por ejemplo, el caso de la delegación Azcapotzalco.

UBICACION	EQUIPAMENT	RESPONSABL	TIPO AV	NOMBRE 1	DELEGACION
GUSTAVO GARMENDIA, FEDERICO MONTES Y TOMAS MARIN			PARQUE		AZCAPOTZALCO
AMUZGOS Y TEZOZOMOC, COL. TEZOZOMOC		B	JARDINES	JARDIN TEZOZOMOC	AZCAPOTZALCO
			PARQUE		AZCAPOTZALCO
			PARQUE		AZCAPOTZALCO
ZEMPOALTECAS Y HDA. ENCERO, COL. EX-HDA EL ROSARIO		B	JARDINES	JARDIN LAS NACIONES	AZCAPOTZALCO
ACATL Y SANTA LUCIA, COL. SANTA LUCIA		B	JARDINES	JARDIN SANTA LUCIA	AZCAPOTZALCO

Figura 22. Puede apreciarse la falta de información para el caso de dos parques, en uno de los inventarios previos. Algunos no cuentan ni siquiera con un nombre en la base de datos.

2. Áreas Verdes Privadas. Esta capa de información corresponde a los espacios verdes privados (viviendas o empresas) que contengan jardines mayores a 50 m². La información de este rubro es limitada, sin embargo, se pretende obtenerla mediante un Índice de Vegetación y con la sobreposición de la capa de CATASTRO del D.F.

3. Áreas Verdes con Tarifa. La información de esta capa tiene que ver con las Áreas Verdes cuyo acceso y disfrute de los espacios está restringido a una tarifa o membresía por determinado tiempo, como son clubes de golf, o algunos parques recreativos, por mencionar algunos.

4. Áreas Verdes Naturadas (Azoteas Naturadas). Esta información se generó a partir de la base de datos de edificios naturados y se divide en dos:

- a) Edificios naturados.
- b) Edificios privados.

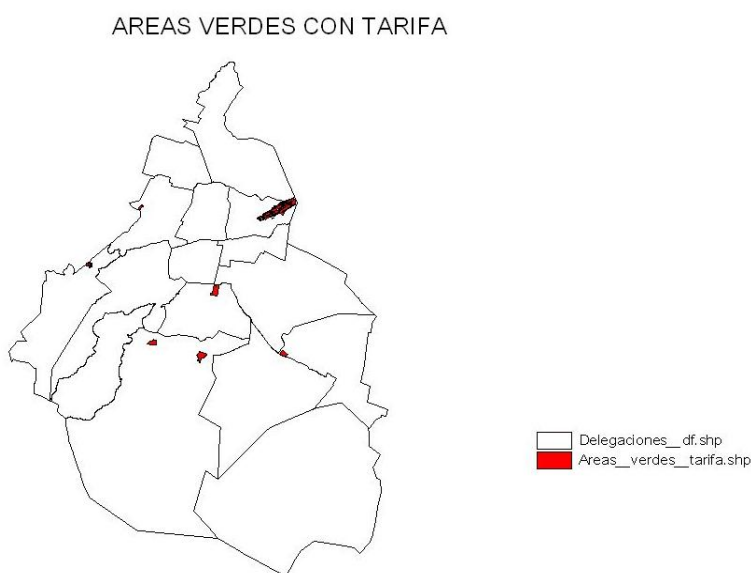


Figura 23. Distribución de áreas verdes con tarifa en el Distrito Federal.

El primer rubro cuenta con un total de diez datos, con una descripción para cada uno de los inmuebles, así como el nombre de los mismos. El segundo rubro cuenta con un total de cuatro datos de edificios correspondientes al sector privado con azotea naturada; igualmente, tienen una base de datos con la ubicación y nombre del inmueble.

El método a seguir para la creación de los polígonos correspondientes a edificios naturados es el siguiente.

1. Los predios fueron ubicados mediante imágenes de satélite extraídas de la base de datos que proporcionó la Secretaría de Medio Ambiente y de la Guía Roji.
2. Una vez ubicados los predios, son digitalizados los polígonos correspondientes a las azoteas verdes.
3. Para poder definir mejor los rasgos de las azoteas verdes, es importante contar con el mosaico hecho a partir de las fotografías del vuelo digital; pero para poder distinguirlas del resto, es necesario contar con una banda infrarroja que permita identificar mejor la presencia de rasgos de vegetación. En esta banda, la presencia de actividad fotosintética produce una señal intensa, por lo que las plantas de todo tipo aparecen en tonos claros de gris, en algunos casos muy cercanos al blanco. Cuando además se combina con las bandas visibles, es posible diferenciar inequívocamente la vegetación de otros tipos de cobertura.



Figura 24. Es posible sobreponer otros datos y cruzarlos con el inventario, para contar con información suplementaria que apoye la gestión de las áreas verdes. En este caso se muestra el plano de manzanas, pero puede incluirse el mapa catastral de predios, las vialidades, instalaciones peligrosas, escuelas, líneas de agua potable, drenaje y otras.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1 Experiencia profesional.

El proyecto que he utilizado a lo largo de este informe para ejemplificar el tipo de actividades relacionadas con el aprovechamiento de fotografías aéreas digitales para la investigación y las aplicaciones de la Geografía durante los últimos tres años. Mi estancia en este Laboratorio data ya de hace 10 años, en los que acumulé experiencia en el manejo y aplicación de los SIG en la solución de numerosos proyectos. Es decir que he acumulado una experiencia amplia en temas relacionados con mi profesión, pero también que domino técnicas y conocimientos avanzados, que no es posible obtener en otros medios. Mi participación en un Laboratorio de investigación, cuya principal actividad es la generación de nuevo conocimiento tanto teórico como técnico para la solución de diversos problemas, me ha dado una perspectiva diferente, que podré aplicar tanto en el ámbito académico como en el privado, aplicando criterios de calidad e innovación.

En mi futuro profesional me gustaría continuar trabajando en el mejoramiento de las técnicas para la toma de fotografías aéreas, experimentar con nuevos equipos como LIDAR, sistema inercial, etc., que ayuden a automatizar los procesos para obtener productos en forma rápida y pueda dedicar más tiempo a la interpretación y análisis de ellos.

5.2 Técnicas aprendidas.

En cuanto a las técnicas, puedo decir que he aprendido no sólo los detalles de su ejecución, sino también una perspectiva sobre cuándo es pertinente su aplicación, cuándo deben

seleccionarse ciertas variantes y cuáles son sus ventajas y limitaciones. Entre estas ventajas se encuentran:

- Una muy clara es la obtención de imágenes de alta resolución, con una banda infrarroja que no es posible encontrar en otros productos de fotografía aérea disponibles en el mercado en México. Las imágenes son consistentes y los sensores de las cámaras digitales siempre responden de la misma manera bajo condiciones diversas de temperatura, humedad o vibración.
- Otra es la oportunidad con que pueden obtenerse, ya que no dependemos de la programación de un satélite extranjero, o de los intereses y conveniencia de empresas fotográficas. Es posible reaccionar rápidamente frente a situaciones de desastre e incluso volar debajo de las nubes, lo que resulta casi inútil con cámaras analógicas de película. Incluso es posible hacer estudios multitemporales volando varias veces en un solo día, para detectar cambios rápidos en rasgos del terreno.
- Podemos utilizar prácticamente cualquier aeronave, siempre y cuando tenga la capacidad de alcanzar la altitud requerida por nuestros planes de vuelo. El costo es mucho menor que el de rentar aeronaves especializadas, y en cualquier parte del país es posible rentar avionetas y helicópteros.
- Se trata de técnicas desarrolladas en la UNAM y en México, pensando en nuestras propias condiciones tecnológicas, económicas y sociales. Por ello, los sistemas desarrollados en el LAGe, y que he aprendido a utilizar, han seguido criterios de sencillez de fabricación y uso, bajo costo de operación y maximización de las aplicaciones.

Entre las desventajas de las técnicas aprendidas, se encuentran:

- La precisión que se obtiene no iguala a la de las cámaras aerofotogramétricas, sean analógicas o digitales, debido a la construcción de las cámaras de formato pequeño que utilizamos. Sin embargo, con la calibración adecuada y un trabajo de levantamiento y procesamiento cuidadosos, se logran resultados que no son significativamente inferiores.

- La producción de ortofotos y ortomosaicos es sumamente laboriosa y puede ir desde un día (por ejemplo, 10 km²) hasta tres meses (toda el área metropolitana de la Ciudad de México, unos 2,000 km²). Sin embargo, este no es sólo un problema de las fotos digitales, sino también de las analógicas. La cobertura de las digitales es algo menor, por lo que hay que tomar hasta 30% más imágenes que con cámaras métricas, pero en los dos casos hay que procesarlas. La solución es sencilla, pero muy costosa, y consiste en incorporar un GPS de doble frecuencia con corrección diferencial (\$40,000 dólares americanos) y una unidad de medición inercial (IMU), cuyo costo va de \$80,000 a \$500,000 dólares. Estos equipos permitirían elaborar los mosaicos en cuestión de días, independientemente de su tamaño.
- Para mantener los costos bajos, no es posible utilizar las cámaras de mayor resolución disponible y hay que aprovechar el aumento en resolución de las cámaras profesionales de formato pequeño. Sabemos cómo aprovechar las cámaras más avanzadas y de mayor resolución (hasta 80 MPíxeles), que cuestan varias veces más que las usadas por nosotros, y pronto estaremos en condiciones de hacerlo, para proyectos que requieran de gran precisión y donde el costo no sea la preocupación principal
- Cuando se requieren aeronaves especializadas para fotografía aérea, es difícil rentarlas, ya que en México no hay más de una docena de ellas, y no todas se encuentran donde las necesitamos.
- Existen imágenes satelitales con una resolución muy cercana a la que logramos, cuya captura puede ser más rápida y requerir menor esfuerzo. Su procesamiento también puede ser más fácil y algunas son económicas si se trata de datos de archivo. Pero las imágenes de este tipo, cuando se obtienen sobre pedido, son significativamente más caras que la fotografía aérea digital.
- Las cámaras aerofotográficas analógicas de película ya no se fabrican, lo que significa que ahora todas serán digitales, y en el mercado habrá equipos dedicados a obtener materiales de precisión. Sin embargo, el costo de los equipos (hasta 1 millón de dólares), que se transfiere a los usuarios finales para su amortización, resulta en levantamientos más costosos. Existe el riesgo de que las autoridades limiten el uso de

las cámaras de formato pequeño con criterios burocráticos o bajo presión de las empresas que adquieren estos equipos costosos.

Aun tomando en cuenta las desventajas, cuando las condiciones burocráticas y climáticas lo permiten, es posible lograr resultados muy cercanos a los de cámaras métricas o satélites de alta resolución, a un costo mucho menor.

5.3 Utilidad y aportaciones de los levantamientos de foto aérea para el IG y el país.

Las imágenes que se han obtenido en los últimos 12 años en el LAGe, algunas de las cuales han sido obtenidas y procesadas por mí, juegan un papel importante en varios ámbitos. Por ejemplo, se preparó a personal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Esta dependencia las aprovecha para la toma de decisiones en el manejo de las ANP Federales de México,. El grupo de SIG tuvo un crecimiento exponencial después de contar con solo una computadora y un técnico en 1999, hasta llegar a tener una infraestructura y equipo de punta, con personal capacitado en el manejo de los SIG, lo cual que permite elaborar mapas georeferenciados de las ANP de todo el país. Así se participó en proyectos específicos como: “Fotografía aérea digital”, que hemos impulsado y en los que hemos tenido una participación activa, desarrollando estas herramientas como apoyo para la administración de la ANP y el manejo de los recursos naturales.

Gracias al material generado en el LAGe, el cual, cabe destacar, ha mejorado sensiblemente su calidad a lo largo de los años, se ha establecido una metodología para evaluar el cambio en la densidad de cobertura forestal, realizar la evaluación de recursos naturales y monitoreo de procesos biológicos, ambientales, sociales y económicos.

Entre los 135 proyectos en los que hemos participado con estas técnicas se encuentran:

- Monitoreo anual de los cambios en la Cobertura Forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, con Fotografía Aérea Digital. Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), SEMARNAT. De 1999 a 2010.

- Evaluaciones en 2003, 2005 y 2008 del crecimiento urbano e invasiones al suelo de conservación de la Ciudad de México y zona metropolitana. Instituto de Geografía, Secretaría del Medio Ambiente GDF, Conacyt.
- Diagnóstico ambiental del sistema de marismas asociado al CIP Costa Pacífico, FONATUR.
- Mosaicos ortorectificados para identificar tipos de vegetación y definir el área inundable del proyecto Hidroeléctrico La Parota. CFE.
- Mosaico de la zona de desastre en Pijijiapan, Chiapas, México, ocurrido en Octubre de 1998.
- Mosaico controlado creado a partir de imágenes visibles e IR de una inundación de aguas negras, en Chalco, Estado de México.
- Evaluación de los cambios en la línea de costa en Quintana Roo y daños al manglar después del paso del huracán Wilma en Octubre de 2005.
- Elaboración de cartas OACI de obstáculos de los aeropuertos de Chetumal, Campeche,, Guaymas, Nuevo Laredo, Cd. Obregón, para Aeropuertos y Servicios Auxiliares. Inventario de Áreas Verdes Urbanas del Distrito Federal 2010.
- Detección de plagas en la Huasteca Potosina con imágenes visibles e infrarrojas: langosta de la caña de azúcar, roya del café y mosaico de los cítricos. SAGARPA, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Levantamiento de Áreas Naturales Protegidas y Reservas Naturales: Se generaron mosaicos de las Reservas de Los Tuxtlas y Chamela, de la UNAM, la Laguna de Agua Brava, los Pantanos de Centla, Laguna de Términos, El Tajín y la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel en Ciudad Universitaria.
- Imágenes utilizadas en más de diez manifestaciones de impacto ambiental, regionales y específicas, de entidades gubernamentales y empresas privadas.

5.4 Que cambios han generado en mi persona y como profesionalista

El trabajo dentro del LAGe me ha proporcionado un nuevo concepto de espacialidad, de forma que al interpretar las relaciones entre los fenómenos físicos con las actividades humanas, me ha permitido darme cuenta de lo subutilizado del territorio, poder dimensionar el potencial que tenemos en el país para contar con actividades productivas, notar el deterioro de ecosistemas, etc., creando en mi la necesidad y compromiso por aportar mi capacidad como profesionalista para difundir y mejorar esta técnica, aportar este tipo de material para su interpretación y así ayudar en la toma de decisiones que mejoren el nivel de los estudios y la calidad de vida de población en nuestro país.

A pesar de las complicaciones que se presentan en un levantamiento de fotografía aérea, también ha sido muy valioso y enriquecedor el conocer lugares nuevos, gente con diferentes formas de pensar, pero con la cuales he coincidido en que debe haber un compromiso nuevas formas de participación y de colaboración.

Puedo decir, en suma, que estas experiencias son las que completaron la formación teórica que recibí durante los estudios de licenciatura y me convirtieron en un profesionalista, en un profesional de la Geografía, capaz de resolver problemas con seguridad y creatividad.

BIBLIOGRAFÍA

- Blázquez, Carlos H., "Aerial color workshops. Twenty – four years later" , en *thirteenth Biennial on color aerial photography in the plant sciences*, Orlando, Florida, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1992, pp. 1-4.
- Croitoru, A. et al., (2004). "El modelo de función racional: Una Unificado de 2D y 3D esquema espacial de generación de datos". Actas de la Conferencia Anual ASPRS, Denver, Colorado, EE.UU.
- Chuvieco, Salinero, Emilio, *Teledetección ambiental*, Barcelona, Ariel, 2002, 586 p.
- Gómez, Delgado, Montserrat, Barredo Cano, José I., *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*, México, Edit. Alfaomega, 2005, 276 p.
- Graham, Ron, Read, Roger E., *Manual de fotografía aérea*, Barcelona, Edit. Omega, 1990, 359 p.
- Konecny, Gottfried, *Geoinformation. Remote sensing, photogrammetry and geographic information systems*, London, Ed. Taylor and Francis, 2003, 248 p. + ilus.
- Langford, Michael J., *Fotografía básica. Iniciación a la fotografía profesional*, Barcelona, Edit. Omega, 1984, 455 p.
- Peralta Higuera, A. Alafita H. y Prado-Molina J. (2007) Measuring shoreline change and mangrove damage after hurricane Wilma in the Mayan Riviera using color and near-infrared digital cameras. 21st Biennial Workshop on Aerial Photography, Videography and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Terre Haute, Indiana, EEUU. Mayo 15-17.

- Prado Molina, Jorge; Peralta Higuera, Armando; López García, José, “Utilización de imágenes aéreas digitales de pequeño formato para la evaluación de desastres.”, enero de 2009, 8 p.
- Prado Molina, Jorge; López García, José, “Metodología para estimar el cambio en la densidad de cobertura forestal con fotografías aéreas digitales de alta resolución”, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 13 p.
- Prado Jorge, Peralta Higuera Armando, Bisiacchi G & Palacio JL., (2001) 3-Axis Stabilized Platform and Monitoring System for Airborne Digital Imaging. ASPRS, 18th Biennial Workshop on Color Photography & Videography for Resource Assessment. Work No. 33 pp 1-10. Amherst, Massachusetts, May 16-18.
- Tao, CV y Hu, Y., (2001). "La función racional del modelo: una herramienta para el procesamiento de alta resolución las imágenes".Revista de Observación de la Tierra (MOE), 10 (1).

FUENTES DIGITALES Y PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS.

- Okeke, F.I., “Examen de Técnicas de ortorrectificación de imagen digital”, Departamento de Geomática y Topografía, Universidad de Nigeria, campus Enugu, Nigeria, http://www.gisdevelopment.net/technology/ip/fio_3.htm
- http://www.satimagingcorp.com/images/Orthorectification_Leica_19-NOV-05.jpg
- Prado J., Peralta A., Palacio-Prieto J.L. and Sandoval R. (2006) Airborne High-Resolution Digital Imaging Systems. Journal of Applied Research and Technology. Vol. 4 No. 1 April 2006. pp 3-23. (http://cibernetica.ccadet.unam.mx/jart/volumen4_1.htm)
- http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/12-%20levantamientos_aerofotogrametricos_analogicos.pdf