

Orientación espacial de múltiples sensores integrados con constreñimientos geométricos

SANTIAGO NAVARRO TARÍN

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría



Tesis Doctoral

**Orientación espacial de múltiples sensores integrados con
constricciones geométricas**

Valencia

Febrero 2014

Autor: **Santiago Navarro Tarín**

Director: **Dr. José Luis Lerma García**

Colección Tesis Doctorales

© Santiago Navarro Tarín

© 2014, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València
Telf.: 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es

ISBN: 978-84-9048-244-5 (versión impresa)

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

A mis padres

Agradecimientos

Quisiera agradecer a las personas que directa o indirectamente han ayudado en la generación de esta Tesis.

A José Luis Lerma, por guiarme, ayudarme y facilitar todos los medios necesarios para la generación de esta Tesis, por estar continuamente alimentando mi necesidad de aprender más en el campo de la fotogrametría y de las nuevas tecnologías.

A David Henández López, Luis García Asenjo y Pascual Garrigues Talens, por su contribución incansable, aportando experiencia en temas de planificación, sistemas INS, toma de datos, etc., para que el sistema multicámara portátil GNSS/INS fuera una realidad.

Al profesorado de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica, en especial Israel Quintanilla, Sergio Baselga, Ana Belen Anquela, Laura Sebastián, etc., que han sufrido mis abordajes por los pasillos en busca de información.

A Laura Hernández Fernández y Marga Valera Murcia por estar siempre ayudándome en todos los trámites administrativos.

A los miembros del Departamento de Producción Cartográfica y Desarrollo de Software de la empresa METRIA Digital S.L. de los cuales he aprendido mucho.

A mis amigos internacionales de Asturias, con los cuales he pasado grandes momentos.

A mi familia y en especial a mi hermano Juan Antonio.

A mis amigos que han sufrido mis ausencias por motivos de trabajo y de la Tesis, Adrián, David, Iván, José, Kevin, Mario, Martín y Néstor.

A Fábía por apoyarme desde el primer día.

RESUMEN

Las plataformas de georreferenciación de sensores, ya sean aerotransportadas, formando parte de los conocidos vehículos no tripulados (UAV), navales o terrestres, están teniendo mucho interés en los últimos años. La utilización de las técnicas de georreferenciación directa permite reducir los tiempos y optimizar la generación de cartografía y datos de distinta naturaleza espacial.

El objetivo de esta Tesis es el desarrollo e implementación de un programa informático capaz de integrar tanto la calibración de los sensores ópticos del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS, como establecer las relaciones geométricas entre los distintos sensores (ópticos y no ópticos) que conforman el soporte multicámara mediante constreñimientos geométricos. Adicionalmente, se pretende estudiar los distintos comportamientos del sistema multicámara portátil GNSS/INS bajo las condiciones geométricas impuestas, variando el número de puntos de apoyo necesarios para alcanzar una orientación absoluta de máxima calidad y fiabilidad en la orientación espacial de los sensores.

El método de ajuste de haces de rayos de un bloque de imágenes se utiliza en la calibración de los sensores que integran el sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS.

La georreferenciación mixta con puntos de apoyo dotados de coordenadas UTM está también implementada en el programa. El programa captura las coordenadas de la antena GNSS y la orientación de la IMU en el momento de toma de la imagen, generando lo que se conoce como georreferenciación directa de los sensores ópticos mediante un sistema no acoplado.

ABSTRACT

Georeferencing sensor platforms, either airborne -forming part of the known unmanned aerial vehicles (UAVs) - seaborne or land-based, are attracting very much interest in recent years. The use of direct georeferencing techniques allows users to reduce mapping processing times and optimize the generation of cartography and data of different spatial nature.

This Thesis aims the development and implementation of software capable of integrating both the optical sensor calibration of a portable GNSS/INS multi-camera photogrammetric system, and define the geometric relationships between the different sensors on the multicamera mount by means of geometric constraints.. Additionally, the different behaviors of the portable GNSS/INS multi-camera photogrammetric system under different imposed geometric conditions will be studied, varying the number of control points required to achieve an absolute orientation of maximum quality and reliability in the spatial sensor orientation.

The bundle adjustment method will be used for calibration of the sensors integrating the portable GNSS/INS multi-camera photogrammetric system. Mixed georeferencing with control points in UTM coordinates is also implemented in the software. The software acquires the GNSS antenna coordinates and the orientation of the IMU at the time of image acquisition, generating what is known as the direct georeferencing of optical sensors by a non-coupled system.

RESUM

Les plataformes de georreferenciació de sensors, ja siguin aerotransportades, formant part dels coneguts vehicles no tripulats (UAV), navals o terrestres, estan tenint molt interès en els últims anys. La utilització de tècniques de georreferenciació directa permet reduir els temps i optimitzar la generació de cartografia i dades de diferent naturalesa espacial.

L'objectiu d'aquesta Tesi és el desenvolupament e implementació d'un programa informàtic capaç d'integrar tant el calibratge dels sensors òptics del sistema fotogramètric multicàmera portàtil GNSS/INS, com les relacions geomètriques entre els diferents sensors que la conformen en el suport multicàmera mitjançant constreñiments geomètrics. Addicionalment, es pretén estudiar els diferents comportaments del sistema multicàmera portàtil GNSS/INS sota les condicions geomètriques imposades, variant el nombre de punts de suport necessaris per a obtindre una orientació absoluta de màxima qualitat i fiabilitat en l'orientació espacial dels sensors.

El mètode d'ajust de raigs d'un bloc d'imatges és utilitzat per al calibratge dels sensors que integren el sistema fotogramètric multicàmera portàtil GNSS/INS. La georreferenciació mixta amb punts de suport dotats de coordenades UTM està també implementada al programa. El programa captura les coordenades de l'antena GNSS i l'orientació de la IMU en el moment de captura de la imatge, generant el que es coneix com a georreferenciació directa dels sensors òptics mitjançant un sistema no acoplat.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	14
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	15
GPS/IMU,	19
1.2. OBJETIVOS	21
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS	22
2. ESTUDIO TEÓRICO	24
2.1. SISTEMAS DE COORDENADAS	24
2.1.1. <i>Sistema geodésico elipsoidal</i>	25
2.1.2. <i>Sistema geodésico local</i>	26
2.1.3. <i>Sistema astronómico local</i>	27
2.1.4. <i>Sistema imagen</i>	28
2.1.5. <i>Sistema IMU</i>	30
2.2. SISTEMAS DE REFERENCIA GEODÉSICOS GLOBALES, GRS80 Y GRS84	33
2.3. TRANSFORMACIÓN ENTRE SISTEMAS	35
2.3.1. <i>Transformación de ECEF a Geodésicas</i>	36
2.3.2. <i>Transformación de Geodésicas a ECEF</i>	37
2.3.3. <i>Transformación de ECEF a ENU^G</i>	38
2.3.4. <i>Transformación IMU a ENU^G</i>	41
2.4. PRECISIÓN EN LA TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS	42
2.4.1. <i>Precisión en coordenadas geocéntricas (ECEF) a partir de la precisión en coordenadas geodésicas (λ, φ, h)</i>	43
2.4.2. <i>Precisión en coordenadas geodésicas (λ, φ, h) a partir de la precisión en coordenadas geocéntricas (ECEF)</i>	44
2.4.3. <i>Precisión en coordenadas cartesianas geocéntricas (ECEF) a partir de la precisión en geodésicas locales (ENU^G)</i>	45
2.4.4. <i>Precisión en coordenadas geodésicas locales (ENU^G) a partir de la precisión en cartesianas geocéntricas (ECEF)</i>	46
2.5. PRINCIPIOS DE LA NAVEGACIÓN INERCIAL	47
2.6. INTRODUCCIÓN A LOS SENSORES DE NAVEGACIÓN UTILIZADOS EN EL SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO MULTISENSORIAL	49
2.6.1. <i>Global Navigation Satellite System (GNSS)</i>	49
Técnicas de observación	50
Precisión y errores	52
2.6.2. <i>Unidad de medida inercial (IMU)</i>	53
Acelerómetros	54
Giróscopos	55
Errores de la IMU	57
2.6.3. <i>Sistema de captura de datos multisensorial</i>	58
2.7. INTEGRACIÓN GNSS/IMU	59
2.7.1. <i>Modo no acoplado</i>	60
2.7.2. <i>Modo ligeramente acoplado</i>	60
2.7.3. <i>Modo totalmente acoplado</i>	61
2.7.4. <i>Precisiones de la integración cámaras - GNSS/IMU</i>	62
2.7.5. <i>Alineación de un sistema inercial</i>	63
2.7.6. <i>Filtro Kalman</i>	64
3. SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO MULTISENSORIAL	65

3.1.	DISEÑO DEL SISTEMA MULTICÁMARA PORTÁTIL GNSS/INS	65
3.2.	RECEPTOR GNSS	66
3.3.	UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL	67
3.4.	SENSORES FOTOGRAMÉTRICOS.....	68
3.5.	GEORREFERENCIACIÓN DE LAS IMÁGENES	69
3.6.	CÁLCULO DE LA ORIENTACIÓN EXTERNA DIRECTA DE LA CÁMARA	71
3.7.	CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS Y DEL SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO MULTICÁMARA PORTÁTIL GNSS/INS	74
3.7.1.	<i>Calibración sensores ópticos</i>	75
3.7.1.1.	Distorsión radial.....	77
3.7.1.2.	Distorsión tangencial	78
3.7.1.3.	Distorsión afín	78
3.7.2.	<i>Calibración del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS</i>	79
3.7.2.1.	Excentricidad Receptor GNSS-IMU	79
3.7.2.2.	Excentricidad IMU-Cámara	80
3.7.2.3.	Desalineamiento de ejes IMU-Cámara.....	80
3.7.2.4.	Traslación y deriva del receptor GNSS	80
3.7.2.5.	Modelo matemático	81
3.8.	CONSTREÑIMIENTOS DEL SISTEMA.....	83
3.8.1.	<i>Constreñimiento de base</i>	84
3.8.2.	<i>Constreñimiento de convergencia de ejes</i>	85
4.	METODOLOGÍA	87
4.1.	ESQUEMA DE TRABAJO.....	87
4.2.	PROCESO.....	88
4.3.	SINCRONIZACIÓN DE LOS SENSORES.....	91
4.4.	GENERACIÓN DEL REGISTRO DE LA INS	93
4.5.	CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS CÁMARAS	95
4.6.	IMPORTACIÓN DE CONSTREÑIMIENTOS GEOMÉTRICOS.....	98
4.7.	ORIENTACIÓN ABSOLUTA	99
4.8.	CALIBRACIÓN DEL SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO GNSS/INS	100
5.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	102
5.1.	GEORREFERENCIACIÓN.....	102
5.1.1.	<i>Georreferenciación directa</i>	105
5.1.2.	<i>Georreferenciación directa con ajuste de haces (Georreferenciación mixta)</i> ...	107
5.1.3.	<i>Estudio del comportamiento de ajuste de haces con y sin constreñimientos</i> ...	110
5.1.4.	<i>Georreferenciación directa con imágenes de formato reducido</i>	117
5.2.	GENERACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS 3D	120
6.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	123
6.1.	CONCLUSIONES	123
6.2.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	125
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
7.1.	BIBLIOGRAFÍA	126
7.2.	GLOSARIO	135
ANEJO I	PROYECTO FOTOGRAMÉTRICO.....	137
AI.1	ORIENTACIÓN EXTERNA EN SISTEMA ENU ^G	137
AI.2	PUNTOS DE APOYO OBTENIDOS POR TOPOGRAFÍA	138
AI.3	PUNTOS DE APOYO OBTENIDOS POR FOTOGRAMETRÍA	139
AI.4	CONVERGENCIA DE EJES Y DISTANCIA.....	140
AI.5	PARÁMETROS INTERNOS CALIBRADOS DE SENSORES ÓPTICOS	140

AI.6	PARÁMETROS CALIBRADOS DEL SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO GNSS/INS	142
ANEJO II	PARÁMETROS DE ORIENTACIÓN EXTERNA DE SENSORES ÓPTICOS.....	144
AII.1	DATOS NECESARIOS PARA LA GEORREFERENCIACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	144
AII.2	GEORREFERENCIACIÓN DIRECTA SIN CONSTREÑIMIENTOS	144
AII.3	GEORREFERENCIACIÓN DIRECTA CON CONSTREÑIMIENTOS.....	146
ANEJO III	LISTADO DE PUBLICACIONES RELACIONADAS CON ESTA TESIS	148

Índice de Figuras:

Figura 1.1 GPSVision	16
Figura 1.2 UAV Pelicano	17
Figura 1.3 Precisión en los métodos de medición en relación al tamaño del objeto/area (Eisenbeiss, 2011)	22
Figura 2.1 Sistema geodésico elipsoidal	26
Figura 2.2 Sistema geodésico local	27
Figura 2.3 Giro Guiñada sobre el plano tangente ENU ^A	28
Figura 2.4 Proyección de un punto M sobre el sistema imagen	29
Figura 2.5 Sistema de coordenadas de la IMU Xsens.....	30
Figura 2.6 Sistemas de coordenadas de la IMU y de las dos cámaras montadas sobre el sistema multicámara portátil GNSS/INS: a) vista de frente; b) vista en planta.....	31
Figura 2.7 Detalle giro Guiñada (Z).....	31
Figura 2.8 Giro Cabeceo (X) libre, independiente de su vertical	32
Figura 2.9 Giro Cabeceo (X) fijo.....	32
Figura 2.10 Giro Alabeo (Y)	33
Figura 2.11 Flujo de los sistemas de coordendas en el sistema fotogramétrico multicámara GNSS/INS	36
Figura 2.12 Sist. ECEF y sist. ENU ^G	38
Figura 2.13 Rotación Z de ECEF	38
Figura 2.14 Rotación y de ECEF	39
Figura 2.15 Rotación de 90° en Z de ECEF.....	40
Figura 2.16 Errores GPS	53
Figura 2.17 Sistema básico de la IMU (Jekeli, 2000)	54
Figura 2.18 Clasificación de giróscopos. En gris los más utilizados en orientación directa de sensores (Skaloud, 1999).....	56
Figura 2.19 Componentes básicos de una cámara digital (Lerma García, 2002)	59
Figura 2.20 Modo de integración no acoplado (Sanz Muñoz, 2004).....	60
Figura 2.21 Modo de integración ligeramente acoplado (Sanz Muñoz, 2004)	61
Figura 2.22 Modo de integración totalmente acoplado (Sanz Muñoz, 2004)	61
Figura 2.23 Integración centralizada GNSS/INS	64
Figura 3.1 Sistema multicámara portátil GNSS/INS con extensión de antena.....	65
Figura 3.2 Trimble 5700.....	66
Figura 3.3 IMU Mtx	67
Figura 3.4 izq.: Cámara Canon D60; der.: Cámara Canon EOS- 1DS	68
Figura 3.5 Flujo de datos en georreferenciación directa.....	70
Figura 3.6 Relaciones geométricas en el sistema multicámara portátil GNSS/INS	72
Figura 3.7 Pieza calibración 3D (3Dcomplete, 2012)	77
Figura 3.8 Efecto de la translación y de la deriva sobre la trayectoria.....	81
Figura 3.9 Diagrama de ajuste en la calibración del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS.....	82
Figura 3.10 Diagrama de ajuste de la GD con constreñimientos geométricos	83
Figura 3.11 Constreñimiento de base	84
Figura 3.12 Convergencia de ejes	85
Figura 4.1 Flujo de trabajo	88
Figura 4.2 Cálculo GSD a 20 m: a) Canon EOS D60; b) Canon EOS-1Ds Mark III GIFLE 24mm	89

Figura 4.3 Diámetros de las marcas codificadas (a) y de las dianas (b).....	90
Figura 4.4 Campo de calibración: pirámide invertida sita en el Campus de Vera.....	90
Figura 4.5 UCT	91
Figura 4.6 Desfase temporal en las tomas de ambas cámaras en distintos estacionamientos.....	92
Figura 4.7 Sincronización temporal de ambas cámaras realizada por la TCU.....	92
Figura 4.8 Formulario de generación del registro GPS/IMU	93
Figura 4.9 Formulario de integración de sensores	94
Figura 4.10 Detalle del residuo sin calibrar y calibrado: fila superior, Canon EOS 1Ds Mark III; fila inferior, Canon EOS D60.....	96
Figura 4.11 Rayos homólogos que se cruzan a la hora de determinar las coordenadas de un punto objeto en cámaras sin calibrar.....	97
Figura 4.12 Rayos homólogos que se cruzan (cortan) a la hora de determinar las coordenadas de un punto objeto con las cámaras calibradas (mismos datos que Fig. 4.11)	97
Figura 4.13 Importación de constreñimientos del sistema.....	98
Figura 4.14 Orientación Absoluta.....	99
Figura 4.15 Definición del elipsoide de referencia.....	99
Figura 4.16 Error de transformación de los Puntos de Apoyo	100
Figura 5.1 Registro realizado por el sistema fotogramétrico durante la navegación en el campo de calibración.....	102
Figura 5.2 Error medio de reproyección de los PA sobre las imágenes con GD con y sin los parámetros de desalineamiento de cámaras, desfase entre cámaras-IMU, desfase GNSS-IMU, la translación y la deriva del GNSS calibrados.....	103
Figura 5.3 Líneas de correspondencia de las dianas, marcadas automáticamente en Orthoware©, entre cámaras: a) cámara EOS D60; b) cámara EOS 1Ds Mark III.....	104
Figura 5.4 Residuos píxel de la georreferenciación directa.....	105
Figura 5.5 Diferencias entre los PC observados y calculados por GD	106
Figura 5.6 Histograma de error en la intersección espacial de los puntos medidos tras la GD (m).....	107
Figura 5.7 Diferencias en el proceso de intersección espacial respecto a los PC, utilizando dos soluciones: georreferenciación directa (GD); georreferenciación directa más ajuste de haces (GD+AH)	108
Figura 5.8 Residuos píxel de la georreferenciación directa con ajuste de haces (GD+AH).....	108
Figura 5.9 Error de intersección de la georreferenciación directa con ajuste de haces (GD+AH).....	109
Figura 5.10 Croquis de la distribución de los PC y PA	110
Figura 5.11 Desviaciones respecto a la media de convergencia de ejes X	111
Figura 5.12 Desviaciones respecto a la media de convergencia de ejes Y	111
Figura 5.13 Desviaciones respecto a la media de convergencia de ejes Z	111
Figura 5.14 Desviaciones de las distancias respecto a la media.....	112
Figura 5.15 Residuos píxel de la georreferenciación mixta más constreñimientos (GD + AH + Const).....	112
Figura 5.16 Error de intersección de la georreferenciación mixta con constreñimientos (GD+AH+Const)	113
Figura 5.17 Vista 3D de los PA y PC: a) sin AH; b) con AH	113

Figura 5.18 Promedio del error de intersección de los puntos medidos en las imágenes	114
Figura 5.19 Comparación de diferencias con PC entre constreñimientos aplicados.	114
Figura 5.20 Residuos píxel medios de los ajustes realizados	115
Figura 5.21 Desviación típica de la orientación angular GM.....	116
Figura 5.22 Desviación típica de la orientación angular GM + Const.	116
Figura 5.23 Error del centro de proyección GM.....	117
Figura 5.24 Error del centro de proyección GM + Const.	117
Figura 5.25 GSD de formato reducido	118
Figura 5.26 Detalle de Diana de PA en la imagen original (a) y su imagen reducida (b)	118
Figura 5.27 Diferencias de los PC observados y calculados con imágenes de FR georreferenciadas.....	119
Figura 5.28 Residuo píxel medio en imágenes FR georreferenciadas	119
Figura 5.29 Nube de puntos 3D y configuración espacial de la toma. Vista en planta	121
Figura 5.30 Nube de puntos 3D y configuración espacial de la toma. Vista en perspectiva	122

Índice de tablas:

Tabla 1 Principales sensores de un MMS y sus funcionalidades (Grejner-Brzezinska, Ron, Haala, & Toth, 2002)	18
Tabla 2 Descripción de algunos sistemas de cartografiado móvil (Grejner-Brzezinska, 2001), ampliada con sistemas recientemente incorporados al mercado	19
Tabla 3. Parámetros de los sistemas WGS84 y GRS80	34
Tabla 4 Precisiones GPS (Eneriquez, 2006).....	52
Tabla 5 Errores GNSS (Jekeli, 2000).....	53
Tabla 6 Precisiones típicas de los acelerómetros (Barbour, 2010).....	55
Tabla 7 Precisiones típicas de giróscopos (Barbour, 2010).....	57
Tabla 8 Precisión absoluta POS AV.....	63
Tabla 9 Precisión POS AV Post-Proceso Orientación relativa	63
Tabla 10 Características GPS Trimble 5700	66
Tabla 11 Especificaciones Xsens MTx.....	67
Tabla 12 Características Cámaras.....	68
Tabla 13 GSD de las cámaras	89
Tabla 14 Error de reproyección alcanzado con las cámaras sin calibrar	95
Tabla 15 Error de reproyección alcanzado con las cámaras calibradas	95
Tabla 16 Parámetros de transformación ENU ^G -Modelo	100
Tabla 17 Errores de intersección en GD	106
Tabla 18 Error intersección GD con ajuste de haces	109
Tabla 19 Orientación Canon EOS-1Ds Mark III 24mm.....	142
Tabla 20 Orientación Canon EOS-D60 15mm	142
Tabla 21 Desalineamiento Canon EOS-1Ds Mark III 24mm.....	142
Tabla 22 Desalineamiento Canon EOS-D60 15mm	142
Tabla 23 Desfase GNSS-IMU	143
Tabla 24 Translación GNSS	143
Tabla 25 Deriva GNSS	143
Tabla 26 Orientación externa sin constreñimientos.....	144
Tabla 27 Orientación externa con constreñimientos	146

1. Introducción

1.1. Introducción y antecedentes

La incorporación e integración de sistemas satelitales de navegación global GNSS (GPS, Glonass, Galileo, Compass), junto a sistemas de navegación inercial (INS), y sensores de captura de datos de diversa naturaleza, tanto ópticos (videocámaras y cámaras multispectrales) como no ópticos (rádar y escáner láser), están abriendo un importante campo, especialmente en labores de planificación, navegación, georreferenciación y optimización de procesos (Alba, et al., 2011; Burman, 2000; Changjun, et al., 2009).

El concepto de GPS/INS para la georreferenciación directa de imágenes aéreas apareció en la década de los 80 por investigadores de la Universidad de Calgary, Canadá (Hutton & Mohamed, 2005). En la actualidad la georreferenciación directa se utiliza en la obtención de la orientación de multitud de sensores como pueden ser cámaras digitales, videocámaras, sistemas LIDAR, SAR, SONAR, etc. En muchos casos puede llegar a ser el único modo de georreferenciar al sensor.

Estos métodos de georreferenciación se están utilizando con fines tanto civiles como militares (Everaerts, 2008). Algunos de los usos civiles que tiene son inventarios catastrales (Sánchez Lopera & Lerma García, 2012; Eisenbeiss, 2011); documentación de patrimonio arqueológico y cultural (Bendea, et al., 2007; Remondino, et al., 2011); cartografiado e inspección de situaciones de emergencia como incendios, terremotos, inundaciones, etc. (Oktay & Guoqing, 2009; Kim, et al., 2012); inventario de señalización de carreteras, bases de datos de la red viaria, inspección del estado de carreteras, clasificación de áreas urbanas (Grejner-Brzezinska, et al., 2002); agricultura y zonas forestales para la identificación de cultivos, masas vegetales (Grenzdörffer, et al., 2008).

La fotogrametría de corto alcance es útil en muchos campos: ingeniería, industria, medicina, geología, etc. También en labores de documentación patrimonial, conservación, restauración arquitectónica y arqueológica en los que se necesitan métodos fáciles y baratos de registro de datos, permitiendo a personal no experto poder utilizar sistemas de georreferenciación directa (Kirchhöfer, et al., 2010; Kirchhöfer, et al., 2011; Madeira, et al., 2007).

El sistema de cartografiado móvil, comúnmente llamado Mobile Mapping System (MMS), puede definirse como una plataforma cinemática, con múltiples sensores GNSS/INS integrados y sincronizados a un sistema de tiempo común, capaz de proveer de posiciones 3D de manera continua y automática a la plataforma móvil y simultáneamente recoger datos geospaciales (Grejner-Brzezinska, 2001).

El concepto de MMS data de principios de los 90 cuando se inició el desarrollo del GPSVan por parte de la Universidad del Estado de Ohio (Bossler & Toth, 1996). GPSVan puede ser considerada la primera plataforma terrestre diseñada para la georreferenciación directa de imágenes y automatización de captura de datos. Al

mismo tiempo la Universidad de Calgary junto con Geofit Inc. comenzó el desarrollo de VISAT diseñado para el mapeado móvil (Schwarz & El-Sheim, 2004).

A mediados de los 90 fueron apareciendo sistemas con un modo de funcionamiento similar (Tabla 2), por ejemplo, el GPSVision de Lambda Tech International (Figura 1.1), equipado con un módulo de posicionamiento GPS, sistema inercial (INS) y cuatro cámaras digitales de alta resolución montadas sobre el techo del vehículo.



Figura 1.1 GPSVision

La precisión obtenida en un MMS basado en sensores ópticos para la reconstrucción de la escena, depende en gran medida de la resolución del sensor, la distancia entre cámaras, la calibración de los parámetros físicos y la distancia a la escena que se pretende capturar (Bossler & Toth, 1996). Con una base de 2 m entre cámaras y con distancias al objeto de 5 a 20 m la precisión es de 10 a 20 cm si el sistema está perfectamente calibrado (He, et al., 1994). Actualmente la compañía Geocopia ofrece un sistema MMS totalmente con sensores ópticos, alcanzando precisiones absolutas de 2 cm a distancias de 20 m (GeoAutomation, 2013). El Instituto Cartográfico de Cataluña ha desarrollado el sistema Geovan que permite de manera flexible la integración de diversos sensores para la adquisición de datos de interés cartográfico; las precisiones de los modelos estereoscópicos georreferenciados de forma directa son de 3 a 5 cm en las direcciones perpendiculares a la marcha del vehículo y de 13 cm en la dirección de marcha del vehículo (Bosch, et al., 2003).

La compañía INDRA ha desarrollado Pelicano, un sistema de aeronave no tripulado (UAV) multisensor y multiplataforma montado sobre helicóptero con más de 6 h de autonomía, dotado de sensores electro-ópticos de visión diurna e infrarroja; la plataforma está preparada para que pueda portar un radar ligero (Figura 1.2). También existe una versión terrestre de Pelicano que va transportado en un vehículo 4x4 capaz de navegar a una distancia de 150 km de la base de control (Indra, 2012).



Figura 1.2 UAV Pelicano

Los MMS más comunes están diseñados de forma modular de manera que pueden instalarse en distintas plataformas tanto aéreas como terrestres, y sus componentes se pueden reemplazar para poder modificar o mejorar la captura de los datos.

Los módulos principales de un MMS son (Grejner-Brzezinska, 2001):

1. Módulo de control.
2. Módulo de posicionamiento.
3. Módulo de captura de datos (imagen, sonido, scanner, etc.).
4. Módulo de post-proceso de datos.

El conjunto de todos estos módulos crea un sistema de adquisición de datos para la generación de cartografía, mapeados y GIS.

Cuanto más sensores de captura de datos de distinta naturaleza se incorporen, mayor será el registro de las propiedades físicas del objeto y mejor será la descripción en la interpretación y estudio del mismo (Tabla 1). Las diferentes respuestas que crean los distintos materiales a las longitudes de onda de diferentes materiales como son el agua, la vegetación, los aceites, los tipos de suelo, etc., hacen que plataformas con sensores multispectrales sean una opción cada vez más interesante para el estudio de anomalías de los materiales que compone el objeto capturado por los sensores (Alba, et al., 2011; Oktay & Guoqing, 2009; Borrmann, et al., 2012; Hernández-López, et al., 2012; Cabrelles, et al., 2009; Gianinetta, et al., 2005).

Actualmente los sistemas de navegación inercial (INS) están basados en 3 giróscopos y 3 acelerómetros fijados al cuerpo de la plataforma que define el sistema de coordenadas y que normalmente coincide con los ejes principales del vehículo (Bäumker & Heimes, 2001).

El empleo de un sistema global de navegación por satélite (GNSS) en modo cinemático en tiempo real (GNSS-RTK) permite obtener coordenadas de los centros de proyección de las cámaras expresadas en un sistema de referencia geodésico, obteniendo precisiones del orden del centímetro en términos relativos y en absolutos del orden de 5 cm (García-Asenjo, et al., 2008) llegando a mm en post-proceso (Colomina, 2000). Las limitaciones de la técnica RTK son: primero, no se puede utilizar en interiores; segundo, tampoco se puede utilizar en exteriores con obstrucciones; tercero, hay que disponer de dos antenas. Para la georreferenciación en interiores existen alternativas como sistemas de triangulación de interiores (ITS) que

proporcionan la posición de dispositivos mediante sistemas de visión, dispositivos de Bluetooth, Wi-Fi o GSM (Global System Mobile communications) (Bejuri, et al., 2011).

La orientación de las cámaras puede obtenerse mediante la unidad de medida inercial (IMU), que además permite trabajar en interiores. Las aceleraciones medidas y tratadas mediante la integración de la ecuación fundamental de la navegación inercial (Ec. 2-49) permite el cálculo de la trayectoria descrita, aunque afectada de deriva.

Tabla 1 Principales sensores de un MMS y sus funcionalidades (Grejner-Brzezinska, Ron, Haala, & Toth, 2002)

Sensor	Funcionalidad
GPS	Georreferenciación. Sincronización de tiempo entre GPS e INS. Control del tiempo de captura de otros sensores. Control del error del INS.
IMU	Orientación 3D de los sensores de captura. Ofrece soporte en la georreferenciación de las imágenes, por pérdidas de señal GNSS, dando una trayectoria continua. Apoyo a la resolución y fijación de las ambigüedades después de las pérdidas de ciclo del GNSS.
Cámaras	Ofrece el texturizado de la escena. Si son más de una cámara permite obtener posiciones en 3D de la escena, permitiendo corregir de esta manera posibles errores de posicionamiento del GNSS/INS.
Láser escáner	Permite obtener gran cantidad de puntos de la escena. Apoyo a la extracción de entidades de las imágenes.
Otros sensores : <ul style="list-style-type: none"> ● RADAR ● Grabadoras de sonido ● Gravímetros ● Termómetros ● Barómetros ● etc. 	Permiten obtener datos de la escena que posteriormente se pueden georreferenciar introduciendo los datos en un GIS para su evaluación. Aportan atributos a los datos capturados.

Para una mejor georreferenciación de los sensores nos encontramos con la utilización de constreñimientos. Extender el modelo matemático con constreñimientos reduce la varianza de los parámetros estimados, reduce correlaciones entre parámetros y aumenta la redundancia del modelo (Cothren, 2005). En sistemas fotogramétricos, la utilización de constreñimientos es un procedimiento muy común, como pueden ser el

constreñimiento epipolar, inclusión de distancias conocidas entre puntos, acimuts, relaciones entre estacionamientos, etc. (Bruce King, 1995; Lerma, et al., 2010; Börlin, et al., 2004; Cornou, et al., 2003; Deng, et al., 2008; Van den Heuvel, 1998).

El uso de constreñimientos en sistemas GNSS/INS, está siendo utilizado para mejorar las orientaciones obtenidas de las cámaras, como por ejemplo mediante la utilización de constreñimientos de puntos colineales (Cothren, 2005) o constreñimientos donde los sensores permanecen en la misma posición durante el proceso de navegación para corregir los desalineamientos de las cámaras (Lee & Yilmaz, 2011). Los constreñimientos proporcionan información espacial al ajuste, éste puede ser utilizado para orientar o escalar el modelo sin necesidad de medir distancias del objeto capturado, siendo esta propiedad de gran utilidad para procesos de orientación automática, struct from motion (Ahmadabadian, et al., 2013).

La tendencia de los sistemas de cartografiado (Tabla 2), está dirigiéndose hacia sistemas más complejos que combinan múltiples sensores de distinta naturaleza, por lo que el uso de constreñimientos que condicionen sus relaciones geométricas durante los cálculos será una tarea cada vez más común.

En esta tesis estudiaremos el comportamiento de los constreñimientos geométricos: de base y convergencia de ejes sobre los sensores ópticos; y como éstos pueden ayudar a una mejor navegación por georreferenciación directa mediante GNSS/INS.

Tabla 2 Descripción de algunos sistemas de cartografiado móvil (Grejner-Brzezinska, 2001), ampliada con sistemas recientemente incorporados al mercado

MMS	Institución de desarrollo	Sensores de Navegación	Sensores de captura
GPSVanTM	Center for Mapping, Ohio State University	GPS/gyro/wheel counter GPS/INS	2 CCD, grabadoras de sonidos
VISAT	University of Calgary	GPS/INS/ABS	8 b/w CCD , 1 color SVHS 10 VHS,
GeoVan	Geospan Corp., USA	GPS/DR	grabadoras de sonidos
GPSVisionTM	Lambda Tech, Inc., USA	GPS/INS	2 color CCD
KISS	University of Bundeswher Munich and GeoDigital, Germany	GPS/IMU, inclinómetro, odómetro, barómetro	1 SVHS, 2 b/w CCD, grabadoras de sonidos
ON-SIGHT	Transmap Corp., USA	GPS/INS	4 color CCD
RGIAS	Rowe Surveying & Engineering, Inc., USA	GPS	videocámara, distanciómetros
Truckmmap	John E. Chance, Inc., USA	GPS/gyro/WADGPS	distanciómetros, 1 videocámara

WUMMS	Wuhan University, China	GPS	3 videocámara, distanciómetros
ROMDAS	Highway and Traffic Consultants, Ltd., New Zealand	GPS	videocámara digital
DDTI	Digital Data Technologies, Inc., USA	GPS	pantallas táctiles, grabadoras de sonidos
POS/LVTM 420	Applanix Corp., Canada	GPS/INS (DMI)/GPS acimuth measurement subsystem (GAMS)	CCD, videocámara
IP-S2	Topcon Instituto Cartográfico de Cataluña. Barcelona (España)	(GPS+GLONNAS)/INS	laser escáner
GEOVAN	3D Laser Mapping Ltd & IGI mbH (Alemania)	2GPS / INS odómetros	laser escáner, videocámara digital
STREET-MAPPER	Leica (Suiza)	GPS, ING (FOG)	laser escáner, 2 videocámaras digitales, cámara 360°
LEICA PEGASUS:ONE	Trimble (USA)	GNSS/IMU	laser escáner, 6 cámaras digitales
Trimble MX8	Mitsubishi (Japón)	POS LV 420	laser escáner, cámaras panorámicas
MMS X	Optech (USA)	GPS/IMU, odómetro	4 laser escáner, 6 cámaras digitales
Lynx Mobile Mapper	Riegl (Austria)	POS LV 420	laser escáner, >4 cámaras digitales
RIEGL VMX-250		GNSS/IMU, odómetro	2 laser escáner VQ-250, 6 cámaras digitales

1.2. Objetivos

La calibración de cámaras por medio del método de ajuste de haces de rayos (AH) es una solución muy extendida en el mundo fotogramétrico que permite ajustar los parámetros internos y externos de las cámaras. También es común introducir al modelo matemático de ajustes de haces, constreñimientos geométricos en forma de observables para que el modelo cumpla una serie de requisitos en el espacio (Bruce King, 1995; Kraus, et al., 1997). Existen muchos métodos para constreñir las orientaciones de las cámaras, como por ejemplo, añadir la distancia y la orientación relativa entre los centros de proyección de las cámaras, incluir puntos fijos, distancias, direcciones o los ángulos que forman los objetos del modelo fotografiado (Grossmann & Santors-Victor, 2005; Sminchisescu, et al., 2005; Cornou, et al., 2003).

El objetivo de la investigación es mejorar los métodos de calibración de un sistema de cartografiado móvil que combina sensores de imagen con diferentes tipos de resolución, introduciendo constreñimientos geométricos en los centros de proyección que ligen los sensores de imagen, el receptor GNSS y el sensor inercial IMU. El modelo matemático mínimo-cuadrático extendido a utilizar, incluirá constreñimientos a partir de las observaciones GNSS/INS, constreñimientos geométricos y parámetros adicionales que redundarán en una mejor calidad del ajuste final.

Para ello se ha desarrollado un programa informático, que procesa los datos recibidos de los sensores del soporte de sistema fotogramétrico multi-cámara portátil para aplicaciones terrestres (Lerma García, et al., 2009), en adelante, sistema multicámara portátil GNSS/INS, y que permite su calibración, introducido como un módulo más al software FOTOGIFLE, desarrollado por el autor el núcleo de algoritmos fotogramétricos y resultado de siete años de trabajo e investigación en el Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner, GIFLE (GIFLE, 2013). Entre otras acciones, el programa FOTOGIFLE es capaz de orientar, ajustar y calibrar bloques de imágenes, generar densas nubes de puntos 3D por correlación, generación de ortoimágenes, texturización automática de modelos digitales, etc.

En el diseño de una plataforma multisensorial GNSS/INS se debe tener en cuenta los requerimientos de precisión requeridos. Por ejemplo, la Figura 1.3, muestra algunas de las precisiones típicas requeridas en distintas áreas de aplicación según el tamaño del área/objeto a cartografiar. De este modo se pueden reducir costes eligiendo uno u otro tipo de sensor, velocidad de desplazamiento, tiempo de captura, etc.

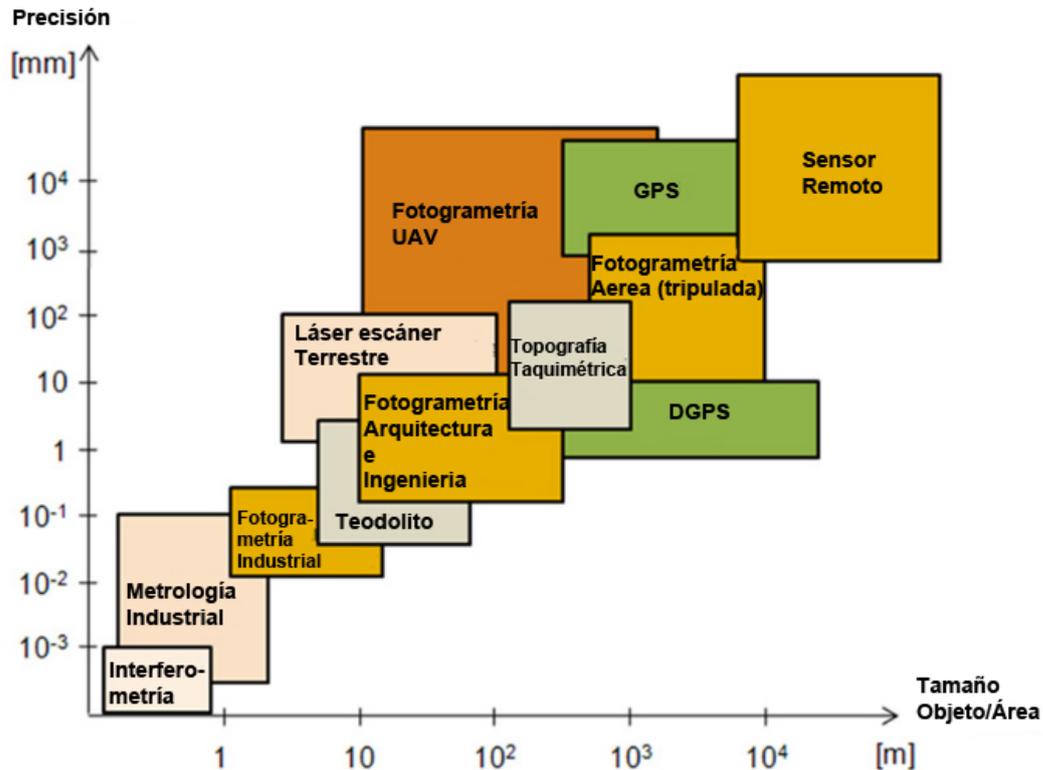


Figura 1.3 Precisión en los métodos de medición en relación al tamaño del objeto/area (Eisenbeiss, 2011)

1.3. Estructura de la Tesis

Seguidamente encontraremos tres capítulos que nos ayudarán a entender, asentar y comprender los resultados de la investigación que se presentan en el capítulo 5 (Aplicación de la metodología). Estos capítulos iniciales son:

- Capítulo 2 - Estudio teórico: Se comentarán, los distintos sistemas de coordenadas por el que pasa todo sistema de navegación inercial, transformación entre ellos y su propagación de errores. También encontraremos una descripción de los diferentes tipos de sensores utilizados para la georreferenciación que existen en el mercado y los modos y procedimientos para el funcionamiento de un sistema GNSS/IMU.
- Capítulo 3 - Sistema Fotogramétrico Multisensorial: En este capítulo se explicará, el diseño y los sensores utilizados, además de los cálculos necesarios para la calibración y georreferenciación del sistema multicámara portátil GNSS/INS.
- Capítulo 4 - Metodología: Se explicará el modo de trabajo seguido para la obtención de los resultados de la georreferenciación de las imágenes.

Se han separado en tres apartados y en este orden, con el fin de que permita al lector adquirir unos conocimientos, que le sirvan para comprender de una manera más intuitiva y paulatina los apartados siguientes.

- Capítulo 5 - Aplicación de la metodología: Se mostrarán los resultados obtenidos del sistema fotogramétrico multisensorial GNSS/INS. Se compararán los resultados de la georreferenciación directa, con y sin constreñimientos geométricos entre los sensores ópticos aplicados sobre imágenes con puntos de paso de geometría débil y mala distribución sobre las imágenes.
- Capítulo 6 - Conclusiones y futuras líneas de investigación: Se verán las conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos en el Capítulo 5, así como futuras direcciones de investigación que se pueden seguir.

2. Estudio teórico

La georreferenciación directa requiere de distintos sistemas de captura y de referencia. Los datos desde su recepción por el sensor correspondiente sufren una serie de transformaciones geométricas hasta que el dato resultante está georreferenciado.

Por esta razón, trataremos en los siguientes apartados unos conceptos teóricos que permitirán al lector asentar unos conocimientos básicos sobre sistemas y transformaciones de coordenadas que se utilizan en el sistema fotogramétrico GNSS/INS. Asimismo, también se repasarán los sensores de navegación y los diferentes modos que existen para integrar los datos que nos proporcionan la IMU y el GNSS.

2.1. Sistemas de coordenadas

A continuación se explicarán los diversos sistemas de referencia que afectan al sistema de cartografiado móvil GNSS/INS.

Es necesario un sistema de referencia terrestre que establezca las coordenadas sobre la Tierra, una herramienta imprescindible en el desarrollo de la Cartografía, la Topografía, la Navegación y para localizar cualquier observación que se realice sobre la superficie terrestre (Martín & Padín, 2004).

En primer lugar se deben distinguir los siguientes conceptos:

- **Sistema de referencia:** teorías, hipótesis y constantes que permiten situar una triplete de ejes coordenados en el espacio, definiendo su origen y su orientación. Los sistemas de referencia son ortogonales, dextrógiros y cartesianos, y la relación entre ellos es solo por medio de rotaciones y traslaciones.
- **Sistema de referencia convencional:** sistema de referencia donde se especifica de manera concreta todas las constantes numéricas, los parámetros e hipótesis y teorías para el establecimiento del sistema de referencia.
- **Marco de referencia:** la materialización de un conjunto de puntos (lugares localizados en la superficie terrestre) con coordenadas y velocidades conocidas en el sistema de referencia convencional y que sirven para materializar en el espacio el sistema de referencia.
- **Sistema de coordenadas:** la parametrización de las coordenadas de los puntos que forman el marco de referencia. En este sentido existen infinitos sistemas de coordenadas para parametrizar el marco de referencia, por ejemplo, las coordenadas (x, y, z) , (φ, λ, H) , (E, N, U) , etc.

2.1.1. Sistema geodésico elipsoidal

Los GNSS utilizan sistemas de referencia fijos y centrados en la Tierra, conocidos como sistemas Earth Centered Earth-Fixed (ECEF). El GPS utiliza el llamado World Geodetic System (WGS-84). Asociado al sistema se encuentra un elipsoide de revolución geocéntrico, definido por 4 parámetros (Tabla 3).

Un punto **P** en el sistema geodésico (GEOD), queda definido por 3 coordenadas (Figura 2.2):

- **Latitud geodésica φ** : es el ángulo medido en el plano meridiano, que forman la normal al elipsoide en el punto y el plano del ecuador. En el sistema elipsoidal el plano meridiano es el definido por la normal al elipsoide y el propio eje de rotación, ya que ambas rectas se cortan en el espacio, formando un plano.
- **Longitud geodésica λ** : es el ángulo medido en el plano del ecuador, que forman el plano meridiano que contiene al punto y el plano meridiano de Greenwich.
- **Altitud elipsoidal h** : es la distancia entre el punto, medida a lo largo de la normal al elipsoide que pasa por dicho punto y el elipsoide. Este tipo de altitud no tiene ningún significado físico, solamente geométrico.

Al sistema geodésico elipsoidal es posible incorporarle unos ejes cartesianos geocéntricos, obteniendo el Earth Centered Earth-Fixed (ECEF).

Los ejes cartesianos están definidos como:

- **Eje z**: coincide con el eje de rotación de la tierra y es perpendicular al plano XY, plano del ecuador.
- **Eje x**: intersección entre el ecuador y el meridiano medio de Greenwich.
- **Eje y**: formando una terna dextrógira respecto al eje "x" y "z".

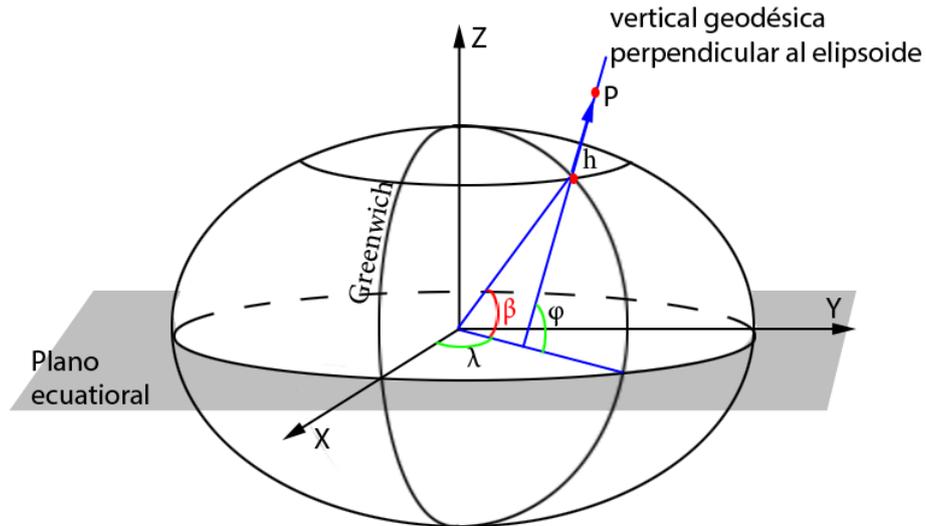


Figura 2.1 Sistema geodésico elipsoidal

Hay que señalar la diferencia entre latitud geodésica y latitud geocéntrica, ya que sobre el elipsoide no coincidirán ambas: la latitud geocéntrica (β , Figura 2.1) viene dada por el ángulo que forma la línea que une el centro del elipsoide y un punto sobre el elipsoide y el plano del ecuador geodésico; la longitud geocéntrica siempre coincide con la longitud geodésica.

2.1.2. Sistema geodésico local

El sistema geodésico local tiene el origen en el punto i de estacionamiento, pudiendo corresponder al instrumento de medición.

Los ejes cartesianos de un sistema geodésico local (ENU^G) en el punto i (Figura 2.2), quedan definidos como:

- Eje U: Según la dirección de la normal al elipsoide que pasa por i con sentido positivo hacia el exterior de la superficie del elipsoide.
- Eje N: Según la dirección resultante de la intersección del plano perpendicular al eje U con el plano que contiene al eje de rotación del elipsoide y al eje U, con sentido positivo al norte geodésico.
- Eje E: Completando la terna ortogonal y dextrógira

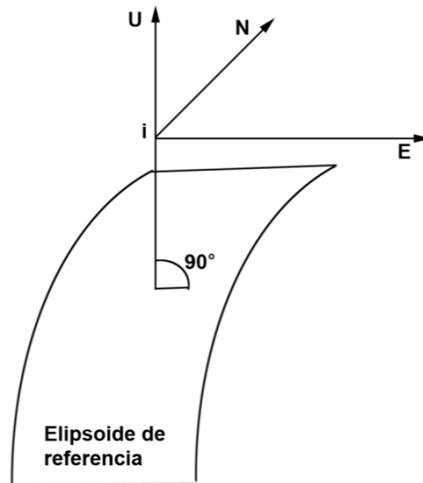


Figura 2.2 Sistema geodésico local

2.1.3. Sistema astronómico local

Las mediciones de los sensores, al proceder de instrumentos que materializan la vertical física del punto sobre el que se encuentran, se refieren a sistemas de coordenadas astronómicas locales.

Todas las medidas geodésicas clásicas, excepto las distancias geométricas, deben realizarse materializando físicamente la vertical astronómica del lugar (García-Asenjo Villamayor & Garrigues Talens, 2001). Este sistema sufre una rotación, cuya magnitud depende de la curvatura de las superficies equipotenciales del campo gravitatorio, por lo que es solo válido en el punto de estación. Por tanto, el sistema astronómico local nos servirá a la hora de calibrar los parámetros y poder relacionar los sensores montados entre sí en el punto de estación, pero no es adecuado para el cálculo de grandes trayectorias de un sistema multicámara portátil GNSS/INS, la razón es que el eje z siempre sigue la dirección de la gravedad que pasa por el punto de estación y éste sigue una dirección diferente para cada punto.

Los ejes cartesianos de un sistema astronómico local (ENU^A) en el punto P (Figura 2.3), quedan definidos como:

- **Eje U:** Sigue la dirección del vector de gravedad en P y tiene sentido contrario.
- **Eje N:** tangente a la superficie equipotencial que pasa por P y tiene dirección Norte.
- **Eje E:** tangente a la superficie equipotencial que pasa por P y tiene dirección Este.

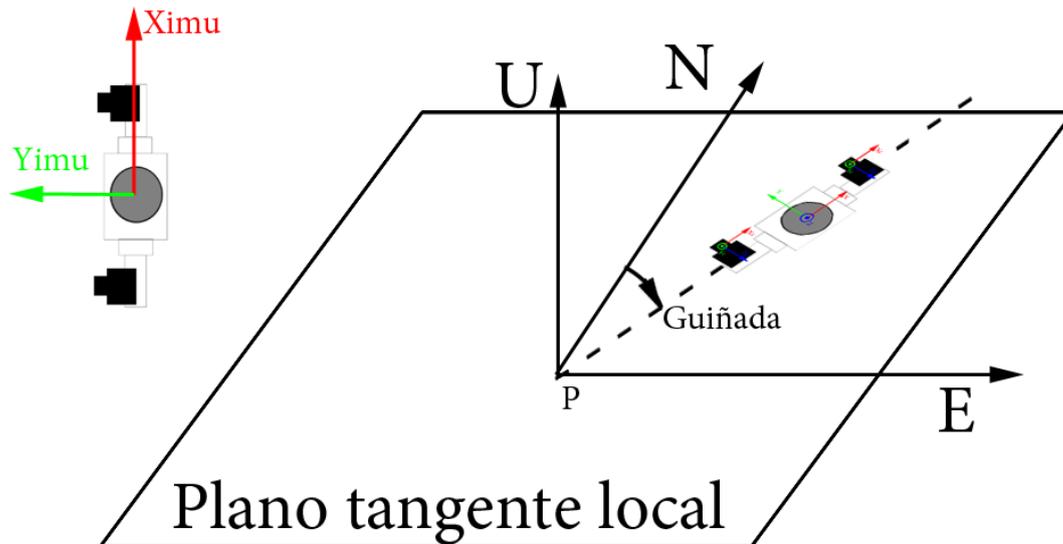


Figura 2.3 Giro Guiñada sobre el plano tangente ENU^A

Los sistemas locales astronómico y geodésico para un mismo punto de la superficie terrestre comparten origen, pero no la dirección de los ejes de coordenadas. La diferencia en los ejes depende de la diferencia que exista entre la vertical astronómica y la normal al elipsoide y de la diferencia en la dirección de los meridianos astronómico y geodésico, del norte astronómico y del norte geodésico.

2.1.4. Sistema imagen

El sistema imagen nos permitirá establecer las relaciones matemáticas entre un punto en el espacio y su proyección en la imagen capturada por el sensor fotogramétrico. Como se observa en la Figura 2.4, el sistema imagen se sitúa con el origen en el centro de proyección de la cámara (**cdp**), los ejes cartesianos quedan:

- **Eje z:** Sigue la dirección del eje óptico y tiene el sentido hacia el observador.
- **Eje y:** Sigue la dirección de las columnas de la imagen con sentido hacia arriba.
- **Eje x:** Sigue la dirección de las filas de la imagen con sentido hacia la derecha.

El sistema imagen de la cámara (CAM) genera sobre el plano imagen el sistema imagen (2D) cuyos ejes x' y' son paralelos a los ejes x , y a una distancia focal (**f**), con origen en el punto principal (**pp**), el punto principal es la intersección del eje óptico y el plano imagen. En el sistema imagen es donde se plasma la fotografía (digital) cuyo sistema de coordenadas sitúa el origen en la esquina superior izquierda con los ejes "u" dirección de las filas y "v" dirección de las columnas en unidades píxel.

Un punto **M** de coordenadas terreno se proyectaría sobre el plano imagen en **m** a una distancia **r** del punto principal (Figura 2.4).

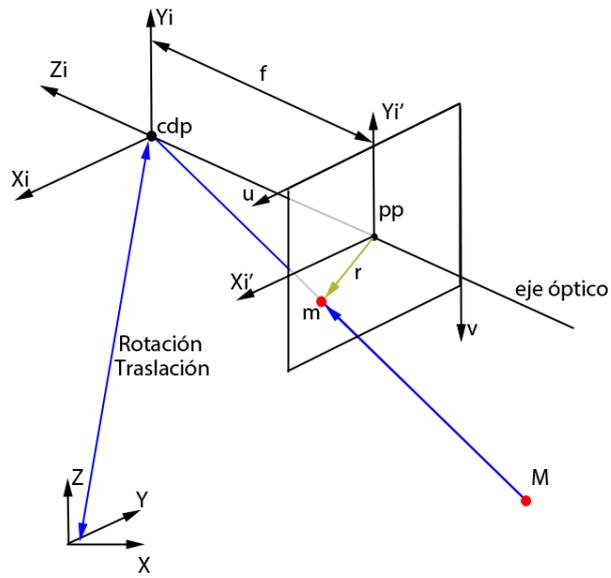


Figura 2.4 Proyección de un punto M sobre el sistema imagen

2.1.5. Sistema IMU

Como se indicó anteriormente, la IMU (Inertial Measurement Unit) nos proporciona los giros respecto a un sistema astronómico local. El sistema de coordenadas de la IMU (Figura 2.5) está referido al sistema cartesiano de la unidad de medida inercial de la siguiente manera:

- **Eje Z:** Sigue la dirección del vector de gravedad y tiene sentido contrario.
- **Eje X:** Dirección al norte magnético.
- **Eje Y:** Formando una terna dextrógira respecto al eje "x" y "z".

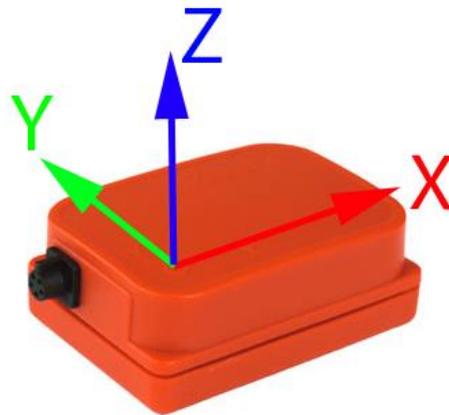


Figura 2.5 Sistema de coordenadas de la IMU Xsens

El sistema inercial nos proporciona el sistema de navegación (NAV), donde se expresan los tres ángulos de rotación definidos según el estándar de la aviación ARINC 705 (Airlines Electronic Engineering Committee 1982), de cabeceo (pitch, Figura 2.9), de alabeo (roll, Figura 2.10) y guiñada (heading, Figura 2.7).

- Cabeceo (Pitch) rotación en el eje x.
- Alabeo (Roll) rotación en el eje y.
- Guiñada (Heading) rotación en el eje z.

El ángulo de guiñada nos indica el rumbo del sistema INS respecto al norte magnético. El ángulo de cabeceo corresponde al giro que sufre el sistema INS respecto al eje x de la IMU, y la rotación respecto al alabeo corresponde a un giro respecto al eje y de la IMU.

La Figura 2.6 muestra los sistemas de coordenadas de las cámaras y de la IMU montados sobre el sistema multicámara portátil GNSS/INS. La IMU proporciona los giros necesarios para poder situar sobre el plano astronómico tangente las posiciones de cada sensor.

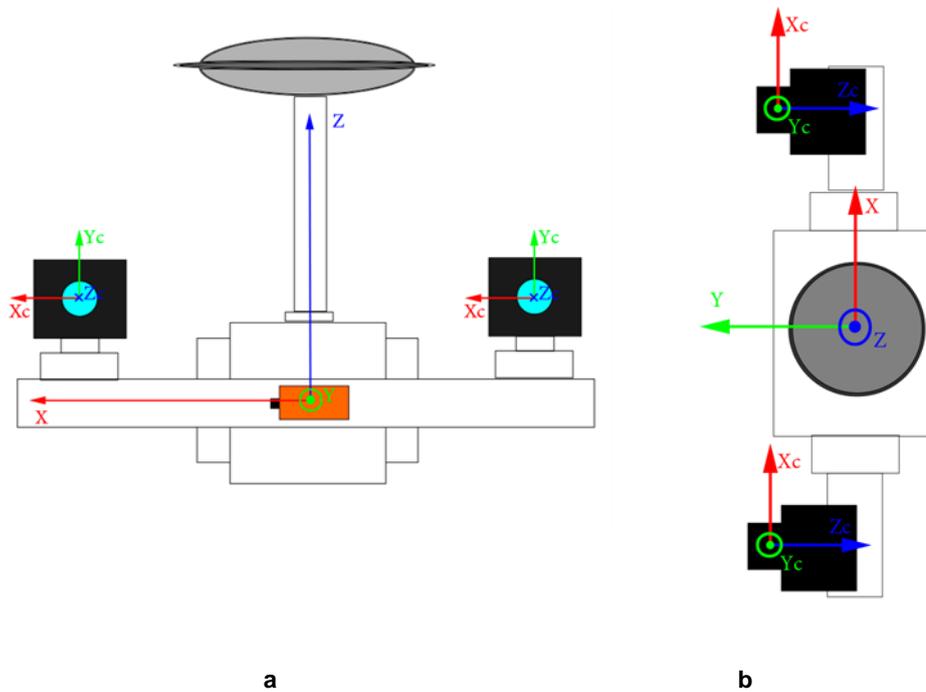


Figura 2.6 Sistemas de coordenadas de la IMU y de las dos cámaras montadas sobre el sistema multicámara portátil GNSS/INS: a) vista de frente; b) vista en planta

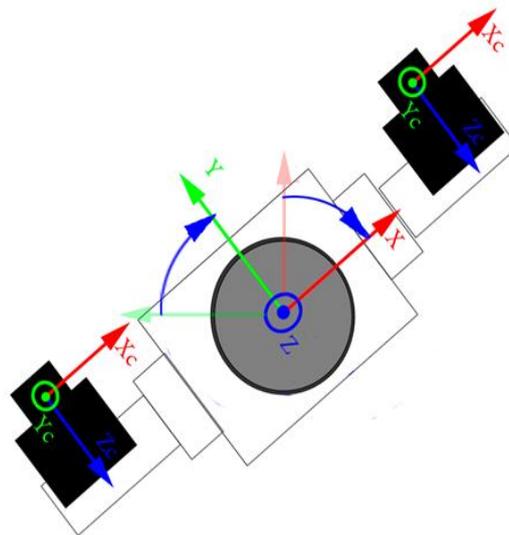


Figura 2.7 Detalle giro Guiñada (Z)

El sistema multicámara portátil GNSS/INS está diseñado de un modo que permite el giro alrededor del eje X de la plataforma, independientemente de su vertical para permitir cambiar la dirección de observación de las cámaras (Figura 2.8), a diferencia de la mayoría de los sistemas INS montados sobre vehículos terrestres y aerotransportados, en los que todo el conjunto permanece fijo (Figura 2.9) y donde las transformaciones entre sensores siguen una transformación de sólido rígido.

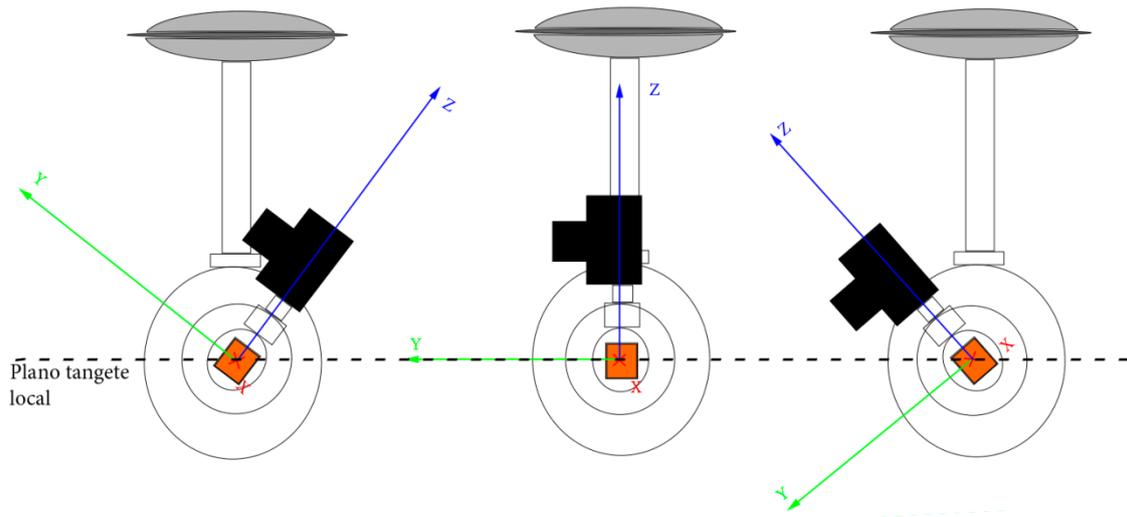


Figura 2.8 Giro Cabeceo (X) libre, independiente de su vertical

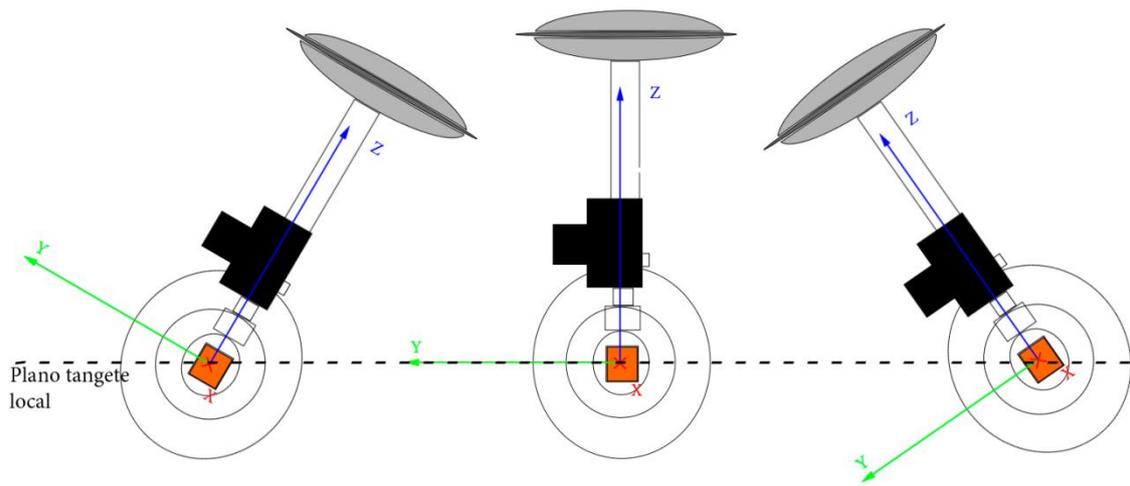


Figura 2.9 Giro Cabeceo (X) fijo

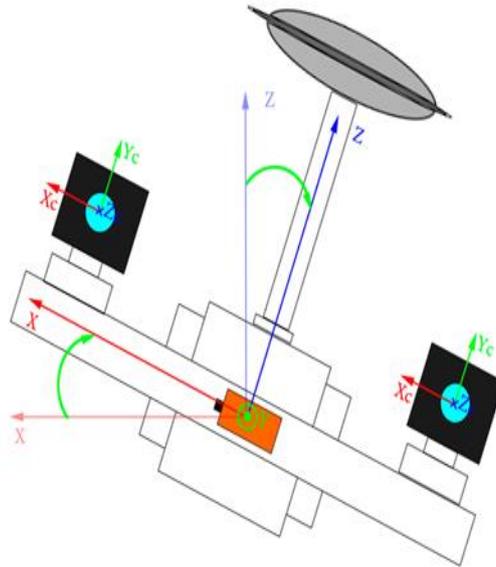


Figura 2.10 Giro Alabeo (Y)

2.2. Sistemas de referencia geodésicos globales, GRS80 y GRS84

Existe una gran variedad de sistemas de referencia internacionales como son el International Terrestrial Reference System (ITRS), ETRS89 (Europeo) SIRGAS (Americano) WGS84, PZ90 (GNSS). Por razones prácticas del receptor GNSS utilizado (GPS) y la zona del campo de calibración (Valencia), repasaremos brevemente los sistemas de referencia WGS84 y GRS84.

De la misma manera que el GNSS utiliza un sistema de referencia geodésico global, los países también tienen definidos sus sistemas geodésicos locales basados en un elipsoide que coincide con el geoide del área. Por lo que las coordenadas del GNSS deben ser transformadas al sistema local dependiendo del país donde se registren. También hay que realizar una transformación de las alturas, ya que las que nos proporciona el sistema GNSS son alturas elipsoidales. Por consiguiente, hay que tener en consideración la ondulación del geoide para obtener las alturas ortométricas.

Las observaciones del receptor GNSS deben estar definidas en un sistema geodésico. En nuestro caso, el receptor GNSS montado sobre el sistema multicámara portátil GNSS/INS es un receptor GPS, por lo que debemos pasar del sistema WGS84 al sistema geodésico local.

En España se adoptó en 1970 el ED50 hasta que el Real Decreto 1071/2007 estableció el ETRS89 como sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares.

En el caso de las Islas Canarias se adopta el sistema REGCAN95, ya que ETRS89 sólo afecta a la parte estable de la placa euroasiática. La definición de REGCAN95 se

hizo a partir de la estación ITRF de Maspalomas, con las coordenadas publicadas en el ITRF93 y trasladadas a la época de observación de REGENTE en Canarias (1994). Ambos sistemas tienen asociado el elipsoide Geodetic Reference System 1980 (GRS80) adoptado por la International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) en 1979, materializados por el marco que define la Red Geodésica Nacional por técnicas espaciales REGENTE y sus densificaciones (BOE, 2007).

Para poder realizar la transformación entre el sistema geodésico global y el geodésico local se debe conocer la posición de un conjunto de puntos, al menos tres en ambos sistemas. De esta manera se podrá obtener los parámetros de transformación utilizando alguno de los métodos de transformación (Helmert o Bursa Wolf, Badekas-Molodenski, etc) (García-Asenjo & Hernandez, 2004; García-Asenjo & Garrigues, 2001).

Tabla 3. Parámetros de los sistemas WGS84 y GRS80

Parámetros	Notación	WGS84	GRS80
Semi eje mayor	a	6378137 m	6378137 m
Coef. forma dinámica	J_2	$108263.9983 \cdot 10^{-8}$	$108263 \cdot 10^{-8}$
Velocidad angular terrestre	ω	$7293115 \cdot 10^{-11}$ rad/sg	$7293115 \cdot 10^{-11}$ rad/sg
Cte. gravitacional terrestre (Masa atmosférica terrestre incluida)	GM	$3986004.418 \cdot 10^8$ m^3/sg^2	$3986005 \cdot 10^8$ m^3/sg^2

Como se puede deducir a la vista de la Tabla 3, el GRS80 y el WGS84 se pueden considerar prácticamente el mismo. Esto hace que cualquier usuario pueda posicionarse sobre la cartografía en ETRS89 directamente con las coordenadas que le proporciona un receptor GPS.

2.3. Transformación entre sistemas

En el sistema multicámara portátil GNSS/INS se trabajará básicamente con cuatro sistemas de coordenadas (Figura 2.11):

1. Sistema de Navegación Inercial IMU/ENU^A.
2. Sistema ECEF.
3. Sistema ENU^G.
4. Sistema Cámara (CAM).

El sistema que se utilice en el mapeado puede ser cualquier sistema geodésico 3D, como son WGS84, NAD83 o el UTM (con alturas), o cualquier otro sistema ECEF (Grejner-Brzezinska, 2001; Colomina, 2002). La finalidad de trabajar con un sistema cartográfico es que, permitirá realizar la planificación y la programación de la ruta seguida por el sistema de navegación.

Si el valor de la desviación de la vertical no supera algunos segundos y la precisión del sistema de nivelación del instrumental de medición angular (IMU) es del mismo orden o inferior, se puede utilizar el ENU^G o ENU^A indistintamente en la mayoría de los casos sin pérdida de precisión (García-Asenjo & Hernandez, 2004).

La transformación entre el sistema cartesiano modelo y cámara se realizará según las Ecuaciones de colinealidad. Éstas se desarrollarán de forma más extendida en el capítulo 3 - Sistema Fotogramétrico Multisensorial. En este capítulo, abordaremos las transformaciones entre los siguientes sistemas GEOD, ECEF, ENU^G y IMU/ ENU^A.

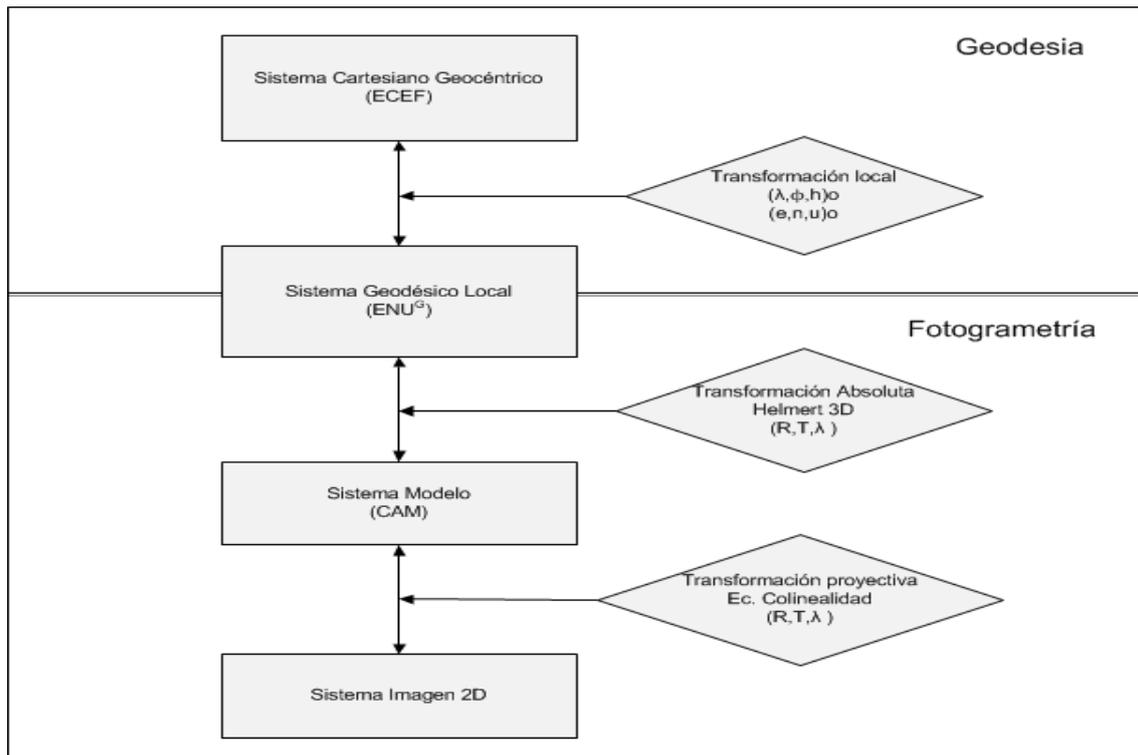


Figura 2.11 Flujo de los sistemas de coordenadas en el sistema fotogramétrico multicámara GNSS/INS

2.3.1. Transformación de ECEF a Geodésicas

Existen dos métodos que permiten obtener las coordenadas geodésicas a partir de las coordenadas cartesianas geocéntricas. La primera se basa en aplicar un proceso iterativo y la segunda en un método directo (Vermeille, 2004; Vermeille, 2002). La relación que permite obtener las coordenadas geodésicas (λ , φ , h) a partir de las coordenadas cartesianas geocéntricas (X , Y , Z) de manera directa (García-Asenjo & Hernandez, 2004; Jekeli, 2000) sigue:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Z + e'^2 \cdot b \cdot \sin \vartheta^3}{r - e^2 \cdot a \cdot \cos \vartheta^3} \right) \quad 2-1$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad 2-2$$

$$h = \frac{r}{\cos \varphi} - v \quad 2-3$$

siendo:

$$v = \tan^{-1} \left(\frac{Z \cdot a}{r \cdot b} \right) \quad 2-4$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad 2-5$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad 2-6$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad 2-7$$

a, b: semiejes mayor y menor del elipsoide de revolución, respectivamente.

e, e': primera y segunda excentricidad, respectivamente.

La relación entre la latitud geodésica y geocéntrica viene dada por la siguiente ecuación:

$$\tan \beta = (1 - e^2) \tan \varphi \quad 2-8$$

2.3.2. Transformación de Geodésicas a ECEF

Las expresiones que permiten obtener las coordenadas cartesianas geocéntricas (X, Y, Z) a partir de las geodésicas (λ , φ , h) (García-Asenjo & Hernandez, 2004; Jekeli, 2000) son:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ECEF} = \begin{pmatrix} (n + h) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \\ (n + h) \cdot \cos\varphi \cdot \sin\lambda \\ (n \cdot (1 - e^2) + h) \cdot \sin\varphi \end{pmatrix} \quad 2-9$$

siendo:

n: radio de curvatura del primer vertical.

$$n = a \cdot (1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi)^{-1/2} \quad 2-10$$

a, b: semiejes mayor y menor del elipsoide de revolución, respectivamente.

2.3.3. Transformación de ECEF a ENU^G

Para relacionar el sistema ENU^G con un sistema cartesiano ECEF se efectúan dos rotaciones.

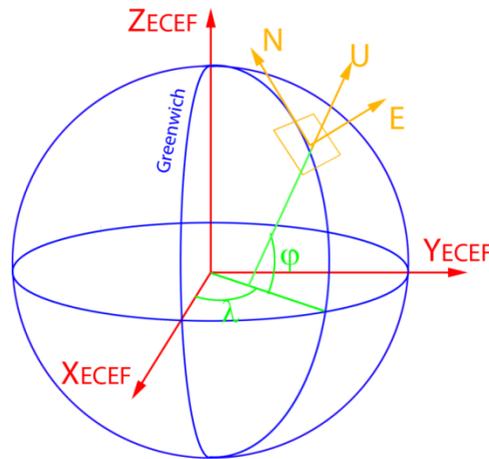


Figura 2.12 Sist. ECEF y sist. ENU^G

La primera alrededor del eje Z (Figura 2.12) con valor de la longitud, de esta manera situaremos los ejes X e Y en ambos sistemas paralelos (Figura 2.13).

$$R(\lambda)_x = \begin{pmatrix} \cos\lambda & \sin\lambda & 0 \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad 2-11$$

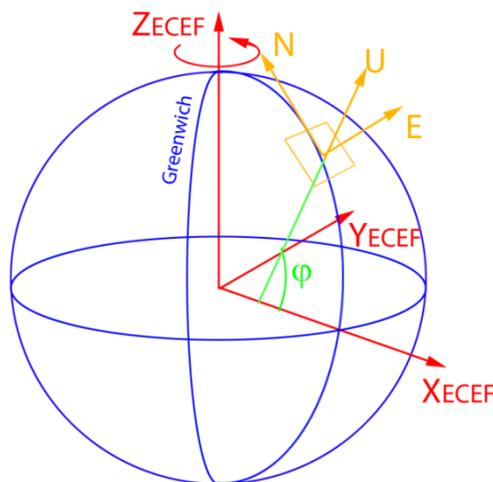


Figura 2.13 Rotación Z de ECEF

La segunda rotación, de valor 90° -latitud, alrededor del eje Y (Figura 2.13).

$$R(\varphi)_y = \begin{pmatrix} \sin\varphi & 0 & -\cos\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \end{pmatrix} \quad 2-12$$

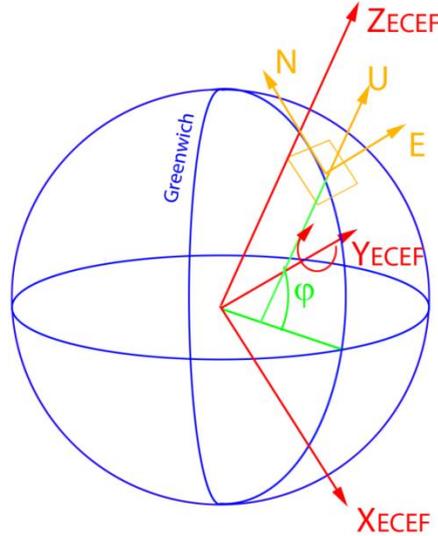


Figura 2.14 Rotación y de ECEF

Aplicando sucesivamente ambas rotaciones al sistema ECEF, los ejes se situarían paralelos. Como se puede ver en la Figura 2.14 el eje X_{ECEF} queda en sentido contrario al eje N , el eje Y_{ECEF} tiene la misma dirección y sentido que el eje E , y el eje Z_{ECEF} paralelo al eje U . Matemáticamente se muestra en la siguiente fórmula:

$$\begin{pmatrix} -y \\ x \\ z \end{pmatrix}_{ENU^G} = R(\varphi)_y R(\lambda)_x \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ECEF} = \begin{pmatrix} \sin\varphi\cos\lambda & \sin\varphi\sin\lambda & -\cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ECEF} \quad 2-13$$

Para escribir la expresión más ordenada se introduce por último una rotación alrededor del eje Z (Figura 2.14):

$$R\left(\frac{-\pi}{2}\right)_z = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad 2-14$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ENU^G} = R\left(\frac{-\pi}{2}\right)_z R(\varphi)_y R(\lambda)_x \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ECEF} \quad 2-15$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ENU^G} = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi \cos\lambda & -\sin\varphi \sin\lambda & -\cos\varphi \\ \cos\varphi \cos\lambda & \cos\varphi \sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ECEF} = R_{ECEF}^{ENU} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ECEF} \quad \mathbf{2-16}$$

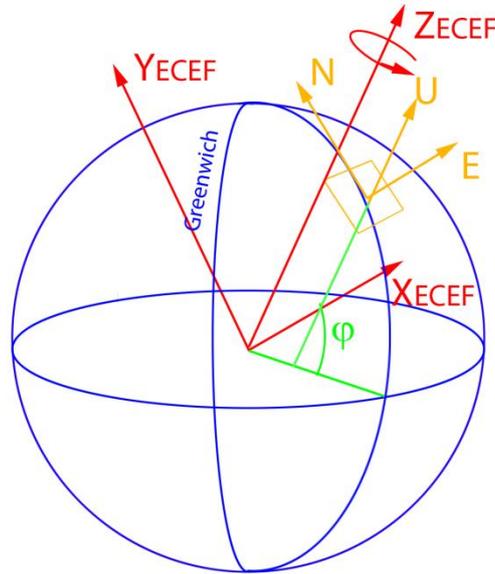


Figura 2.15 Rotación de 90° en Z de ECEF

La transformación de ENU^G a ECEF corresponde con su inversa. Al ser una matriz de rotación coincide con su transpuesta:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ECEF} = R_{ECEF}^{ENU}^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ENU^G} = R_{ECEF}^{ENU T} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ENU^G} = R_{ENU}^{ECEF} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ENU^G} \quad \mathbf{2-17}$$

Mediante las expresiones anteriores es posible transformar las observaciones efectuadas en un sistema local ENU^G a incrementos de coordenadas cartesianas geocéntricas (ECEF) que son las observables que produce el receptor GNSS.

2.3.4. Transformación IMU a ENU^G

El sensor IMU nos proporciona la matriz de rotación de navegación según el sistema IMU:

$$Rimu_{NAV} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \quad 2-18$$

siendo:

- Φ : giro Pitch alrededor del eje x.
- Θ : giro Roll alrededor del eje y.
- Ψ : giro Heading alrededor del eje z.

Conociendo la matriz de rotación de navegación, los giros Φ , Θ , Ψ se pueden calcular como:

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{Rimu_{NAV_{32}}}{Rimu_{NAV_{33}}} \right); \quad \Theta = \sin^{-1}(-Rimu_{NAV_{31}}); \quad \Psi = \tan^{-1} \left(\frac{Rimu_{NAV_{21}}}{Rimu_{NAV_{11}}} \right) \quad 2-19$$

Para referir la rotación de la navegación del sensor inercial a un sistema geodésico local de mano derecha, con el eje "z" normal al elipsoide y positivo hacia el exterior, el eje "x" dirección del norte magnético y el eje "y" perpendicular a "x" y "z" formando una terna dextrógira, necesitamos corregir la rotación con la declinación magnética δ y de los valores de la desviación de la vertical ξ , η . Con lo que la matriz que relaciona ambos sistemas quedaría (García-Asenjo, et al., 2008; Baumker & Heimes, 2001)

$$R_{correccion} = R_{\delta} \cdot R_{\xi, \eta} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta & 0 \\ -\sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & \eta \\ 0 & 1 & \xi \\ -\eta & -\xi & 1 \end{pmatrix} \quad 2-20$$

Dado que el modelo del INS utilizado tiene una incertidumbre en los parámetros de orientación superior al valor de la desviación de la vertical, podemos limitarnos a utilizar únicamente la declinación magnética.

$$Rimu_{NAV_elip} = R_{\delta} \cdot Rimu_{NAV} \quad 2-21$$

Para transformar la rotación de la navegación que nos proporciona la IMU al sistema ENU^A, aplicaremos un giro de 100^g en el eje "z". De esta manera situamos el eje "x" en dirección este, y el eje "y" en dirección norte.

$$Rimu_{ENU^A} = R \left(0 \quad 0 \quad \frac{-\pi}{2} \right) \cdot Rimu_{NAV} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot Rimu_{NAV} \quad 2-22$$

$$Rimu_{ENU^A} = R_{NAV}^{ENU} \cdot Rimu_{NAV} \quad 2-23$$

Por lo que, para pasar del sistema de Navegación a un sistema ENU^G , tenemos:

$$Rimu_{ENU^G} = R_{NAV}^{ENU} \cdot R_{\delta} \cdot Rimu_{NAV} \quad 2-24$$

2.4. Precisión en la transformación de coordenadas

Junto a la posición de un punto en cualquiera de los sistemas de coordenadas utilizados se debería incluir la información relativa a su precisión en el mismo sistema de coordenadas (García-Asenjo Villamayor & Hernandez, 2004).

La estimación de errores en geodesia se basa en la hipótesis de que las variables que se utilizan se distribuyen normalmente, propagándose el error de acuerdo a la ley de propagación de matrices varianza-covarianza, o ley de propagación de errores:

Sea la función

$$f : \Omega \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m \text{ tal que } \vec{y} = f(\vec{x})$$

Y sea la variable tal que: $\vec{x} \sim N(\vec{x}^0, \Sigma_{\vec{x}})$ con valor \vec{x}^0

El valor más probable, entonces, se tendrá que:

$$\vec{y} \sim N(f(\vec{x}^0), \Sigma_{\vec{y}})$$

Con,

$$\Sigma_{\vec{y}} = Jf \Sigma_{\vec{x}} Jf^T,$$

Siendo Jf la jacobiana de la función.

La ley anterior es la base a partir de la cual se acostumbra a deducir la estimación de la precisión de las variables determinadas en cualquier problema geodésico.

En cualquier método geodésico de transformación de coordenadas siempre es posible realizar la estimación de la precisión en la posición encontrada a partir del modelo funcional empleado utilizando la ley de propagación de errores.

En los siguientes puntos se explicará brevemente la forma de obtener la estimación de la precisión de un punto a partir de las funciones de transformación que intervienen.

Para una visión más detallada de la formulación véase (García-Asenjo Villamayor & Hernandez, 2004).

2.4.1. Precisión en coordenadas geocéntricas (ECEF) a partir de la precisión en coordenadas geodésicas (λ, φ, h)

Suponiendo conocidas las precisiones de las coordenadas en el sistema geodésico ($d\varphi, d\lambda, dh$), - estos errores pueden haber sido obtenidos de la correspondiente matriz varianza-covarianza del ajuste correspondiente por mínimos cuadrados, o de la propagación de error del otro sistema, el cual tiene contemplados los errores de medida de los sensores - obtenemos la matriz varianza covarianza geodésica Σ_{GEOD}

Las variaciones diferenciales entre ambos tipos de coordenadas vienen dadas por las jacobianas de las funciones que expresan las transformaciones entre GEOD y ECEF:

$$J(f_{\varphi\lambda h}^{XYZ}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial X}{\partial \varphi} & \frac{\partial X}{\partial \lambda} & \frac{\partial X}{\partial h} \\ \frac{\partial Y}{\partial \varphi} & \frac{\partial Y}{\partial \lambda} & \frac{\partial Y}{\partial h} \\ \frac{\partial Z}{\partial \varphi} & \frac{\partial Z}{\partial \lambda} & \frac{\partial Z}{\partial h} \end{pmatrix} \quad 2-25$$

$$\begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}_{ECEF} = J(f_{\varphi\lambda h}^{XYZ}) \begin{pmatrix} d\varphi \\ d\lambda \\ dh \end{pmatrix}_{GEOD} \quad 2-26$$

Realizando las jacobianas de la Ec. 2-9, obtenemos:

$$\begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}_{ECEF} = \begin{pmatrix} -(\rho + h) \sin \varphi \cos \lambda & -(v + h) \cos \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \cos \lambda \\ -(\rho + h) \sin \varphi \sin \lambda & (v + h) \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ (\rho + h) \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varphi \\ d\lambda \\ dh \end{pmatrix}_{GEOD} \quad 2-27$$

$$\Sigma_{ECEF} = J(f_{\varphi\lambda h}^{XYZ}) \Sigma_{GEOD} J(f_{\varphi\lambda h}^{XYZ})^T \quad 2-28$$

Obteniendo la matriz varianza covarianza de las precisiones en el sistema ECEF:

$$\Sigma_{ECEF} = \begin{pmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_Z^2 \end{pmatrix} \quad 2-29$$

2.4.2. Precisión en coordenadas geodésicas (λ , φ , h) a partir de la precisión en coordenadas geocéntricas (ECEF)

Partiendo de las jacobianas (Ec. 2-27) del apartado anterior, podemos expresar:

$$\begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}_{ECEF} = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \lambda & \cos \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\rho + h)d\varphi \\ (v + h) \cos \varphi d\lambda \\ dh \end{pmatrix}_{GEOD} \quad 2-30$$

Despejando obtenemos una matriz ortogonal.

$$\begin{pmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}_{ECEF} = \begin{pmatrix} (\rho + h)d\varphi \\ (v + h) \cos \varphi d\lambda \\ dh \end{pmatrix}_{GEOD} \quad 2-31$$

$$\begin{pmatrix} d\varphi \\ d\lambda \\ dh \end{pmatrix}_{GEOD} = \begin{pmatrix} \frac{-\sin \varphi \cos \lambda}{(\rho+h)} & \frac{-\sin \varphi \sin \lambda}{(\rho+h)} & \frac{\cos \varphi}{(\rho+h)} \\ \frac{-\sin \lambda}{(v+h) \cos \varphi} & \frac{\cos \varphi \cos \lambda}{(v+h) \cos \varphi} & 0 \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}_{ECEF} \quad 2-32$$

Obteniendo de Ec. 2-32 la matriz de jacobianas $J(f_{XYZ}^{\varphi\lambda h})$:

$$\begin{pmatrix} d\varphi \\ d\lambda \\ dh \end{pmatrix}_{GEOD} = J(f_{XYZ}^{\varphi\lambda h}) \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}_{ECEF} \quad 2-33$$

Que según la ley de propagación de varianzas:

$$\Sigma_{GEOD} = J(f_{XYZ}^{\varphi\lambda h}) \Sigma_{ECEF} J(f_{XYZ}^{\varphi\lambda h})^T \quad 2-34$$

Obteniendo finalmente la matriz de varianza-covarianza para el sistema geodésico:

$$\Sigma_{GEOD} = \begin{pmatrix} \sigma_{\varphi}^2 & \sigma_{\varphi\lambda} & \sigma_{\varphi h} \\ \sigma_{\lambda\varphi} & \sigma_{\lambda}^2 & \sigma_{\lambda h} \\ \sigma_{h\varphi} & \sigma_{h\lambda} & \sigma_h^2 \end{pmatrix} \quad 2-35$$

2.4.3. Precisión en coordenadas cartesianas geocéntricas (ECEF) a partir de la precisión en geodésicas locales (ENU^G)

La estimación de la precisión pasa por el cálculo de las jacobianas de las funciones que intervienen en la transformación de sistemas. Como se puede observar en la Ec. 2-16, el error dependerá de la longitud y latitud del punto.

$$\begin{pmatrix} \Delta X_i^k \\ \Delta Y_i^k \\ \Delta Z_i^k \end{pmatrix}_{ECEF} = R_{ENU}^{ECEF}(\varphi, \lambda)_i \begin{pmatrix} \Delta E \\ \Delta N \\ \Delta U \end{pmatrix}_{ENU^G} = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & -\sin\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\cos\lambda \\ \cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi\sin\lambda \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \end{pmatrix}_i \begin{pmatrix} \Delta E_i^k \\ \Delta N_i^k \\ \Delta U_i^k \end{pmatrix}_{ENU^G} \quad 2-36$$

Podemos escribir la Ec. 2-36 de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \Delta X_i^k \\ \Delta Y_i^k \\ \Delta Z_i^k \end{pmatrix}_{ECEF} = \begin{pmatrix} -\Delta E_i^k \sin\lambda - \Delta N_i^k \sin\varphi \cos\lambda + \Delta U_i^k \cos\varphi \cos\lambda \\ \Delta E_i^k \cos\lambda - \Delta N_i^k \sin\varphi \sin\lambda + \Delta U_i^k \cos\varphi \sin\lambda \\ \Delta N_i^k \cos\varphi + \Delta U_i^k \sin\varphi \end{pmatrix}_i = f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU^G})_i \quad 2-37$$

Desarrollando las jacobianas de la Ec. 2-37:

$$J(f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU^G})_i) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU})_i1}{\partial \Delta E_i^k} & \frac{\partial f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU})_i1}{\partial \Delta N_i^k} & \frac{\partial f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU})_i1}{\partial \Delta U_i^k} \\ \frac{\partial f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU})_i2}{\partial \Delta E_i^k} & \frac{\partial f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU})_i2}{\partial \Delta N_i^k} & \frac{\partial f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU})_i2}{\partial \Delta U_i^k} \\ \frac{\partial f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU})_i3}{\partial \Delta E_i^k} & \frac{\partial f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU})_i3}{\partial \Delta N_i^k} & \frac{\partial f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU})_i3}{\partial \Delta U_i^k} \end{pmatrix}_i \quad 2-38$$

$$J(f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU^G})_i) = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & -\sin\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\cos\lambda \\ \cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi\sin\lambda \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \end{pmatrix}_i \quad 2-39$$

Como se puede ver en la Ec. 2-39 la jacobiana no depende del vector ENU sino de la latitud y longitud geodésicas del punto origen.

$$\Sigma_{ECEF} = J(f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU^G})_i) \Sigma_{ENU} J(f_{\Delta ENU}^{\Delta ECEF}(\Delta_{ENU^G})_i)^T \quad 2-40$$

Obteniendo la matriz varianza covarianza Σ_{ECEF} en el sistema ECEF:

$$\Sigma_{ECEF} = \begin{pmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_Z^2 \end{pmatrix} \quad 2-41$$

2.4.4. Precisión en coordenadas geodésicas locales (ENU^G) a partir de la precisión en cartesianas geocéntricas (ECEF)

En este punto, al igual que en el caso anterior, la jacobiana solo depende de la longitud (λ) y de la latitud (φ) del punto origen:

$$\begin{pmatrix} \Delta E_i^k \\ \Delta N_i^k \\ \Delta U_i^k \end{pmatrix}_{ENU^G} = R_{ECEF}^{ENU}(\varphi, \lambda)_i \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{ECEF} = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix}_i \begin{pmatrix} \Delta X_i^k \\ \Delta Y_i^k \\ \Delta Z_i^k \end{pmatrix}_{ECEF} \quad 2-42$$

Como se puede ver en la Ec. 2-43, la jacobiana de ECEF a ENU coincide con la transpuesta de la jacobiana de ENU a ECEF (ec.2-39)

$$J\left(f_{\Delta ECEF}^{\Delta ENU}(\Delta_{ECEF})_i\right) = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix}_i \quad 2-43$$

De acuerdo con la ley de propagación de varianzas:

$$\Sigma_{ENU^G} = J\left(f_{\Delta ECEF}^{\Delta ENU}(\Delta_{ECEF})_i\right) \Sigma_{ECEF} J\left(f_{\Delta ECEF}^{\Delta ENU}(\Delta_{ECEF})_i\right)^T \quad 2-44$$

A partir de la Ec. 2-44 obtenemos la matriz varianza covarianza (Σ_{ENU}) en el sistema ENU^G:

$$\Sigma_{ENU^G} = \begin{pmatrix} \sigma_E^2 & \sigma_{EN} & \sigma_{EU} \\ \sigma_{NE} & \sigma_N^2 & \sigma_{NU} \\ \sigma_{UE} & \sigma_{UN} & \sigma_U^2 \end{pmatrix} \quad 2-45$$

2.5. Principios de la navegación inercial

En la navegación de un sistema inercial se utilizan las propiedades inerciales de los sensores montados sobre la plataforma, los cuales proporcionan la posición y otros parámetros de movimiento de manera instantánea por medio de medidas de fuerzas, ángulos, velocidad y tiempo (Grejner-Brzezinska, 2001).

Dados dos sistemas de referencia i y b , la transformación que permite el cálculo de las coordenadas en el sistema i de un vector a partir de las coordenadas en el sistema b , corresponde a una translación x_o^i y una rotación R_b^i :

$$x^i = x_o^i + R_b^i \cdot x^b \quad 2-46$$

La determinación de la rotación del sistema de referencia inercial i y el sistema de referencia instrumental al que están referidos los datos inerciales proporcionados por la IMU, es posible mediante la integración de la Ec. diferencial siguiente (Creixell, et al., 2003):

$$\dot{R}_b^i = R_b^i \cdot \Omega_{ib}^b \quad 2-47$$

Donde Ω_{ib}^b es la matriz:

$$\Omega_{ib}^b = \Omega(\omega_{ib}^b) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad 2-48$$

siendo $\omega_{ib}^b = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ el vector medido por la IMU de velocidades de rotación del sistema de referencia instrumental alrededor del sistema de referencia inercial. El superíndice indica el sistema de referencia en el cual están expresadas las velocidades angulares y los subíndices los sistemas de referencia envueltos en el giro y la dirección de éste.

Por la segunda ley de la física de Newton la Ec. que rige el movimiento de un cuerpo sometido al campo gravitacional de la tierra es:

$$\ddot{r}^i = g^i \cdot (r^i) + f^i \quad 2-49$$

Donde r^i es la posición del cuerpo, $g^i \cdot (r^i)$ es la aceleración debida al potencial gravitacional y f^i la fuerza específica, medida por los acelerómetros de la IMU.

La combinación de las Ecs. 2-47 y 2-49 dan las ecuaciones fundamentales de la navegación inercial o ecuaciones de la mecanización del movimiento inercial:

$$\begin{aligned}\dot{r}^i &= v^i \\ \dot{v}^i &= R_b^i f^b + g^i(r^i) \\ \dot{R}_b^i &= R_b^i \Omega_{ib}^b\end{aligned}\tag{2-50}$$

siendo:

\dot{v}^i : la velocidad en el marco de referencia inercial.

f^b : la fuerza específica medida por la IMU expresada en el marco de referencia instrumental.

Dada una posición, una velocidad y una actitud inicial, la integración de la Ec. diferencial (Ec. 2-50) permite el cálculo de la trayectoria efectuada por la IMU. Generalmente se suele representar en el sistema de referencia ECEF, quedando la ecuación:

$$\begin{aligned}\dot{r}^e &= v^e \\ \dot{v}^e &= R_b^e f^b + 2\Omega_{eb}^b v^e + g^e(r^e) \\ \dot{R}_b^e &= R_b^e (\Omega_{ei}^b + \Omega_{ib}^b)\end{aligned}\tag{2-51}$$

siendo:

- r^e y v^e : posición y velocidad en el sistema de referencia geocéntrico.
- $g^e(r^e)$: aceleración debida al potencial gravitacional de la tierra en el sistema geocéntrico.
- R_b^e : matriz de rotación entre el sistema de referencia del instrumento y el geocéntrico, $\Omega_{ei}^b = \Omega(\omega_{ei}^b)$, $\omega_{ie}^e = (0,0,\omega_e)$ con ω_e la velocidad de rotación del sistema de referencia geocéntrico respecto al inercial y $\omega_{ei}^b = -R_b^{eT} \omega_{ie}^e$

Para una explicación más detallada de las ecuaciones de navegación, vid. (Creixell, et al., 2003; Skaloud, 1999; Sanz Muñoz, 2004; Jekeli, 2000).

La IMU tiene los acelerómetros con sensores lineales de aceleración en un sistema de referencia inercial (fijo, sin rotación) y giróscopos con sensores de movimiento de rotación inercial (incrementos angulares o totales respecto a un sistema inercial).

Según los principios de Einstein, los acelerómetros no son sensibles al campo gravitatorio (pero pueden reaccionar según fuerzas gravitacionales), por lo que se debe añadir información externa sobre la gravedad (modelo de gravedad) al sensor de la IMU para poder obtener una información de navegación fiable (Grejner-Brzezinska, 2001).

En principio, la IMU no requiere información externa, salvo para una calibración inicial (inicialización y alineamiento) incluyendo una posición 3D inicial, velocidad y orientación. Es necesario un auto-alineamiento estacionario si no se tienen datos externos de velocidad u orientación.

Los giróscopos proporcionan la orientación de la IMU. Este sistema de referencia puede ser alineado con el soporte multicámara GNSS/INS para que proporcione directamente los giros respecto a un sistema local, etc. De esta manera se puede situar en cada sensor móvil una IMU que nos proporcione su orientación respecto a un sistema común.

Los errores de los sensores crecen con el tiempo, por lo que el INS debe ser recalibrado periódicamente para poder mantener una navegación de calidad (Grejner-Brzezinska, 1999).

2.6. Introducción a los sensores de navegación utilizados en el sistema fotogramétrico multisensorial

A continuación se describirán brevemente los distintos tipos de sensores que se han integrado en el soporte multicámara GNSS/INS y sus características.

2.6.1. Global Navigation Satellite System (GNSS)

GNSS hace referencia al conjunto de tecnologías de sistemas de navegación y posicionamiento basado en la recepción y procesamiento de las informaciones enviadas por una constelación de satélites con cobertura global de manera autónoma (García Álvarez, 2008).

Los sistemas de navegación por satélite tienen una estructura dividida en tres segmentos distintos:

- **Espacial:** Conjunto de satélites que forman el sistema de navegación y comunicación. Los satélites orbitan alrededor de la tierra repartidos en distintos planos orbitales. El segmento espacial del GPS (Global Positioning System), consiste en seis planos orbitales inclinados 55° en relación al ecuador, lo que requiere un mínimo de cuatro satélites en cada uno, para operar. La altura de los satélites es de aproximadamente 20200 km sobre la superficie terrestre haciendo que completen una vuelta a la tierra en 12 horas.
- **Control:** Instalaciones de tierra que realizan un seguimiento de los satélites, obteniendo datos de telemetría y efemérides de los satélites. Los datos son enviados en tiempo real a la estación de control principal. En el sistema GPS, la estación de control principal está situada en la Base Aérea Schriever, en Colorado (EEUU), la cual determina si los satélites sufren variaciones en el reloj o en las efemérides detectando cualquier anomalía.
- **Usuario:** Equipo receptor GNSS, que recibe las señales del segmento espacial y las utiliza para calcular posición, velocidad y tiempo. Está formado por antena y receptor.

Técnicas de observación

El instrumental GNSS a diferencia de los instrumentos clásicos de topografía no tiene una característica única. En función de la metodología empleada, el tipo de información captada por el receptor, tratamiento y post-proceso, es posible conseguir distintos grados de precisión (García-Asenjo Villamayor & Garrigues Talens, 2001). Por esta razón se debe elegir correctamente el tipo de observación a realizar, para obtener una correcta calibración de los sensores de la plataforma del INS. Las técnicas de observación se pueden clasificar según:

- Las observables registradas:
 - Pseudodistancias. Las observables registradas son las pseudodistancias a los distintos satélites. Se puede distinguir entre los receptores que siguen código C/A solamente y aquellos que además pueden correlar el código P (militar). Llegan a precisiones métricas (sin código P).
 - Fase. Además de registrar las pseudodistancias, se efectúa un seguimiento de la fase de la propia portadora (limpia de código). Hay receptores que registran L1 o L1 y L2. Tienen precisiones centimétricas.
- Método de posicionamiento:
 - Absoluto. Las coordenadas del punto son determinadas en un sistema de referencia global. Solo existe un receptor. Los observables suelen ser los códigos (pseudodistancias), pero también se podrían utilizar las diferencias de fase o ambas. En general rondan la precisión de metros, excepto cuando se utiliza el Precise Point Positioning PPP que rondan el decímetro (Anquela, et al., 2013). El método absoluto de posicionamiento es utilizado por los navegadores GNSS.
 - Relativo. Se obtienen correcciones diferenciales a partir del estacionamiento de un receptor en un punto de coordenadas conocidas y se transmiten a través de un sistema de comunicación (satélite, modem, internet, etc.) al receptor móvil que las aplica a los observables registrados. La precisión se encuentra entre 0.3 a 5 m para diferencial con código y 5 mm a 30 mm para diferencial con medidas de fase.
- Movimiento de los receptores:
 - Estático. Los receptores no varían su posición durante la etapa de observación. Es el método clásico para grandes distancias (superiores a 20 km). Se obtienen precisiones de una línea base entorno a los 5 mm +/-1ppm y precisiones de mm en líneas-base cortas. Dentro del método estático podemos encontrar el:
 - Estático Rápido: Para distancias como máximo de 20 km, periodos de observación cortos de tiempo (5 a 10 minutos). Aproximadamente ofrecen una precisión de 5 a 10 mm +/-1ppm Este método ha perdido uso, ya que los actuales receptores bifrecuencia están equipados con algoritmos que dan solución en poco tiempo de observación.
 - Reocupación: Se utiliza cuando la situación de la observación no es la idónea, es decir no tenemos cuatro satélites como mínimo, o el GDOP es superior a 8. Se realiza de la misma manera que

el estático rápido pero estacionando en el punto dos veces con una diferencia de una hora, para que la geometría de la constelación varíe, por lo que la solución será más robusta. La precisión de la línea base oscila entre 5 y 10 mm +/- 1ppm

- Cinemático. Consiste en estacionar un receptor de referencia en modo estático y obtener los puntos de medición por medio de un receptor móvil. Antes de empezar el método cinemático, hay que resolver la ambigüedad inicial, ya sea por un método estático, inicializando en un punto conocido, o por el método de cambio de antena (antenna swapping). Actualmente estos métodos están en desuso por la existencia de algoritmos que permiten resolver ambigüedades en movimiento como el OTF (On the Fly) o KAR (Kinematic Ambiguity resolution). Estos métodos no necesitan inicialización estática. El método cinemático tiene una precisión en planimetría de 1-3 cm y altimetría de 2-3 cm. Este método es el utilizado para levantamiento de ejes de carreteras, batimetrías y determinación de trayectoria de objetos en movimiento.
- Momento en que se efectúa el cálculo de las coordenadas:
 - Post-proceso (PP): Las coordenadas y las líneas base se calculan después de efectuar la observación.
 - Tiempo Real: La obtención de las coordenadas y de las líneas base se efectúa al mismo tiempo que se realiza la observación, de forma que se considere casi instantáneo.

Precisión y errores

La precisión alcanzada dependerá del tipo de receptor que se utilice y del modo de observación utilizado (Tabla 4). Los receptores geodésicos alcanzan precisiones del orden del cm en la determinación de la posición. Los receptores de navegación tienen una precisión de 5 a 30 m.

Tabla 4 Precisiones GPS (Eneriquez, 2006)

Fase diferencial				
Modo	L1 + L2	L1 (12 can.)	L1 (6 can.)	
Estático	5 mm (1ppm)	5-10 mm (2ppm)	5-10 mm (2ppm)	
Estático Rápido	5-10 mm (1ppm)			
Reocupación	5-10 mm (1ppm)			
Stop & Go	10-20 mm (1ppm)	10-25 mm (2ppm)	10-30 mm (2ppm)	
Cinemático	10-20 mm (1ppm)	10-25 mm (2ppm)	10-30 mm (2ppm)	

Código diferencial				
Modo	L1 + L2	L1 (12 can.)	L1 (6 can.)	L1 cód. (6 can.)
Estático	30-50 cm	30 cm	1 m	1 m
Cinemático	50-100 cm	50 cm	1-2 m	1-2 m

Las fuentes de error de GNSS (Figura 2.16) se pueden clasificar en:

- Error por el desfase de reloj entre el satélite y el receptor.
- Errores por desviación de la órbita del satélite.
- Error ionosférico.
- Error troposférico.
- Multicamino: este se produce cuando la señal que llega al receptor no es directa, sino que proviene reflejada, debido a la obstrucción de árboles, montañas, edificios, etc.
- Errores en el receptor: provocados por ruido electrónico generado por fuentes internas o externas.
- Disponibilidad selectiva: es un error producido por el centro de control. En el caso del GPS está provocado por el departamento de defensa de EEUU para evitar que usuarios no autorizados obtengan posicionamientos precisos y lo utilicen en su contra.

En la Tabla 5 se recogen las magnitudes típicas de los errores provocados por las distintas fuentes de error.

Tabla 5 Errores GNSS (Jekeli, 2000)

Error	Magnitud típica
Error sincronizado de reloj	1 μ s (300 m)
Error residual del error del satélite	20 ns(6 m)
Sincronización satélite UTC	100 ns (30m)
Disponibilidad selectiva	100 m
Error órbita (preciso, IGS)	20 cm
Retardo troposférico	<30 m
Retardo ionosférico	<150 m
Multicamino	<5 m (P-código); <5cm (fase)
Ruido receptor	1m (C/A código); 0.1mm (P-código); 0.2 mm (fase L1)

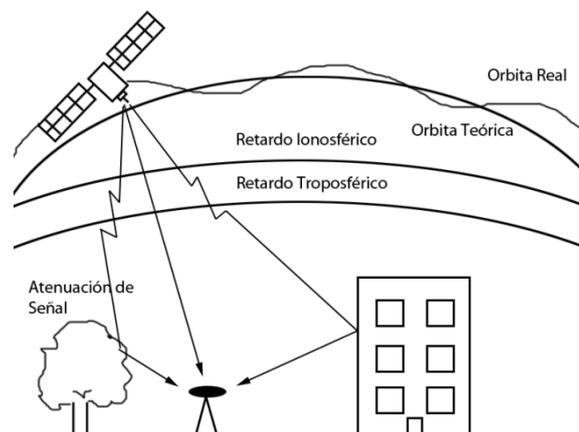


Figura 2.16 Errores GPS

2.6.2. Unidad de medida inercial (IMU)

La IMU es un dispositivo usado para determinar la orientación, la localización y el movimiento de un cuerpo en el espacio. Mide la aceleración y los cambios de orientación, además de integrarlos para determinar el cambio total sobre la posición inicial, por lo que suelen tener error acumulado, también llamado deriva. La IMU está formada por giróscopos, magnetómetros y acelerómetros. Generalmente se utilizan conjuntamente con otros sistemas tales como un GNSS (para corregir la deriva), un sistema barométrico (para corrección de altitud) y un compás magnético (para corregir la orientación).

Este sensor de medida suele estar formado por tres acelerómetros situados de manera que sus ejes de medida sean ortogonales y midan las “fuerzas específicas”

(aceleración inercial-gravedad). También dispone de tres giróscopos formando ejes ortogonales que miden las velocidades de rotación (Figura 2.17).

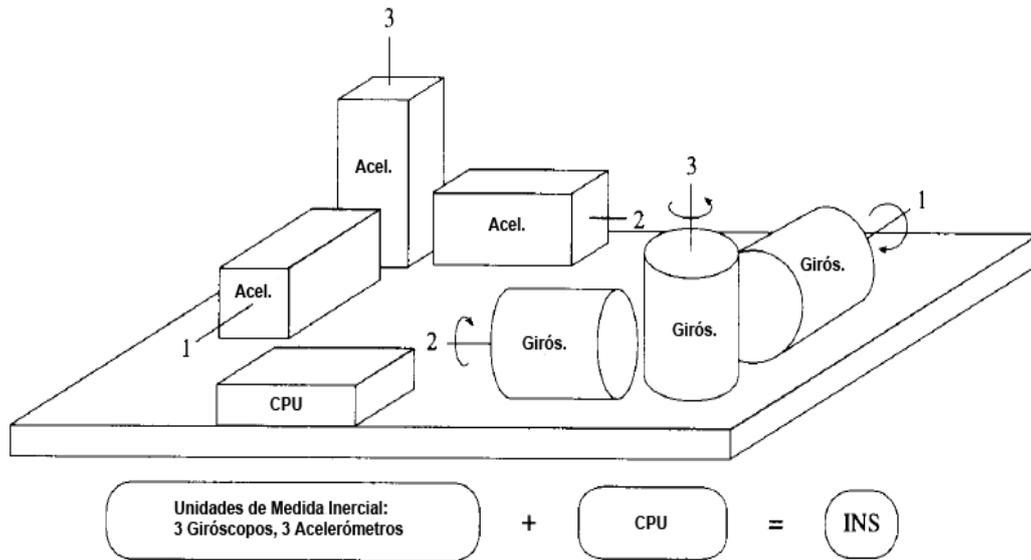


Figura 2.17 Sistema básico de la IMU (Jekeli, 2000)

La IMU debe estar diseñada de forma que la temperatura y las interferencias electromagnéticas estén controladas. Si las señales de salida son analógicas, el ruido eléctrico de los cables y del convertor analógico-digital debe minimizarse. Si ésta ya se obtiene de la IMU en formato digital puede generar retraso temporal y hay que tenerlo en cuenta en la obtención de los datos.

Acelerómetros

Un acelerómetro es un instrumento que mide la fuerza requerida para acelerar una determinada masa a lo largo de un eje. De acuerdo con la 2ª ley de Newton:

$$F = m \cdot a \quad 2-52$$

Si el instrumento está sometido a una aceleración inercial a y se mueve en un campo gravitatorio Newtoniano G , entonces la fuerza (F) que actúa sobre la masa patrón (m_p) es:

$$F = m_p \cdot a = F_R + m_p \cdot G + F_D \quad 2-53$$

$$\frac{F_R}{m_p} = a - G - \frac{F_D}{m_p} = \text{fuerza medida} \quad 2-54$$

siendo:

F_R : es la fuerza ejercida en la masa patrón por el muelle que la sostiene.

F_D : son las fuerzas producidas por las fricciones, histéresis, etc.

Como lo que se mide es la aceleración, los datos que proporciona el acelerómetro deberán ser corregidos de la gravedad G y de F_D .

Según el tipo de acelerómetro, bajo, táctico o de navegación nos encontraremos con unas precisiones u otras, como se refleja en la Tabla 6.

Tabla 6 Precisiones típicas de los acelerómetros (Barbour, 2010)

Parámetro/Calidad	Baja	Táctico	Navegación
Ruido [g/\sqrt{Hz}]	Estab. 0.5mg/ \sqrt{Hz}	50 -500 $\mu g /$ \sqrt{Hz}	<10 $\mu g /$ \sqrt{Hz}
Inestabilidad del sesgo [g]	10-100 [mg]	0.2-1 [mg]	10-100 μg
Inestabilidad del factor de escala % (ppm)	>1%	100 -1000 ppm	<100 ppm
Rango de medición [g]	Estab. 2 g	>50	2-50
Ancho de Banda [Hz]	DC 400	50 -300	50-300
Sobrevenida al choque en 1 mseg	>2000g	<200 g	<10 g

Dependiendo del tipo de mecanismo que se utiliza para medir las fuerzas ejercidas en una dirección, podemos encontrar diversos tipos de acelerómetros, como por ejemplo, de péndulo, de cadena vibrante, de fibra óptica o de sílice.

Giróscopos

La finalidad de los giróscopos en el sistema de navegación es determinar las velocidades angulares y las aceleraciones.

Los principales condicionantes para elegir unos giróscopos u otros en la IMU son básicamente cuatro: el sesgo, el factor de escala, el ruido y tamaño.

Se pueden distinguir cuatro tipos de giróscopos según su principio de funcionamiento, con rotor, ópticos, de resonancia y los basados en el efecto de Coriolis (Colomina, 1999).

En la Figura 2.18 podemos ver los distintos tipos de giróscopos y los más utilizados en la orientación directa de sensores.

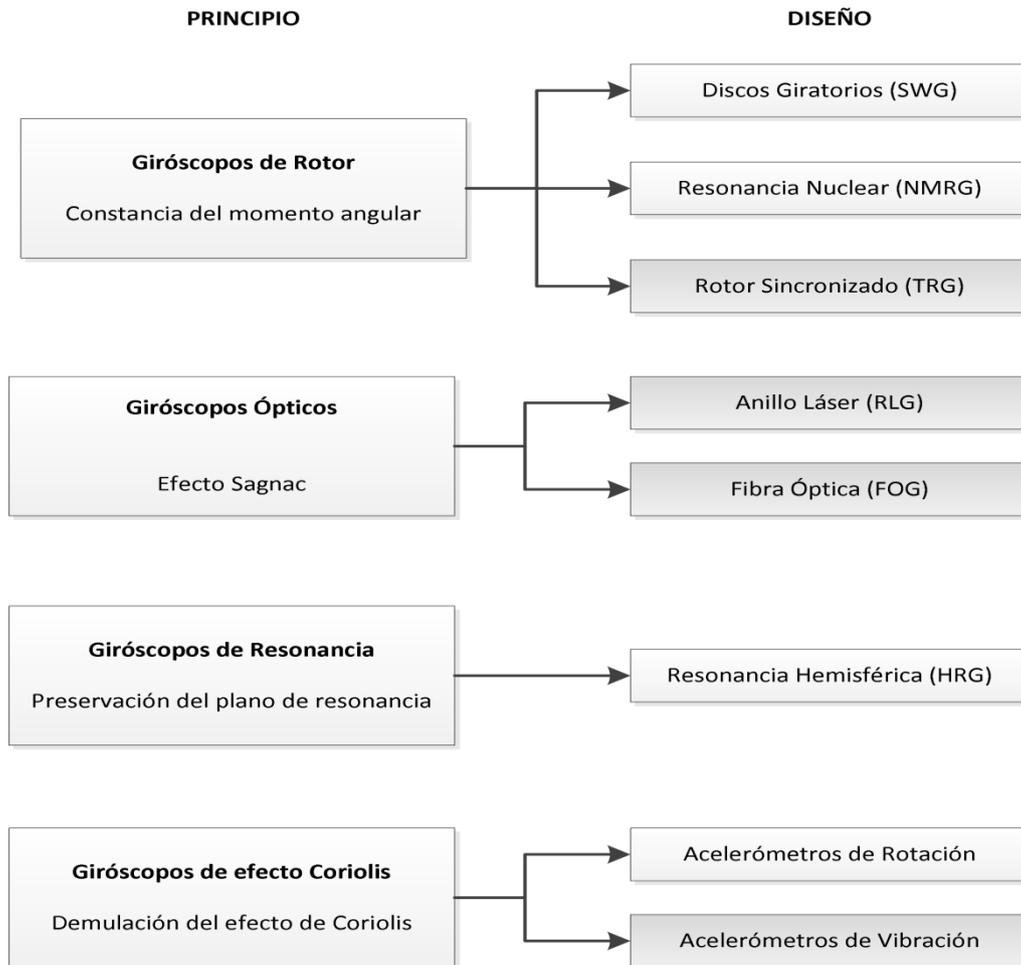


Figura 2.18 Clasificación de giróscopos. En gris los más utilizados en orientación directa de sensores (Skaloud, 1999)

En la Tabla 7 se pueden observar las precisiones típicas de los giróscopos. En calidad de “navegación”, éstos proporcionan horas de navegación sin ayuda externa. Los de calidad “aviación” alcanzan la calidad de navegación, pero con ayuda externa. Los “tácticos” posibilitan la navegación sin ayuda durante segundos o pocos minutos, pero alcanzan calidad de navegación si se les proporciona ayuda externa. Éstos presentan una deriva del orden de 18 km/h (Sanz Muñoz, 2004).

Tabla 7 Precisiones típicas de giróscopos (Barbour, 2010)

Parámetro/Calidad	Baja	Táctico	Aviación	Navegación
Ángulo browniano (ARW) [$^{\circ}/\sqrt{h}$]	>0.5	0.5-0.05	<0.5	<0.001
Inestabilidad del sesgo (drift) [$^{\circ}/h$]	>10	1-10	<0.01	<0.01
Inestabilidad del factor de escala %	0.1 – 1	0.01-0.1	<0.01	<0.001
Rango de medición [$^{\circ}/seg$]	50-1000	>500	50-300	>400
Ancho de banda [Hz]	>70	~500	~100	100-500
Sobrevida al choque	10^3	10^3-10^4	10^3	10^3

Errores de la IMU

Los principales errores que afectan a los acelerómetros y a los giróscopos son dependientes de los cambios de temperatura, efectos elásticos, así como otros errores debidos a la vibración. También pueden contener errores debidos a un factor de escala que consiste en una constante en la que se pueden incluir factores lineales y cuadráticos. Este factor de escala se produce debido a que los ejes de referencia del ensamblaje pueden no coincidir con los ejes de la carcasa y pueden introducir desalineamientos que acoplan aceleraciones a lo largo de los ejes (Sanz Muñoz, 2004).

Los errores más característicos de la IMU pueden enumerarse de la siguiente manera:

1. Error en alineamiento.
2. Error en la compensación gravitacional debido al modelo de gravedad.
3. Errores en la transformación de coordenadas.
4. Errores en función del tiempo.
5. Errores producidos por interferencias y dinámica de la plataforma.

2.6.3. Sistema de captura de datos multisensorial

Generalmente el módulo de captura de datos de cualquier sistema de cartografiado móvil está formado por uno o múltiples sensores capaces de capturar distintas respuestas físicas del escenario al que dirigen su foco (video, cámara, láser escáner, radar, etc.).

En un sistema fotogramétrico multisensorial, la captura de datos se realiza a partir de múltiples sensores o cámaras, permitiéndonos situar en el espacio la escena captada y pudiendo realizar mediciones en 3D sobre el objeto plasmado. Una de las ventajas que nos permite tener imágenes orientadas espacialmente, es poder dotar de textura el escenario reproducido en 3D.

El sistema fotogramétrico debe estar preparado para poder sustituir o incluso acoplar un nuevo tipo de sensor. De esta manera, conforme evoluciona la tecnología y la resolución de las cámaras se puede realizar mediciones más precisas. En otro orden de ideas, también posibilita modificar la captura de la respuesta óptica del objeto. De este modo, se puede combinar cámaras fotográficas, cámaras de video, cámaras térmicas, infrarrojas, etc.

Los primeros sensores CCD (*charge-coupled device*, en español dispositivo de carga acoplada) usados en cartografía aero/espacial fueron lineales, con el problema que esto acarrea en fotogrametría tener que procesar el centro de proyección y la orientación espacial en cada línea de la imagen (Grejner-Brzezinska, 2001; Portalés & Lerma, 2003).

A mediados de los 90 se ha avanzado con la tecnología de los semiconductores apareciendo los CCD de formato modular de 2Kx2K a 9Kx9K píxeles (1Kx1K = 1024x1024 píxeles).

Se pueden utilizar filtros en las cámaras para poder modificar la longitud de onda que captura el sensor. Éstos suelen situarse entre la óptica y el sensor, o delante de la lente mediante un porta filtros (Figura 2.19).

Un uso adecuado de la cámara digital pasa por conocer las propiedades y cualidades del conjunto de sus componentes. La repercusión de sus componentes en la geometría, radiometría y en la calidad de la imagen puede ser muy diversa. Dentro de cada uno debemos tener en consideración (Lerma García, 2002):

1. Aspectos geométricos:
 - Estabilidad de la longitud focal.
 - Fijación del sensor de estado sólido.
 - Campo de vista.
 - Distorsiones de la lente.
2. Aspectos radiométricos y espectrales:
 - Curva de transmisión de la luz según la abertura del diafragma.
 - Eficiencia cuántica según el rango espectral.
 - Razón señal ruido.

3. Aspectos de calidad de imagen:

- Reproducción de color.
- Nitidez.
- Contraste.
- Interpolación.

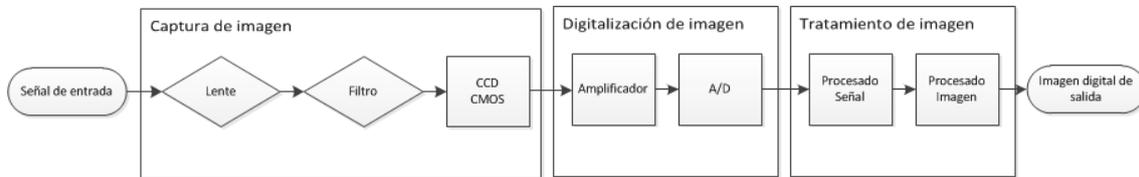


Figura 2.19 Componentes básicos de una cámara digital (Lerma García, 2002)

2.7. Integración GNSS/IMU

La integración entre el GNSS y la IMU nos permite realizar una navegación inercial más precisa que trabajando cada sensor por separado, ya que el error que acumula la IMU puede ser compensado por la posición que proporciona el GNSS corrigiendo las derivas que sufren los giróscopos y acelerómetros de la IMU.

Asimismo, en intervalos cortos de tiempo la información del equipo inercial también puede suplir al GNSS.

Las principales ventajas de la integración del GNSS con la IMU son:

- Obtener un sistema más robusto y preciso que los sensores funcionando independientemente.
- Continuar la navegación si se produce una pérdida de señal de los satélites.
- Proporcionar una solución de navegación más completa (con 6 grados de libertad) a una frecuencia mayor que la que proporcionaría un GNSS solo.
- Reducir las componentes aleatorias de los errores GNSS en la solución de navegación.
- Crear una solución independiente que se puede adaptar a diferentes sensores.

Como desventajas podemos citar:

- Requerir estaciones de referencia GNSS cercanas a la zona de trabajo.
- Necesitar de una calibración periódica para la transferencia del alineamiento entre sensores (Jacobsen, 2002).

Existen tres modos básicos a la hora de integrar la solución del GNSS con la de la IMU. En dos de ellos el GNSS nos proporciona tiempo, velocidad y posición, mientras que la IMU registra orientación, velocidad y posición. En el tercer modo, los dos sensores obtienen medidas de las variaciones de orientación y velocidad.

2.7.1. Modo no acoplado

La IMU y el GNSS proporcionan datos de navegación independientes. El GNSS aporta posición, velocidad y tiempo (P, V, T) y la IMU posición, velocidad y orientación (P, V, O). La solución integrada se realiza por medio de una unidad externa (Figura 2.20). Las principales ventajas de utilizar este sistema son:

- Proporciona una cierta tolerancia a fallos de los componentes del sistema.
- Es una configuración fácil, rápida y económica de generar.

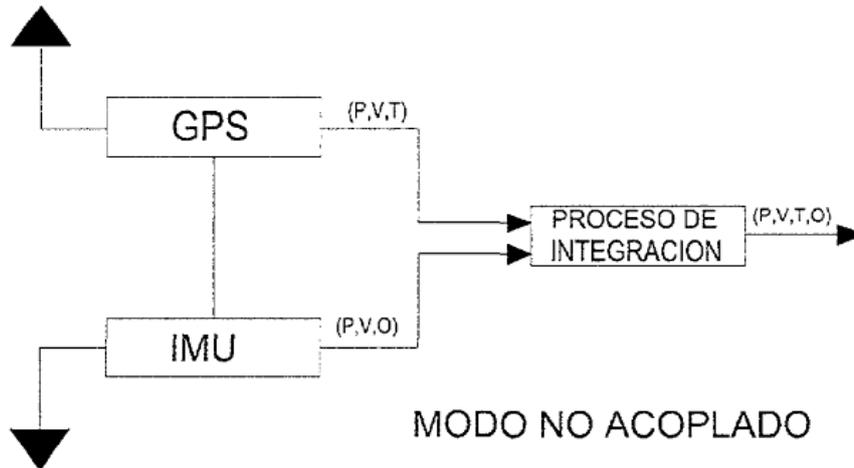


Figura 2.20 Modo de integración no acoplado (Sanz Muñoz, 2004)

2.7.2. Modo ligeramente acoplado

La solución es la proporcionada por el GNSS sirviendo la IMU de ayuda ante la pérdida de ciclos (Figura 2.21). En este tipo de integración se suele utilizar un filtro Kalman para calcular los valores de tiempo, de velocidad y de posición. Las ventajas del modo son:

- Permite recuperar pérdidas de ambigüedades después de una pérdida corta de la señal de los satélites.
- Se nutre de la información generada por la IMU en caso de no visar 4 satélites.
- Es genérico y simple de implementar.

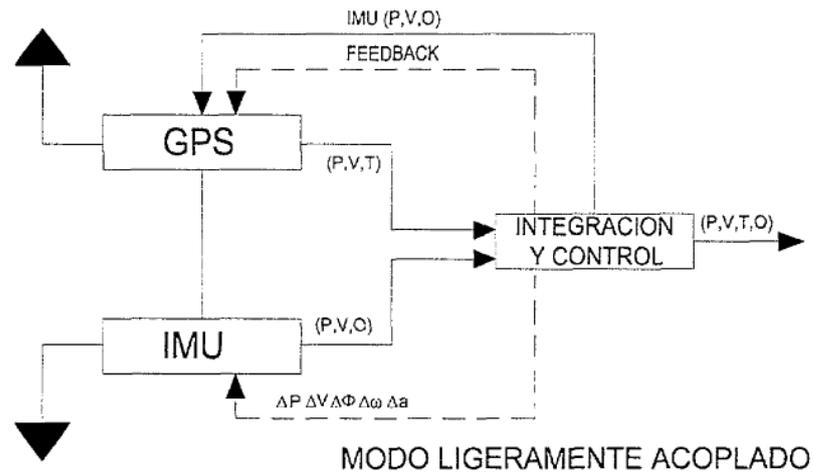


Figura 2.21 Modo de integración ligeramente acoplado (Sanz Muñoz, 2004)

2.7.3. Modo totalmente acoplado

Se utiliza el GNSS como fuente de medidas de posiciones y la IMU como fuente de medida de aceleración y de orientación. Los datos se combinan en un sistema de procesado y se emplea la información de velocidad como ayuda para rastrear la posición de los satélites (Figura 2.22).

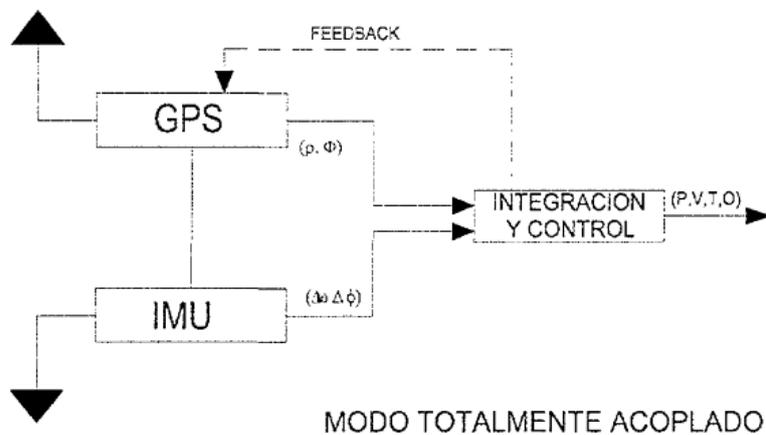


Figura 2.22 Modo de integración totalmente acoplado (Sanz Muñoz, 2004)

2.7.4. Precisiones de la integración cámaras - GNSS/IMU

La precisión en la obtención de la orientación externa de los sensores (georreferenciación) y otros parámetros (velocidad) depende de múltiples factores, como, por ejemplo, la planificación de la trayectoria, la constelación de los satélites, la distancia entre la estación de referencia (base) y el receptor GNSS, cambios bruscos en la dirección, etc.

Se puede clasificar los errores que afectan a la precisión final del sistema como (Mohamed & Klaus-Peter, 2000):

- *Errores de calibración:* Engloban los errores de calibración de los parámetros internos de las cámaras, los parámetros de desalineamientos de los sensores del sistema fotogramétrico multisensorial GNSS/INS.
- *Errores de navegación:* Producidos por la deriva provocada por el GNSS y la deriva de la IMU.
- *Errores de las imágenes digitales:* Estabilidad de los parámetros internos y de la precisión en las medidas de puntos homólogos sobre la imagen.
- *Factores que afectan a la precisión global:* Aquí se englobarían aspectos como, geometría de la cámara, resolución, ratio de captura de las imágenes, tipo de extracción de características sobre la imagen, etc.

La precisión de la orientación de una solución GNSS/IMU, se suele describir en términos de precisión absoluta y relativa. Los primeros establecen el error medio cuadrático de la componente correspondiente, mientras que los segundos corresponden a los errores aleatorios acumulados en el transcurso del tiempo (Lerma García, 2002).

En la Tabla 8 se muestran las precisiones absolutas de los diferentes modelos del sistema POS AV, sistema de hardware y software desarrollado por la compañía Applanix & Trimble en la georreferenciación directa de sensores (Applanix, 2013) obtenidas en tiempo real y refinadas en post-proceso. En la Tabla 9 podemos encontrar las correspondientes precisiones relativas.

Tabla 8 Precisión absoluta POS AV

POS AV	310	310 Post- Proceso	410	410 Post- Proceso	510	510 Post- Proceso	610	610 Post- Proceso
Posición (m)	0.1-0.5	0.05-0.3	0.1-0.5	0.05-0.3	0.1-0.5	0.05-0.3	0.1-0.5	0.05-0.3
Velocidad (m/s)	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.005	0.01	0.005
Roll & Pitch (deg)	0.02	0.015	0.015	0.008	0.008	0.005	0.0050	0.0025
Heading r.m.s (deg)	0.08	0.035	0.04	0.025	0.04	0.008	0.02	0.005

Tabla 9 Precisión POS AV Post-Proceso Orientación relativa

POS AV	310	410	510	610
Ruido (deg/sqrt(hr))	0.15	<0.1	0.02	0.005
Deriva(deg/hr)	0.5	0.5	0.1	<0.01

2.7.5. Alineación de un sistema inercial

El primer paso para poder obtener una correcta navegación en un sistema de navegación inercial consiste en alinear la plataforma según los ejes de navegación, de esta manera nos aseguramos que las medidas que proporciona la IMU son las correctas.

La alineación de un sistema inercial, es un proceso mediante el cual se determinan las condiciones iniciales (la posición x , la velocidad \dot{x} , la orientación inicial del sistema inercial Ω_o y el valor de gravedad del punto donde se realice la alineación) para poder integrar las ecuaciones diferenciales de navegación, Ec. 2-50 (Jekeli, 2000).

La alineación puede ser estática, si la velocidad inicial es cero, o dinámica si es diferente a cero. En este segundo caso se precisa la ayuda de un receptor GNSS que proporcione las condiciones iniciales tanto de posición como de velocidad.

Existen diversos métodos para conseguir el alineamiento del INS, como puede ser el de transferir el alineamiento de un sistema de mayor calidad a otros de menor. Otra manera consiste en nivelar la plataforma con respecto a la gravedad con el fin de conseguir que las aceleraciones en los ejes horizontales sean nulas. Posteriormente se realiza una alineación para determinar el ángulo de guiñada (Figura 2.7),

obteniendo la orientación relativa al norte. Este alineamiento consiste en rotar la plataforma en torno a la vertical hasta la dirección deseada o determinar el ángulo entre esta dirección y la real.

2.7.6. Filtro Kalman

El filtro Kalman implementa un grupo de ecuaciones diferenciales linealizadas y discretizadas que modelan los errores de navegación inercial y los errores de la IMU que los provocan. Las diferencias entre las posiciones obtenidas por el navegador inercial y por el GNSS se procesan en el filtro Kalman, normalmente a 1 Hz, para estimar el lento crecimiento del error en la posición de la IMU. El filtro de Kalman es una componente clave en el algoritmo de navegación. Lleva a cabo dos funciones principales: estimación y reducción de ruido (Sanz Muñoz, 2004). A continuación se describen ambos:

- Estima los errores internos de la IMU basado en comprobaciones con los datos del GNSS y en un modelo dinámico de error del INS.
- Atenúa el ruido de la IMU y del GNSS, eliminando los errores sistemáticos.

El filtro Kalman es una implementación recursiva del algoritmo de estimación del error mínimo cuadrático óptimo, entendiendo óptimo como la consecución del valor medio entre la incerteza, la dinámica que se les presume a las mejores estimadas (ruido del proceso), la incerteza en las medidas (ruido de las medidas) y la observación de los estados individuales requerido para minimizar la figura de error. En la Figura 2.23 se puede observar el modo de actuar del filtro Kalman centralizado. La IMU mide el incremento de velocidad y la diferencia angular solucionando las ecuaciones de navegación (Ec. 2-50), mientras que el GNSS obtiene pseudodistancias y medidas de fase precisas a baja frecuencia para un determinado tiempo (t).

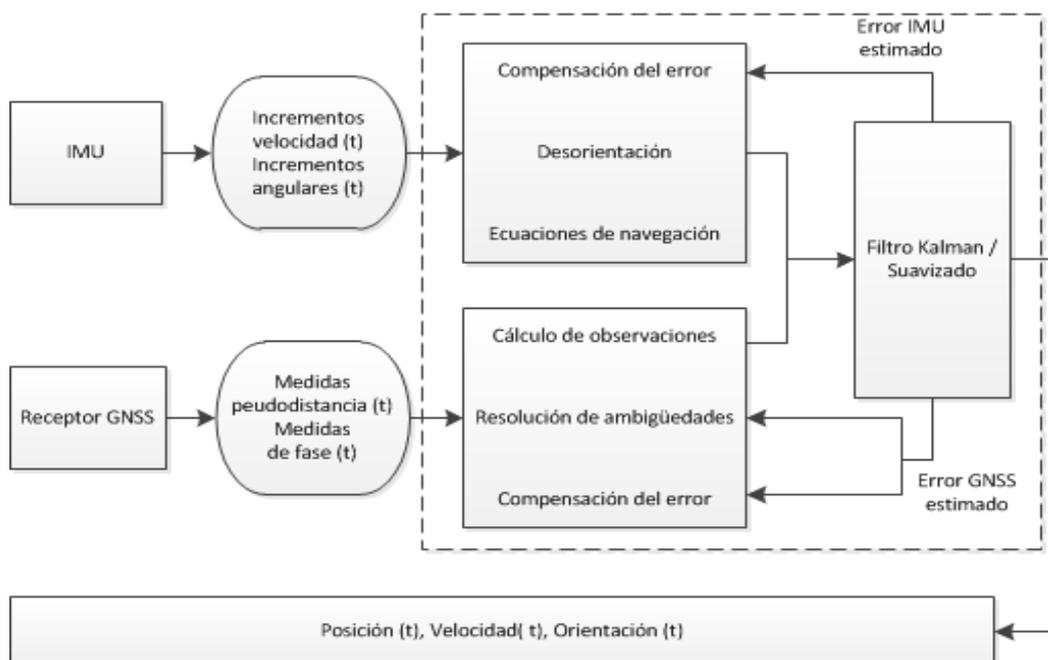


Figura 2.23 Integración centralizada GNSS/INS

3. Sistema Fotogramétrico Multisensorial

3.1. Diseño del sistema multicámara portátil GNSS/INS

El sistema multicámara portátil GNSS/INS está formado por un cuerpo cilíndrico dentro del cual se encuentra la IMU, en la parte superior se sitúa enroscada la antena GNSS, formando un sistema GNSS/IMU no acoplado. Los beneficios de este tipo de integración son una configuración económica, fácil y rápida de montar, además de proporcionar una cierta tolerancia a los fallos de los componentes del subsistema.

En los extremos del cilindro se encuentran unos soportes donde se pueden colocar múltiples cámaras tanto visibles como térmicas (Alba, et al., 2011; Lerma, et al., 2010; Borrmann, et al., 2012) de esta manera se pueden fusionar los resultados provenientes de distintos tipos de sensores. Los acoples de las cámaras al soporte multicámara permiten realizar giros alrededor de los ejes del sistema, permitiendo realizar tanto tomas estereoscópicas como tomas convergentes.

La IMU está situada en el centro de la estructura (Figura 2.6), de modo que:

- eje X: siguiendo la dirección del brazo horizontal sobre el que se montan las cámaras.
- eje Y: con dirección al observador y sentido a la escena.
- eje Z: con dirección y sentido a la antena GNSS.

El diseño ha tenido en cuenta que la antena GNSS esté siempre verticalizada, con tal de tener un buen horizonte para la recepción de la señal evitando cualquier obstrucción que pueda causar pérdida de señal. En la parte superior central, existe la posibilidad de aplicarle una extensión y lograr mayor altura, de forma que ningún sensor de captura de datos pueda obstaculizar la recepción de la señal (Figura 3.1).

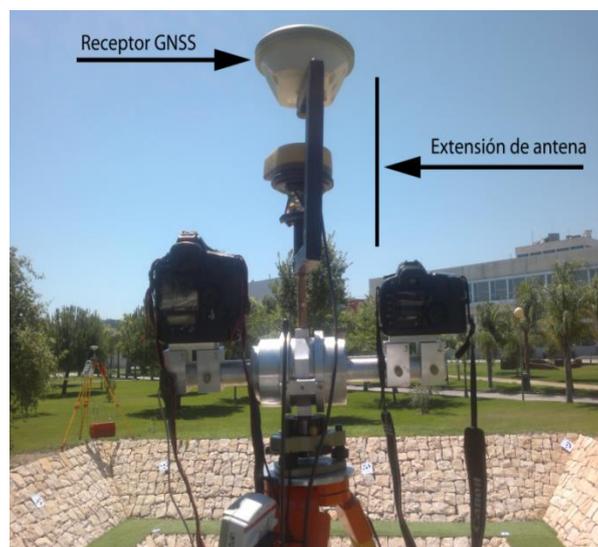


Figura 3.1 Sistema multicámara portátil GNSS/INS con extensión de antena

3.2. Receptor GNSS

El receptor GNSS utilizado es el GPS Trimble 5700 (Figura 3.2). El 5700 (Tabla 10) es un receptor GPS RTK de doble frecuencia con 24 canales y larga duración de las baterías. Las capacidades WAAS y EGNOS le permiten realizar levantamientos diferenciales en tiempo real para aplicaciones GIS sin una estación base (Trimble, 2013).



Figura 3.2 Trimble 5700

El método de navegación puede utilizarse empleando un solo receptor y la solución de red (Virtual Reference Station, VRS) proporcionada por alguna institución cartográfica como es el Instituto Cartográfico Valenciano. Este método permite obtener precisiones entorno a los 2 cm usando 4 estaciones de referencia a una distancia entre 40-50 km (Retscher, 2002).

En las pruebas de campo se ha optado por el empleo de GNSS-RTK con tal de reducir al máximo las posibles fuentes de error. Es importante que la precisión relativa entre los puntos de apoyo y las coordenadas proporcionadas por el GNSS sea alta y tenga una repetitividad de orden centimétrico.

Tabla 10 Características GPS Trimble 5700

Posicionamiento GPS de código diferencial	
Horizontal	$\pm(0.25 \text{ m} + 1 \text{ ppm})\text{RMS}$
Vertical	$\pm(0.5 \text{ m} + 1 \text{ ppm})\text{RMS}$
Precisión de pos. WAAS diferencial	<5 m 3DRMS (por lo general)
Levantamiento GPS estático y estático rápido	
Horizontal	$\pm(5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm})\text{RMS}$
Vertical	$\pm(5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})\text{RMS}$
Levantamientos cinemáticos	
Horizontal	$\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})\text{RMS}$
Vertical	$\pm(20 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})\text{RMS}$
Tiempo de inicialización	<10 segundos (por lo general)
Fiabilidad en la inicialización	>99.9% (por lo general)

3.3. Unidad de Medida Inercial

Se ha utilizado el modelo Mtx (Figura 3.3) de la marca Xsens Technologies B.V (Xsens, 2013). Puede proporcionar datos con una frecuencia de 120 MHz. Las mediciones efectuadas están expresadas en el sistema de referencia solidario al IMU, con las precisiones que se pueden ver en la Tabla 11.



Figura 3.3 IMU Mtx

Entre los datos cinemáticos que proporciona se encuentran las aceleraciones (ms^{-2}) y la velocidad angular de giro (rads^{-1}):

- Aceleración: $(a_x \ a_y \ a_z)$
- Velocidad de giro: $(w_x \ w_y \ w_z)$

También proporciona la matriz de rotación de navegación respecto a los ejes cartesianos que forman la IMU.

Tabla 11 Especificaciones Xsens MTx

Resolución angular	0.05°
Precisión en estático (Roll/Pich)Y/X	< 0.5°
Precisión en estático (Heading) Z	< 1°
Precisión en dinámico	2° RMS
Máximo ratio de refresco	120 Hz

3.4. Sensores fotogramétricos

Los sensores fotogramétricos utilizados para las pruebas fueron dos cámaras réflex digitales del espectro visible, de distinta resolución.

- Canon EOS 1D Mark III (21.9 Mpíxel), Figura 3.4 derecha, con un objetivo Canon EF 24 mm F2.8.
- Canon EOS D60 (6.3 Mpíxel), Figura 3.4 izquierda, con un objetivo Sigma 15-30 mm F3.5-4.5 EX DG (fijado a 15 mm y enfocado al infinito).

Las características técnicas de las cámaras digitales se pueden observar en la Tabla 12.



Figura 3.4 izq.: Cámara Canon D60; der.: Cámara Canon EOS- 1DS

Tabla 12 Características Cámaras

Cámara	Canon EOS 1D Mark III	Canon EOS D60
Resolución (píxel)	5616 x 3744	3072 x 2048
Tamaño de píxel (µm)	6.4	7.4
Tamaño de sensor	Full frame (36 mm x 24 mm)	APS-C (22.7 x 15.1 mm)
Longitud focal (mm)	24	15 (equivalente a formato completo 24)
Calidad de imagen	RAW	RAW
Objetivos	Canon EF 24 mm F2.8	Sigma 15-30 mm F3.5-4.5 EX DG

A la vista de la Tabla 12 podemos observar como la cámara 1D Mark III proporcionará una captura de datos de mayor resolución que la cámara D60 a una misma distancia del objeto, teniendo casi cuatro veces más resolución, lo que ofrece una mayor calidad de imagen permitiendo la captura de detalles más pequeños sobre la escena.

3.5. Georreferenciación de las imágenes

Hasta la aparición de los sistemas de navegación, la georreferenciación de las imágenes se realizaba de manera indirecta a partir de puntos de apoyo y triangulación. Con la aparición de los sistemas GNSS/INS la necesidad de dotar de gran cantidad de puntos de apoyo se ha reducido de manera sustancial (Jacobsen, 2000; Khoshelham, 2009).

La obtención de los parámetros de orientación externa por medio de la georreferenciación directa de los sensores nos proporciona una serie de ventajas, como son:

- Posibilidad de planificar la ruta de navegación, pudiendo programar con anterioridad las posiciones por donde debe pasar el sistema y realizar la toma de datos, permitiendo el uso de UAV (Oktay & Guoqing, 2009; Rönnbäck, 2000).
- Reducción de necesidad de puntos de apoyo, lo que supone una reducción de gasto topográfico (Khoshelham, 2009).
- Obtención en tiempo real de los parámetros de orientación externa de los sensores, lo que supone una reducción de tiempo en el cálculo fotogramétrico.
- Garantía de la resolución de los ajustes fotogramétricos, eliminando posibles inconsistencias matriciales, debidos a la geometría del proyecto, dado que proporciona unos parámetros aproximados de orientación.
- Facilidad en la aplicación de métodos automáticos de correspondencias, para una densificación de los resultados obtenidos por los sensores (Lerma, et al., 2013).

La georreferenciación directa necesita el trabajo en conjunto de distintos instrumentos de captura de datos, GNSS e IMU (Mohamed & Klaus-Peter, 2001).

Para poder calcular con precisión las coordenadas terreno, utilizando la georreferenciación directa se deben seguir una serie de requisitos mínimos (Hutton & Mohamed, 2005):

1. Los sistemas de orientación inercial deben colocarse de manera rígida y solidariamente al sensor el cual controla su orientación. Esto quiere decir, que si los sensores montados sobre el vehículo no se comportan como un cuerpo rígido, es aconsejable que tengan acoplado cada uno su unidad inercial de control.
2. Los desalineamientos físicos entre los ejes de la IMU y los vectores que lo unen a cada sensor deben calibrarse. De esta manera se tendrán los giros y vectores que relacionan los distintos sensores del sistema.
3. Los tiempos de captura de las imágenes deben estar sincronizados con los tiempos de navegación.
4. Las cámaras del sistema deben estar calibradas y permanecer estables durante la navegación del sistema.

Una de las principales ventajas de cualquier sistema de georreferenciación de imágenes GNSS/INS radica en que los sistemas ópticos son modulares, pudiendo en

cualquier momento sustituir un sensor óptico por otro de mayor resolución o bajo coste.

En la Figura 3.5 podemos observar las transformaciones que sufren los datos obtenidos por la antena GNSS y el sensor IMU hasta la obtención de la orientación externa del sensor óptico de captura de datos.

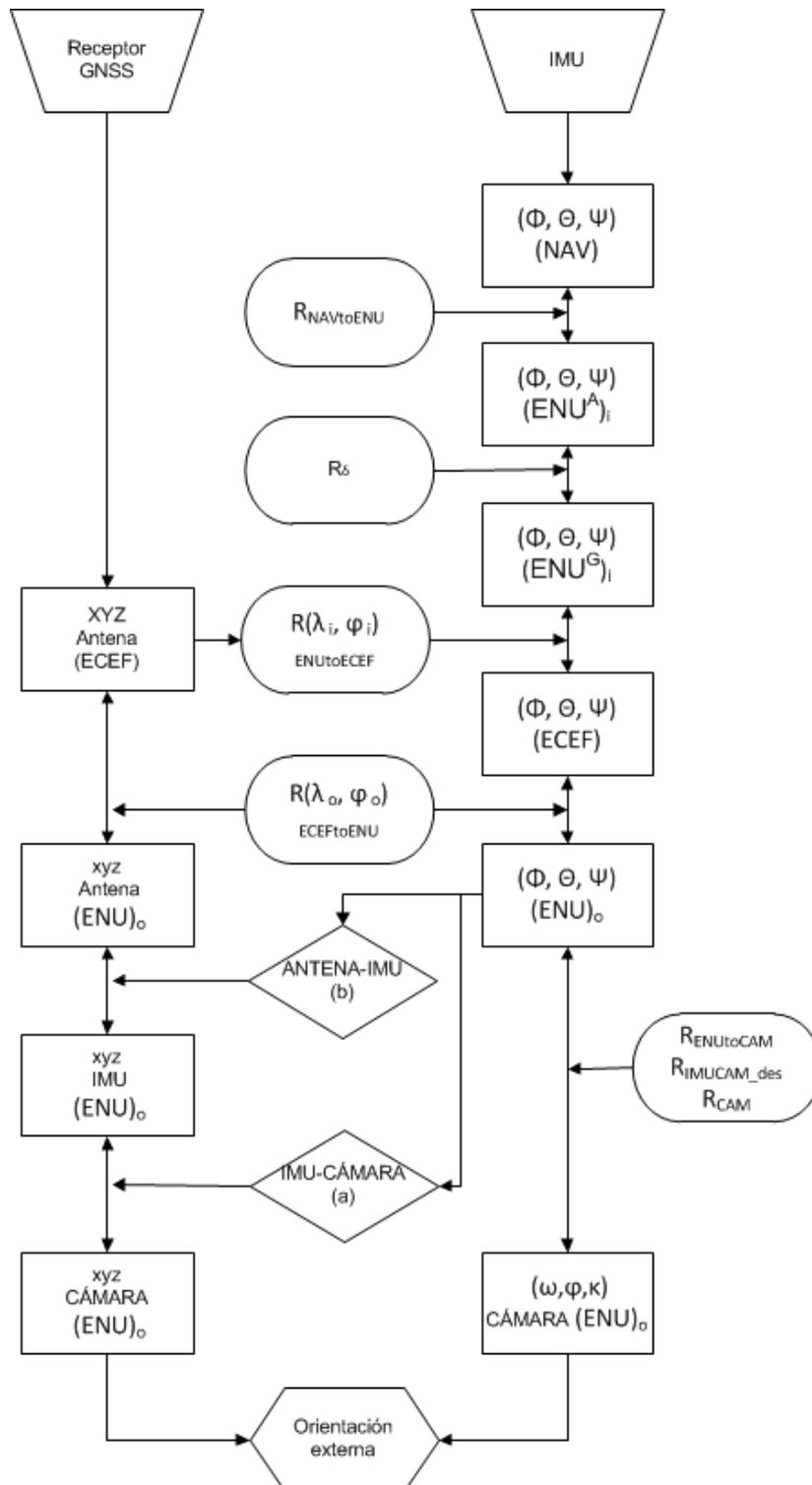


Figura 3.5 Flujo de datos en georreferenciación directa

3.6. Cálculo de la orientación externa directa de la cámara

La orientación externa de las cámaras corresponde a la translación y orientación respecto al espacio, generalmente un sistema local especificado por el dátum y el tipo de proyección. Sin embargo, los datos que proporciona el GPS/IMU, la posición está referida a un sistema fijo y centrado en la tierra (ECEF) y las orientaciones facilitadas por la IMU pitch, roll y heading (Φ , Θ , Ψ) son respecto al sistema de navegación definido por la IMU. (Skaloud, et al., 1996; Hutton & Mohamed, 2005; Khoshelham, 2009).

La transformación de los giros de navegación (Φ , Θ , Ψ) a los giros de la cámara (ω , φ , κ), pasa por utilizar la proyección y la definición del Dátum. Para ello primero debemos pasar la rotación de la IMU en el sistema ENU^G (Ec. 2-24) del punto "i" en el momento de captura a ECEF:

$$Rimu_{ECEF} = R(\lambda_i, \varphi_i)_{ENUi}^{ECEF} Rimu_{ENUi}^G \quad 3-1$$

Posteriormente se pasa al sistema local respecto al punto de origen "o" (λ_o, φ_o):

$$Rimu_{ENUo} = R(\lambda_o, \varphi_o)_{ECEF}^{ENU} Rimu_{ECEF} \quad 3-2$$

Para obtener la rotación de la cámara en el sistema ENU_o , aplicamos un giro de 100° al eje x y la rotación de desalineamientos entre los ejes de la cámara y la IMU:

$$Rcam_{ENUo} = Rimu_{ENUo} R_{imu}^{cam} R_{ENU}^{CAM} \quad 3-3$$

Concatenando las rotaciones, tenemos:

$$Rcam_{ENUo} = R(\lambda_o, \varphi_o)_{ECEF}^{ENU} R(\lambda_i, \varphi_i)_{ENUi}^{ECEF} Rimu_{ENUi}^G R_{imu}^{cam} R_{ENU}^{CAM} Rcam_{INS} \quad 3-4$$

Siendo:

- $R_{ENU}^{CAM} = R\left(\frac{\pi}{2} \ 0 \ 0\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$: rotación que pasa de sistema ENU^G a sistema cámara, aplicando un giro de 100° al eje "x" sitúa el eje "y" en posición de la vertical.
- R_{imu}^{cam} : rotación de desalineamiento entre el sistema de la IMU y de la cámara.
- $Rcam_{INS}$: rotación de la cámara respecto al sistema multicámara portátil GNSS/INS.

La rotación $R_{cam_{INS}}$ nos permitirá situar la cámara en cualquier orientación sobre el sistema multicámara portátil GNSS/INS.

La interpretación de la Ec. 3-4 es:

1. Rotamos el sistema de la cámara respecto al INS ($R_{cam_{INS}}$), pasamos de sistema cámara a ENU^G (R_{ENU}^{CAM}) y se aplica el desalineamiento entre los sistemas IMU-CAM (R_{imu}^{cam}).
2. Giramos según la rotación que indica la IMU ($R_{imu_{ENUi}}$).
3. Se pasa a ECEF en el punto de estación i ($R(\lambda_i, \varphi_i)_{ENUi}^{ECEF}$).
4. Se pasa a ENU^G local según el punto origen o ($R(\lambda_o, \varphi_o)_{ECEF}^{ENU}$) obteniendo la rotación de la cámara en sistema ENU_o ($R_{cam_{ENUo}}$).

A la vista de la Ec. 3-4 para cada momento de captura se calcula la rotación respecto al punto de estación "i" ($R(\lambda_i, \varphi_i)$) y al punto de origen "o" ($R(\lambda_o, \varphi_o)$) del plano tangente ENU^G local.

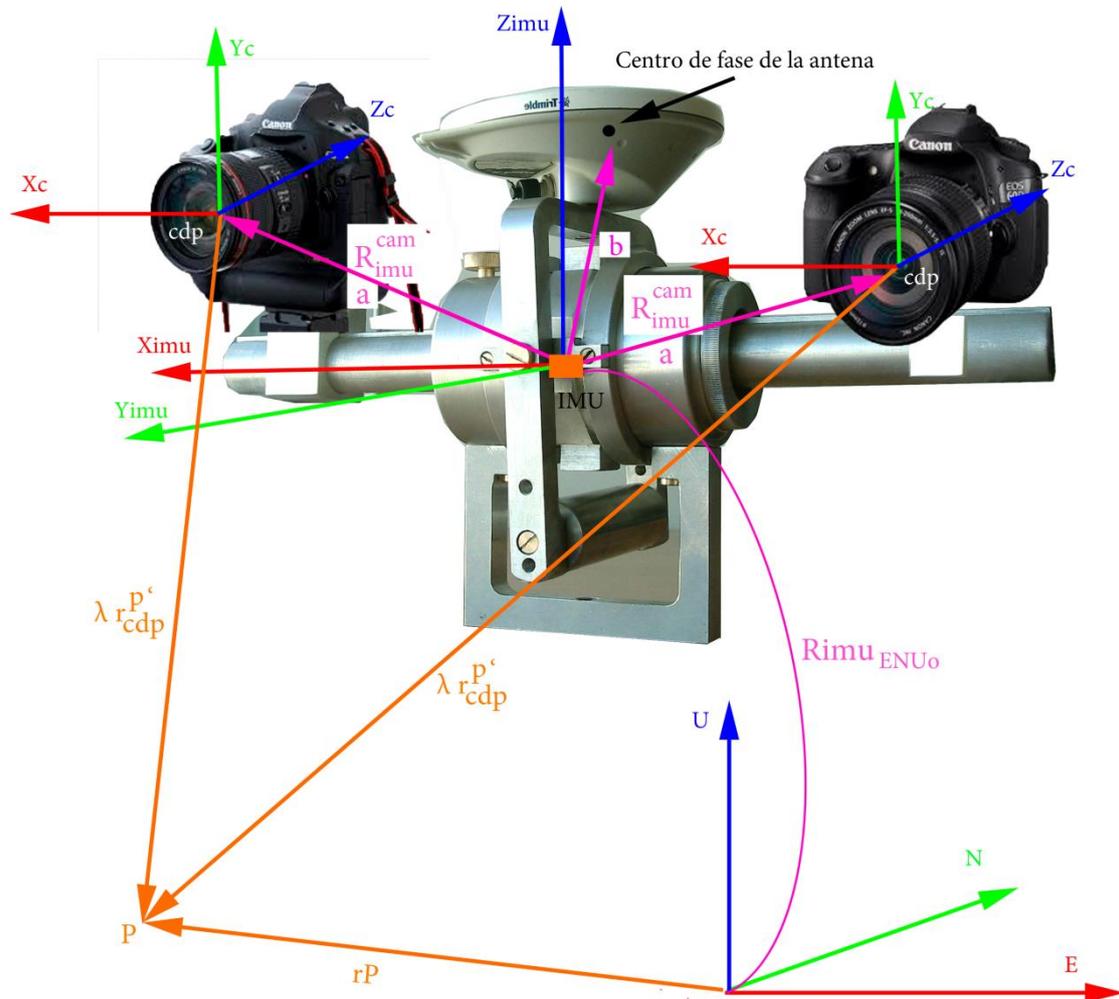


Figura 3.6 Relaciones geométricas en el sistema multicámara portátil GNSS/INS

La relación matemática entre un punto en la imagen \mathbf{p}' y el sistema terreno, como podemos ver en la Figura 3.6, viene dada por una transformación Helmert 3D, con un factor de escala distinto para cada punto:

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{cdp} \\ Y_{cdp} \\ Z_{cdp} \end{pmatrix}_i + \lambda r_{cdp}^{p'} \quad 3-5$$

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{cdp} \\ Y_{cdp} \\ Z_{cdp} \end{pmatrix}_i + \lambda R_{cam_i} \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix} \quad 3-6$$

Siendo:

- $(X_p \ Y_p \ Z_p)$: coordenadas del punto \mathbf{P} en sistema terreno.
- $(X_{cdp} \ Y_{cdp} \ Z_{cdp})_i$: coordenadas del centro de proyección de la cámara en sistema terreno en el momento de captura "i".
- λ : factor de escala.
- $(x \ y \ f)$: coordenadas imagen y focal.
- R_{cam_i} : rotación de la cámara en sistema terreno en el momento de captura i.

De la Ec. 3-6 se puede derivar a las ecuaciones de colinealidad:

$$x = f \frac{R_{11}(X_p - X_{cdp}) + R_{21}(Y_p - Y_{cdp}) + R_{31}(Z_p - Z_{cdp})}{R_{13}(X_p - X_{cdp}) + R_{23}(Y_p - Y_{cdp}) + R_{33}(Z_p - Z_{cdp})} \quad 3-7$$

$$y = f \frac{R_{12}(X_p - X_{cdp}) + R_{22}(Y_p - Y_{cdp}) + R_{32}(Z_p - Z_{cdp})}{R_{13}(X_p - X_{cdp}) + R_{23}(Y_p - Y_{cdp}) + R_{33}(Z_p - Z_{cdp})}$$

Como las cámaras y los sensores de navegación se montan de manera rígida en el sistema multicámara portátil GNSS/INS, el sistema se comporta como un sólido rígido y la relación matemática entre los sensores es:

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}_{ENUo} = \begin{pmatrix} X_{gps} \\ Y_{gps} \\ Z_{gps} \end{pmatrix}_{ENUo} - R_{imu_{ENUo}} \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} + R_{imu_{ENUo}} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} + \lambda (R_{imu_{ENUo}} R_{imu}^{cam} R_{ENU}^{CAM} R_{cam_{INS}}) \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix} \quad 3-8$$

Obteniendo el centro de proyección de la cámara:

$$\begin{pmatrix} X_{cdp} \\ Y_{cdp} \\ Z_{cdp} \end{pmatrix}_{ENUo} = \begin{pmatrix} X_{gps} \\ Y_{gps} \\ Z_{gps} \end{pmatrix}_{ENUo} + R_{imu_{ENUo}} \begin{pmatrix} a_x - b_x \\ a_y - b_y \\ a_z - b_z \end{pmatrix} \quad 3-9$$

Sin embargo, si se libera la rotación en el eje "x" del sistema multicámara portátil GNSS/INS, el vector b ya no sigue los giros generados por el eje "x", como se puede

observar en la Figura 2.8, situándose la antena GNSS sobre la vertical al plano local. Por tanto, al vector b no le afectan los giros en “x” de la plataforma y si se trabaja con la plataforma nivelada en todo momento, podemos despreciar los giros en “y” (éstos no suelen superar los 2°), siendo la rotación alrededor de “z” la que más influye por causa del descentrado entre el eje “z” de la IMU y el centro de fase de la antena. La relación matemática en este caso para el centro de proyección de la cámara quedará:

$$\begin{pmatrix} X_{cdp} \\ Y_{cdp} \\ Z_{cdp} \end{pmatrix}_{ENUo} = \begin{pmatrix} X_{gps} \\ Y_{gps} \\ Z_{gps} \end{pmatrix}_{ENUo} - R(0 \ 0 \ \Psi)_{imu_{ENUo}} \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} + R_{imu_{ENUo}} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \quad 3-10$$

Una vez obtenida la posición del centro de proyección de la cámara por las Ecs. 3-9 o 3-10, y siendo la rotación de la cámara:

$$R_{cam_{ENUo}} = R_{imu_{ENUo}} R_{imu}^{cam} R_{ENU}^{CAM} R_{cam_{INS}} \quad 3-11$$

Obtenemos la posición \mathbf{P} del punto como:

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}_{ENUo} = \begin{pmatrix} X_{cdp} \\ Y_{cdp} \\ Z_{cdp} \end{pmatrix}_{ENUo} + \lambda R_{cam_{ENUo}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix} \quad 3-12$$

3.7. Calibración de las cámaras y del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS

En el siguiente apartado abordaremos el tema de las calibraciones, entendiendo como calibración de cámaras la obtención de los parámetros que modelan las imperfecciones físicas de la cámara, como son las distorsiones de las lentes, la longitud focal y la posición del punto principal (parámetros internos de la cámara), y la calibración del conjunto multicámara portátil GNSS/INS a la obtención de los vectores y orientaciones que relacionan geoméricamente todos los sensores montados (Cramer, 2001; Honkavaara, et al., 2003).

El diseño de los bancos de calibración debe cumplir los siguientes requisitos:

- Estructura estable, poco deformable y controlada. Se debe controlar las propiedades de la estructura, dilatación elasticidad, etc.
- Dimensiones adecuadas al formato de la imagen, preferiblemente a la distancia de trabajo.
- Distribución de marcas según los tres ejes cartesianos y en diferentes planos.
- Construcción y geometría sencilla.

Además de tomar en consideración los requisitos del banco de calibración, también es crítico para la calidad de los resultados de calibración tener en consideración la geometría de la red y en especial la configuración de la posición de las cámaras (Remondino & Fraser, 2006):

- Tener buenos ángulos de convergencia entre cámaras aumenta la precisión en la determinación de los puntos.
- Aumentar el número de rayos que determinan un punto mejora su precisión, la tasa de mejora es proporcional a la raíz cuadrada del número de rayos utilizados.
- Medir un número de puntos considerable sobre la imagen, aumenta la precisión, aunque más importante que la cantidad de puntos, es la distribución de estos sobre la imagen.
- Realizar en la medida de lo posible tomas ortogonales para poder romper la correlación entre los parámetros internos y externos, si no es posible es necesario una buena geometría de los puntos 3D del objeto.

3.7.1. Calibración sensores ópticos

Dado que los sensores montados sobre la plataforma son de distinta naturaleza (multiespectrales y de distinta resolución) es necesario realizar una calibración interna de los parámetros por separado para cada cámara. De esta manera se garantiza que no se contamina la calibración geométrica por la precisión de cada cámara. Existen diversos tipos de calibración geométrica de cámaras para reducir las distorsiones introducidas por los sistemas ópticos y físicos de las cámaras, como pueden ser la calibración basada en líneas rectas. Este método supone que las líneas rectas en el espacio se proyectan rectilíneamente en el espacio imagen, cualquier falta de linealidad producida en la imagen es atribuible a la distorsión radial o tangencial.

Otro método de calibración más potente es la triangulación de un bloque de imágenes por medio del método de ajuste de haces, con la calibración de los parámetros de distorsión basada en las ecuaciones de colinealidad (Ec. 3-6), establece que las marcas observadas deben ser las mismas que las calculadas:

$$\begin{aligned} x_{obs} - x_{cal} &= 0 \\ y_{obs} - y_{cal} &= 0 \end{aligned} \quad \mathbf{3-13}$$

Siendo la rotación del sistema de coordenadas de la cámara R:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad \mathbf{3-14}$$

Al ser una matriz de rotación, la inversa coincide con su traspuesta:

$$R^{-1} = R^T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{pmatrix} = M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad 3-15$$

En la Ec. 3-16 encontramos las ecuaciones de la proyección central o ecuaciones de colinealidad, las cuales nos proporcionan la proyección de un punto 3D (X, Y, Z) sobre el plano imagen. Para mayor información del desarrollo de las ecuaciones de colinealidad, vid. (Lerma García, 2002; Mikhail, et al., 2001).

$$\begin{aligned} xcal = Fx &= f \frac{m_{11}(X - XL) + m_{12}(Y - YL) + m_{13}(Z - ZL)}{m_{31}(X - XL) + m_{32}(Y - YL) + m_{33}(Z - ZL)} \\ ycal = Fy &= f \frac{m_{21}(X - XL) + m_{22}(Y - YL) + m_{23}(Z - ZL)}{m_{31}(X - XL) + m_{32}(Y - YL) + m_{33}(Z - ZL)} \end{aligned} \quad 3-16$$

siendo, $xcal$ e yca las coordenadas imagen referidas al punto principal sin distorsión.

Las coordenadas obtenidas por la Ec. 3-16 serían la posición teórica del punto 3D sobre el plano imagen si todo fuera correcto. Despejando las coordenadas observadas sobre la imagen, de la Ec. 3-13, tenemos:

$$\begin{aligned} xobs &= xcal + dr_x + dt_x + da_x \\ yobs &= ycal + dr_y + dt_y \end{aligned} \quad 3-17$$

- $xcal, ycal$: coordenada u y v en el sistema imagen.
- dr_x, dr_y : distorsión radial en x e y respectivamente.
- dt_x, dt_y : distorsión tangencial en x e y respectivamente.
- da_x : distorsión de afinidad.

Para la calibración de las cámaras basadas en el método de haces de rayos, se debe de tener en cuenta una serie de criterios:

1. Realizar redundancia en las marcas homologas, de esta manera aumenta el número de rayos que generan el punto 3D aumentando la precisión en su determinación.
2. Distribuir las marcas de forma homogénea sobre la imagen, intentando obtener un buen recubrimiento de ésta.
3. Realizar tomas con giros de 90° , de esta manera se evitan correlaciones entre parámetros de distorsión.

4. Intentar que el patrón de calibración tenga puntos en 3D repartidos en distintos planos. Si el patrón de calibración contiene todos los puntos en un mismo plano (2D), realizar tomas ortogonales, con altos ángulos de convergencia entre tomas y a distintas distancias del objeto.

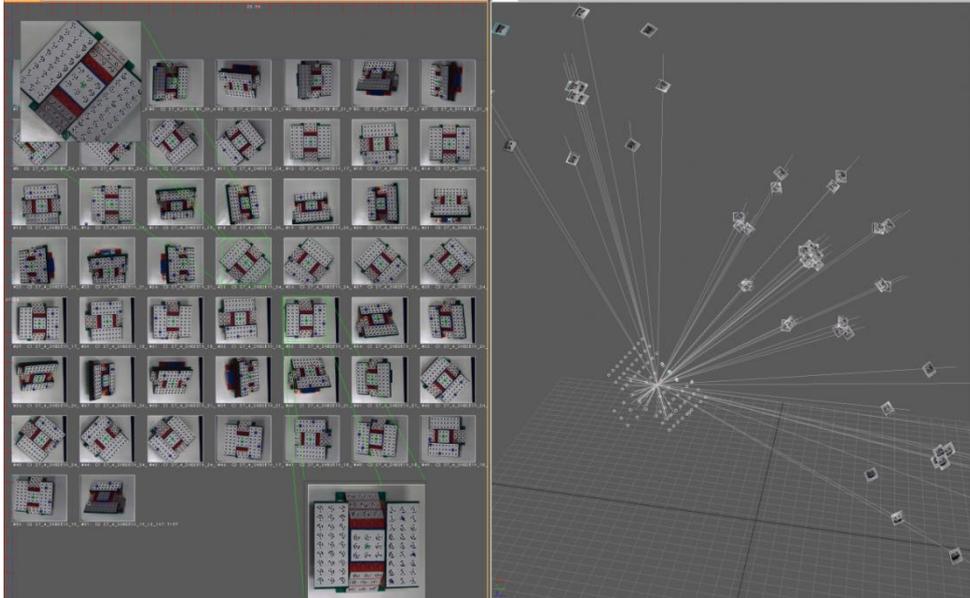


Figura 3.7 Pieza calibración 3D (3Dcomplete, 2012)

Existen tres tipos principales de distorsiones geométricas en fotogrametría, estas son:

- Distorsión radial.
- Distorsión tangencial.
- Distorsión de afinidad de ejes.

3.7.1.1. Distorsión radial

La distorsión radial es la aberración que más sufre una lente. Se le considera simétrica con respecto al eje óptico (Fagueras, et al., 1992). Ésta provoca que las líneas rectas aparezcan sobre la imagen como líneas curvadas.

La distorsión radial se suele expresar por medio de una función polinómica:

$$\Delta r = K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7$$

3-18

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

donde:

- Δr : distancia radial entre el punto real y el punto ideal.
- K_1, K_2, K_3 : parámetros de distorsión radial.

Los parámetros K son los términos que modelan el polinomio de distorsión.

La distorsión de la lente del objetivo depende de la posición de la cámara respecto al objeto, y como ésta se desconoce con precisión por estar las coordenadas del punto afectadas de distorsión, el cálculo de los parámetros de distorsión debe realizarse de manera iterativa. Por este motivo, los parámetros de calibración de una cámara variarán dependiendo de la toma al objeto.

3.7.1.2. Distorsión tangencial

La distorsión tangencial se define como el desplazamiento imagen ocasionado por los defectos de fabricación de la lente que es perpendicular a las líneas radiales. Esta distorsión es debida a la no perpendicularidad entre el eje óptico de la lente y el plano de la imagen.

El efecto producido por el descentrado de la lente es similar al resultante, si se añade un prisma pequeño a una lente perfectamente centrada. El resultado de dicho proceso es que la distorsión producida es asimétrica con respecto al punto principal de auto colimación (Lerma García, 2002). Al efecto resultante se le denomina distorsión tangencial. Como la distorsión tangencial depende del acimut de campo y de la posición del punto nodal fuera del eje, existe una alineación en la que no se produce distorsión tangencial. Dicha alineación se conoce con el nombre de eje de distorsión tangencial cero. La distorsión va en aumento según nos alejamos de dicho eje y es máxima en el eje ortogonal al eje de distorsión cero. La distorsión tangencial es prácticamente simétrica con respecto al punto principal de mejor simetría. La característica principal de este último punto principal es que hace mínima la asimetría existente en la distorsión radial.

Las ecuaciones que modelizan la distorsión tangencia son:

$$\begin{aligned}\Delta x &= P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y \\ \Delta y &= P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2) + 2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y\end{aligned}\tag{3-19}$$

Al igual que pasaba con la distorsión radial la tangencial también varía con el enfoque.

3.7.1.3. Distorsión afín

Dado que los píxeles pueden no ser cuadrados estos pueden introducir un error de falta de perpendicularidad y de escala entre los ejes de la imagen. Para compensarlos se introduce la distorsión de afinidad de ejes.

$$\Delta x = b_1 \cdot x + b_2 \cdot y$$

Esta distorsión es la que menos se utiliza dado que la actual fabricación de los CCD y CMOS evita que esta aberración sea considerable. No obstante suele incluirse para alcanzar precisiones máximas. (Lerma García, 2002).

3.7.2. Calibración del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS

Para poder utilizar la georreferenciación directa de las cámaras es necesario conocer todas las transformaciones que relacionan los distintos sensores que componen el sistema. Para ello se debe conocer el vector que une la IMU con la antena GNSS (b , Figura 3.6); los vectores que unen la IMU con cada cámara (a , Figura 3.6), o las relaciones relativas de las cámaras respecto a una cámara referenciada a la IMU (Kersting, et al., 2012); y los posibles desalineamientos entre los ejes locales de cada sensor.

Los desplazamientos del receptor GNSS con respecto al sensor de la cámara, se calculan en base a un sistema local, ya sea el sistema imagen, o sistema ENU (Yastikli & Jacobsen, 2005). La determinación de los desplazamientos exige el conocimiento de la orientación de los ejes que lo definen. Ésta orientación se puede llevar a cabo de cuatro modos (Lerma García, 2002; Sanz Muñoz, 2004):

- Con inclinómetros.
- Mediante monturas o equipos inerciales (IMU).
- Con plataformas GNSS que incorporan tres antenas GNSS en sus extremos.
- Estableciendo una transformación conforme tridimensional en el proceso de ajuste de la aerotriangulación.

Dado que las distancias y las orientaciones que relacionan cada sensor no se conocen con exactitud, se vuelve necesaria la calibración del sistema para obtener los valores que minimicen los residuos del ajuste.

La calibración INS cuando se resuelve por comparación de la información GNSS/INS con un proyecto fotogramétrico de triangulación (Figura 3.9), se puede resolver en 2 pasos: primero, el cálculo de los desplazamientos entre los centros del INS y los centros de proyección de las cámaras; y segundo, el desalineamiento de las rotaciones (Grejner-Brzezinska, 2001).

3.7.2.1. Excentricidad Receptor GNSS-IMU

La excentricidad GNSS-IMU es el vector b (Figura 3.6) entre el centro del sistema de ejes de la IMU y el centro de fase de la antena GNSS donde se obtienen las coordenadas. Mediante el vector b (GNSS-IMU) orientado, se dota de coordenadas en el sistema ENU al centro de la IMU.

3.7.2.2. Excentricidad IMU-Cámara

La excentricidad IMU-CAM es el vector a (Figura 3.6) entre el centro del sistema de ejes de la IMU y el centro de proyección de las cámaras. Conocidas las coordenadas del centro de la IMU provenientes del GNSS, se puede dotar de coordenadas en el sistema ENU a los centros de proyección de las cámaras por medio del vector a (IMU-CAM) orientado.

3.7.2.3. Desalineamiento de ejes IMU-Cámara

Generalmente los errores de desalineamiento son menores a 3° por lo que una rotación diferencial suele ser suficiente para compensarlo, dependiendo del montaje de las cámaras respecto al IMU. Aplicaciones de alta precisión (mejor que 0.1° (Bäumker & Heimes, 2001)) requieren un tratamiento especial en los desalineamientos entre los sensores del INS y de las cámaras.

Se puede describir el desalineamiento que sufre los ejes de la cámara respecto a los ejes de la IMU (Grejner-Brzezinska, 2001) como la relación entre la rotación de las cámaras y la rotación de la IMU:

$$R_{cam_{ENUo}} = R_{imu_{ENUo}} R_{imu}^{cam} R_{ENU}^{CAM} R_{cam_{INS}} \quad 3-21$$

Podemos despejar de la Ec. 3-21 para obtener la matriz de desalineamiento de la cámara.

$$R_{imu}^{cam} = R_{imu_{ENUo}}^T R_{cam_{ENUo}} R_{cam_{INS}}^T R_{CAM}^{ENU} \quad 3-22$$

Siendo:

- R_{imu}^{cam} : desalineamiento entre el sistema IMU y el sistema cámara.
- R_{ENU}^{CAM} : rotación que pasa de sistema ENU a sistema cámara. Aplicando un giro de 100° al eje "x" situamos el eje "y" en posición de la vertical.

$$R_{ENU}^{CAM} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad 3-23$$

3.7.2.4. Translación y deriva del receptor GNSS

La captura de los datos GNSS puede llevar asociado errores sistemáticos en las coordenadas en el momento de captura (Figura 3.8). Estos errores suelen modelarse por medio de regresiones lineales, o bien ajustando polinomios de mayor grado a la trayectoria GNSS.

Se puede dividir el error en una corrección constante (traslación, ‘shifts’) y otra en función del tiempo (deriva ‘drifts’). Estas correcciones pueden adoptarse independientemente para cada pasada, por sub-bloques o de manera global. Lo usual es incluir los parámetros de deriva por pasadas (Lerma García, 2002).

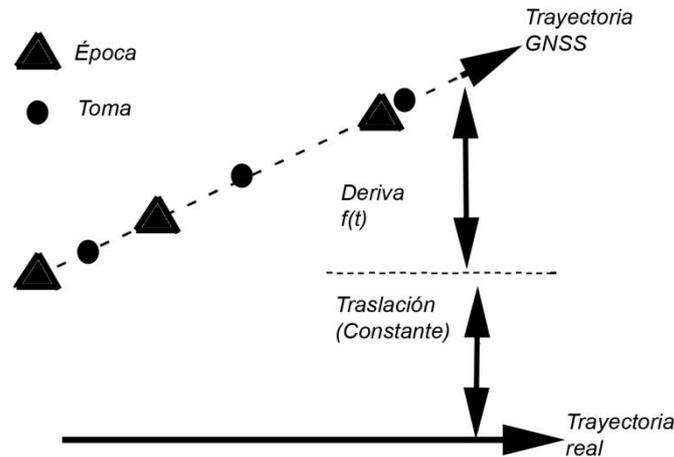


Figura 3.8 Efecto de la traslación y de la deriva sobre la trayectoria

3.7.2.5. Modelo matemático

Para la calibración de los parámetros de transformación entre sistemas, el ajuste de mínimos cuadrados busca minimizar las diferencias entre las coordenadas imagen observadas y las calculadas (Ec. 3-13) por medio de las ecuaciones de la georreferenciación directa (Ec. 3-12) ampliándolas con parámetros adicionales, tal como muestra la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} X_{gps}^i \\ Y_{gps}^i \\ Z_{gps}^i \end{pmatrix}_{ENU} = \begin{pmatrix} X_{cdp}^i \\ Y_{cdp}^i \\ Z_{cdp}^i \end{pmatrix}_{ENU} + R_{imu}_{ENU} \begin{pmatrix} ax \\ ay \\ az \end{pmatrix} - R_{imu}_{ENU} \begin{pmatrix} bx \\ by \\ bz \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} tx \\ ty \\ tz \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} (t_i - t_j) \quad 3-24$$

Para el caso de un giro en el eje “x” fijado, donde el sistema multicámara fotogramétrico GNSS/INS se comporta como un bloque sólido rígido, la Ec. 3-24 se puede escribir como

$$gps_{ENU}^i = cdp_{ENU}^i + R_{imu}_{ENU}(a - b) + t + d \Delta t_i^j \quad 3-25$$

Y para el caso de giro en “x” libre, en el cual el sistema multicámara fotogramétrico GNSS/INS libera el eje x permitiendo que las cámaras puedan rotar alrededor de dicho eje y donde el vector b solo está afectado de una rotación en el eje z, la Ec. 3-24 se puede escribir como,

$$gps_{ENU}^i = cdp_{ENU}^i + R_{imu_{ENU}} a - R(0 \ 0 \ \Psi) imu_{ENU_0} b + t + d \Delta t_i^j$$

Los parámetros que se calibran son:

- $(b_x \ b_y \ b_z)$: vector entre el centro del sistema IMU y el centro de fase de la antena GNSS.
- $(a_x \ a_y \ a_z)$: vector entre el centro del sistema IMU y el centro de proyección de la cámara.
- $(t_x \ t_y \ t_z)$: vector de translación respecto a la trayectoria real.
- $(d_x \ d_y \ d_z)$: vector de deriva, en función del tiempo t.
- $(\delta\Phi \ \delta\theta \ \delta\Psi)$: ángulos de desalineamiento entre los ejes que define la IMU y los ejes de la cámara.
- $(\delta\omega \ \delta\phi \ \delta\chi)$: ángulos de rotación de la cámara sobre la plataforma.

En la Figura 3.9 se muestra el proceso de calibración de los parámetros del sensor multicámara GNSS/INS.

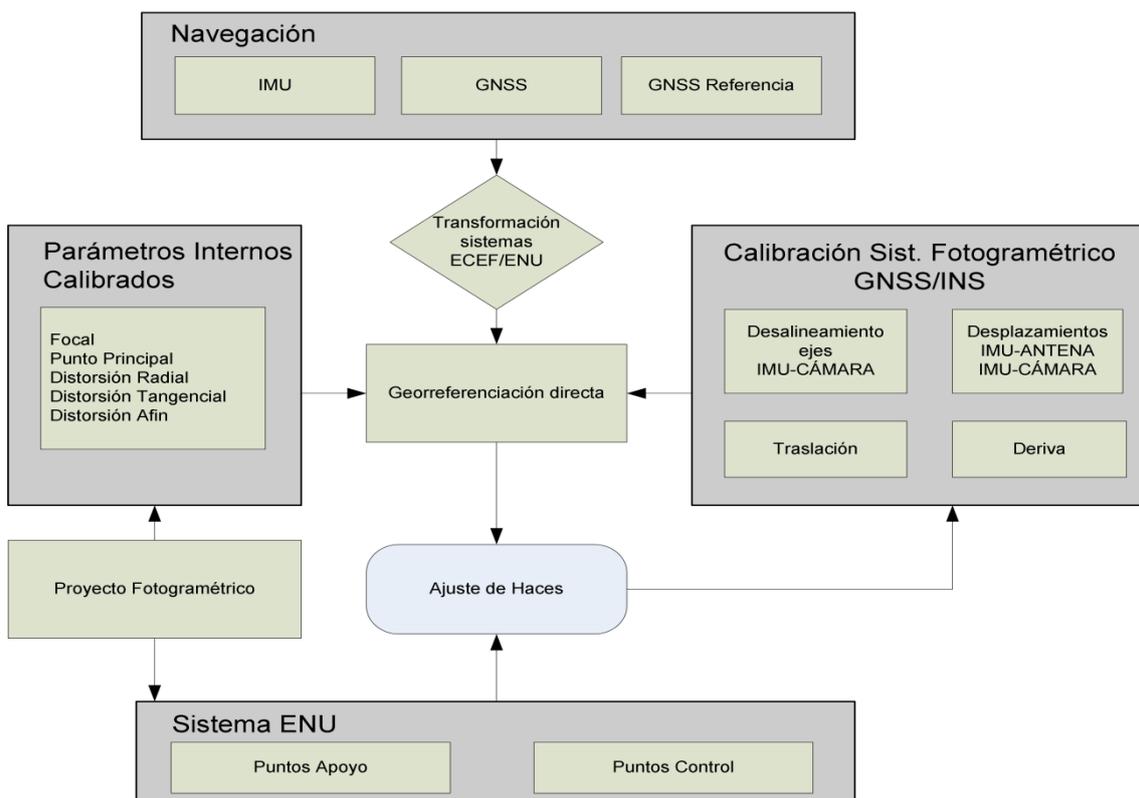


Figura 3.9 Diagrama de ajuste en la calibración del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS

3.8. Restricciones del sistema

Dadas las características del sistema fotogramétrico GNSS/INS, se pueden aplicar diversos tipos de restricciones geométricas como pueden ser de distancia y de convergencia de ejes entre los sensores ópticos. Mediante las restricciones se introduce al sistema de ajustes de haces unos condicionantes geométricos de obligado cumplimiento, en función de un peso. Estos condicionantes obligan al modelo matemático a encontrar una solución mínimo cuadrática que satisface los restricciones añadidos al sistema.

Partiendo de la georreferenciación directa de las imágenes, el sistema con los puntos de apoyo (PA) y de control (PC) medidos, ajustará la orientación externa de las cámaras, de manera que el error que se produzca en la reproyección de los puntos de apoyo sobre las imágenes sea mínima en base a los restricciones considerados de convergencia de ángulos y de base entre centros de proyección (Figura 3.6). Con los puntos de control (PC), que son los puntos geodésico-topográficos que no han intervenido en el cálculo del modelo matemático, se comprueba el residuo que se obtiene sobre las imágenes con los parámetros de orientación externa corregidos.

En la Figura 3.10 se muestra el proceso de las restricciones geométricas durante el ajuste de haces de la georreferenciación directa corrigiendo los parámetros de orientación externa de los sensores ópticos.

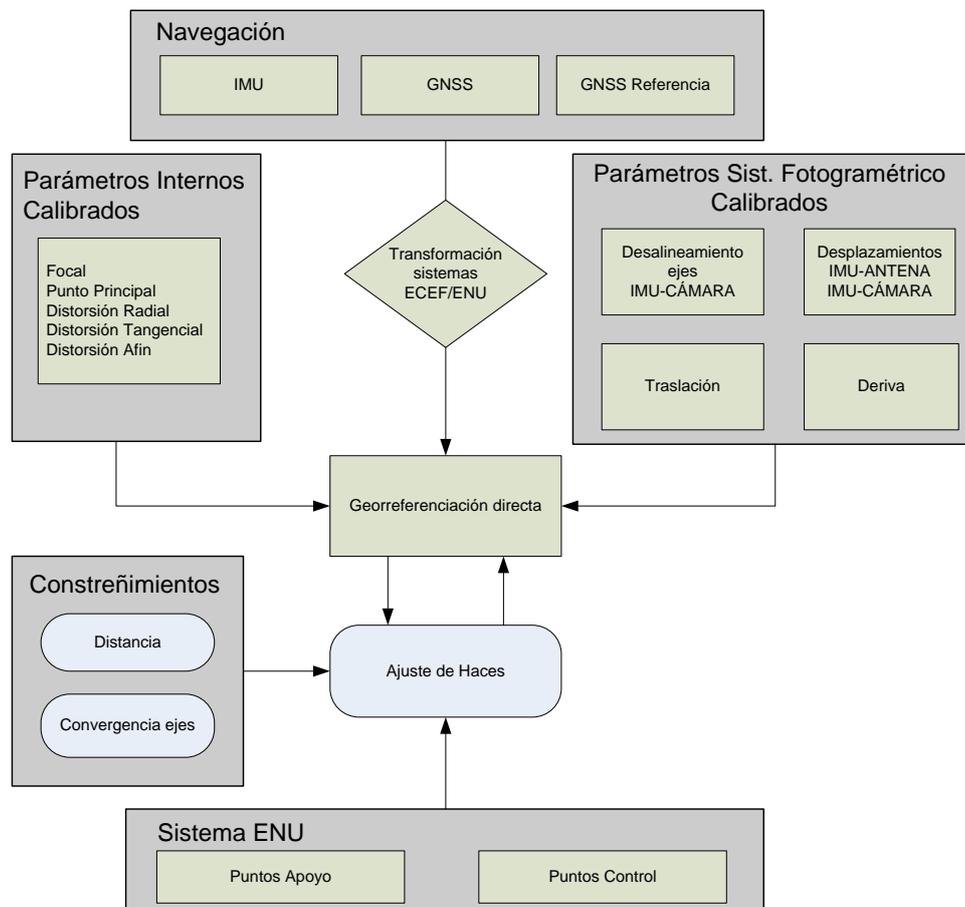


Figura 3.10 Diagrama de ajuste de la GD con restricciones geométricas

3.8.1. Constreñimiento de base

El constreñimiento de distancia fija la longitud entre los centros de proyección de las cámaras (Figura 3.11) en base a un error. De este modo, el ajuste converge a la solución donde los centros de proyección de las cámaras minimizan el residuo cumpliendo que en todos los estacionamientos las cámaras mantienen la misma distancia (Lerma, et al., 2010; Bruce King, 1995).

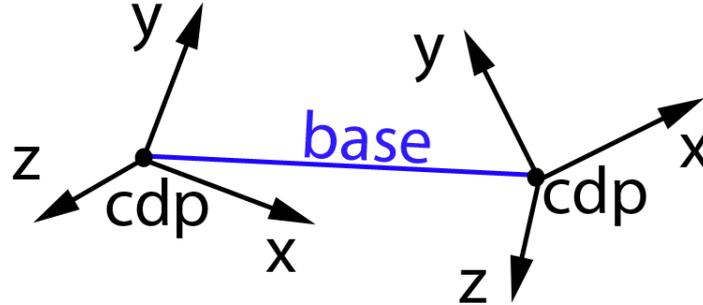


Figura 3.11 Constreñimiento de base

$$Base_{ij} = \sqrt{(X_{cdpi} - X_{cdpj})^2 + (Y_{cdpi} - Y_{cdpj})^2 + (Z_{cdpi} - Z_{cdpj})^2} \pm \sigma \quad 3-27$$

donde $(X_{cdpi}, Y_{cdpi}, Z_{cdpi})$ y $(X_{cdpj}, Y_{cdpj}, Z_{cdpj})$ corresponden a las coordenadas 3D de los centros de proyección de las cámaras.

La Ec. de base introduce en el sistema de ajuste por mínimos cuadrados seis incógnitas, uno por cada coordenada del centro de proyección entre las dos cámaras.

$$\begin{aligned} & \frac{\delta Base_{ij}}{\delta X_{cdpi}} dX_{cdpi} + \frac{\delta Base_{ij}}{\delta Y_{cdpi}} dY_{cdpi} + \frac{\delta Base_{ij}}{\delta Z_{cdpi}} dZ_{cdpi} + \\ & \frac{\delta Base_{ij}}{\delta X_{cdpj}} dX_{cdpj} + \frac{\delta Base_{ij}}{\delta Y_{cdpj}} dY_{cdpj} + \frac{\delta Base_{ij}}{\delta Z_{cdpj}} dZ_{cdpj} \\ & = Base_{ijobs} - Base_{ijcal} \end{aligned} \quad 3-28$$

El peso utilizado para el constreñimiento es proporcional al error en la medida de la distancia observada.

3.8.2. Constreñimiento de convergencia de ejes

Otra condición que debe cumplir el sistema es que las cámaras deben mantener la misma orientación entre ellas. Esta condición se traduce en que la convergencia de ejes de las cámaras debe ser la misma en todas las estaciones, permitiendo introducir en los ajustes, el constreñimiento de convergencia de ejes (Figura 3.12).

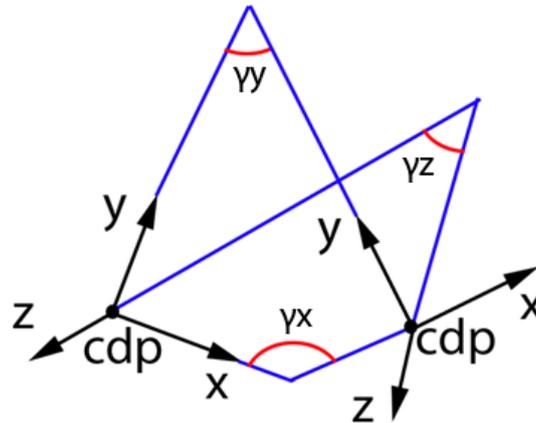


Figura 3.12 Convergencia de ejes

El ángulo entre dos vectores viene dado por la expresión

$$\cos \gamma = \frac{a \cdot b}{|a||b|} = \frac{a_x \cdot b_x + a_y \cdot b_y + a_z \cdot b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \cdot \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} \quad 3-29$$

siendo “a” y “b” los vectores que definen los ejes de cada cámara y “γ” el ángulo de convergencia entre ellos.

Los vectores que describen los ejes de cada cámara con respecto al sistema de coordenadas terreno son las filas de las matrices de rotación: la fila 1 es el eje “x”; la fila 2 el eje “y”; y la fila 3 el eje “z” (Ec. 3-14).

Como los elementos de la rotación corresponden a los cosenos directores, cada vector es unitario, por lo que su módulo es igual a 1, quedando la Ec. de convergencia de ejes:

$$\cos \gamma = a \cdot b = a_x \cdot b_x + a_y \cdot b_y + a_z \cdot b_z \quad 3-30$$

Desarrollando la Ec.3-30 para la convergencia de cada eje y siendo R_1 y R_2 las matrices de rotación (Ec. 3-14) para la cámara uno y dos respectivamente tenemos:

$$\begin{aligned}
 Rx_1 \cdot Rx_2 &= \cos \gamma_x = R_{111} \cdot R_{112} + R_{121} \cdot R_{122} + R_{131} \cdot R_{132} \\
 Ry_1 \cdot Ry_2 &= \cos \gamma_y = R_{211} \cdot R_{212} + R_{221} \cdot R_{222} + R_{231} \cdot R_{232} \\
 Rz_1 \cdot Rz_2 &= \cos \gamma_z = R_{311} \cdot R_{312} + R_{321} \cdot R_{322} + R_{331} \cdot R_{332}
 \end{aligned}
 \tag{3-31}$$

De la Ec. 3-31 obtenemos para cada eje la convergencia de los ángulos, quedando como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \gamma_x &= \cos^{-1}(R_{111} \cdot R_{112} + R_{121} \cdot R_{122} + R_{131} \cdot R_{132}) \\
 \gamma_y &= \cos^{-1}(R_{211} \cdot R_{212} + R_{221} \cdot R_{222} + R_{231} \cdot R_{232}) \\
 \gamma_z &= \cos^{-1}(R_{311} \cdot R_{312} + R_{321} \cdot R_{322} + R_{331} \cdot R_{332})
 \end{aligned}
 \tag{3-32}$$

4. Metodología

4.1. Esquema de trabajo

Partiendo de los parámetros de orientación externa obtenidos por el GNSS/IMU mediante georreferenciación directa, se ajustarán espacialmente y se calibrarán los sensores que integran el sistema multicámara portátil GNSS/INS mediante el ajuste mínimo cuadrático. Posteriormente con los parámetros del sensor fotogramétrico GNSS/INS calibrado, se añadirán al cálculo constreñimientos geométricos de las cámaras, junto con los puntos de apoyo (PA) y los puntos de control (PC), estudiándose los resultados dependiendo del número de puntos de apoyo introducidos al sistema.

Para ello se medirán coordenadas imagen homólogas distribuidas en las zonas de Gruber en todas las imágenes, lo cual nos permitirá obtener una primera calibración de los parámetros de orientación interna y unos parámetros de orientación externa obtenidos por el sistema multicámara portátil GNSS/INS.

Se realizarán estudios de las diferencias de precisión al realizar la calibración del sistema con y sin constreñimientos geométricos.

Se pueden identificar distintas fases de trabajo en orden cronológico:

1. Calibración de cámaras.
2. Resolución del bloque fotogramétrico de las imágenes.
3. Calibración del sistema multicámara portátil GNSS/INS con tal de determinar los descentrados y las desalineaciones.
4. Georreferenciación directa con constreñimientos.
5. Generación de nubes de puntos 3D en color.

El diagrama de trabajo (Figura 4.1) muestra las tareas realizadas y los resultados obtenidos en cada una de ellas. En una primera etapa se calibran las cámaras que se acoplan sobre el sistema multicámara portátil GNSS/INS, obteniéndose los parámetros de orientación interna (parámetros internos). Posteriormente se realiza la navegación del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS sobre el campo de calibración, que está dotado de suficientes puntos de apoyo (PA) y puntos de control (PC). Sobre esta navegación se realiza una nueva calibración de campo del conjunto de cámaras, obteniendo los mejores parámetros internos que se ajustan a la distancia de trabajo. Posteriormente se realiza la determinación de los descentrados y de las desalineaciones del sistema multicámara portátil GNSS/INS, dándonos como resultado los vectores a (IMU-CAM), b (IMU-GNSS), t (translación) y d (deriva) y los giros δ de desalineamiento (Figura 3.6). Con los parámetros del sistema multicámara portátil GNSS/INS calibrados, ya se está en condiciones de realizar la navegación sobre la zona de trabajo. Finalizado éste, se puede realizar otra navegación sobre el campo de calibración con el fin de comprobar la estabilidad de los parámetros calibrados del sistema multicámara portátil GNSS/INS, una vez terminada la navegación en post-proceso se realiza el ajuste de haces de la georreferenciación directa añadiendo los constreñimientos geométricos entre los sensores de captura de datos.

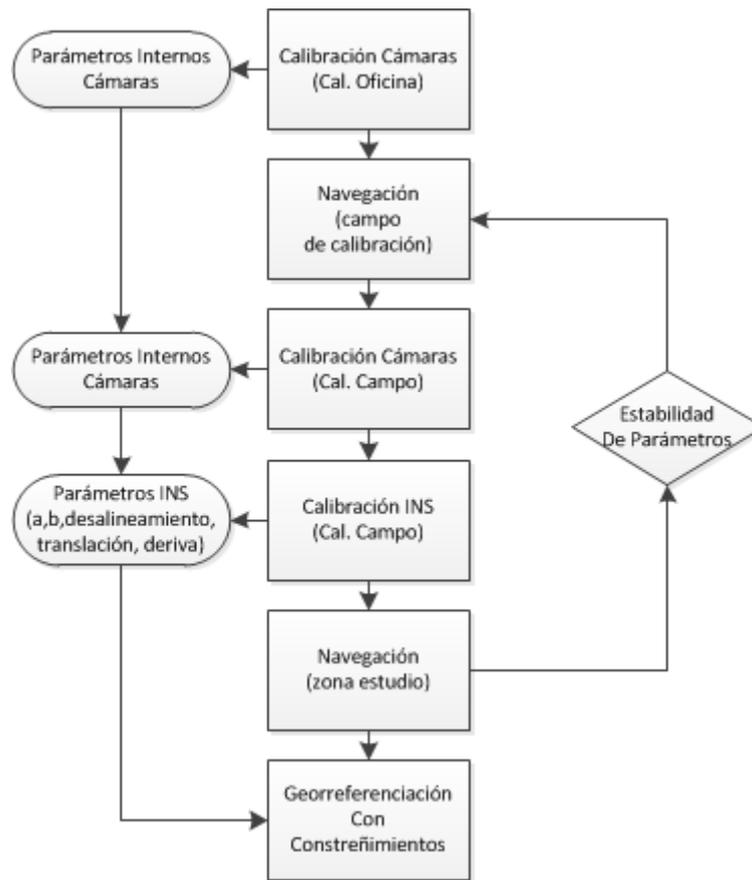


Figura 4.1 Flujo de trabajo

4.2. Proceso

Para realizar la calibración tanto del sistema multicámara portátil GNSS/INS como de los parámetros de orientación interna de las cámaras se debe realizar la planificación del trabajo con anterioridad. Se prestará especial atención a la disposición y al tamaño de las dianas para que los puntos de apoyo y de control se puedan medir con garantías, según las cámaras que se vayan a utilizar y la distancia de trabajo.

Para una correcta calibración del sistema fotogramétrico por medio del método de ajuste de haces de rayos es necesario que los puntos de apoyo queden bien distribuidos por todas las imágenes, que se encuentren a distintos planos y que sean perdurables en el tiempo (inmóviles al menos durante la adquisición de datos). Por esta razón, la pirámide invertida situada en el Campus de Vera de la Universitat Politècnica de València, se considera un campo de calibración exterior bastante apropiado para realizar la experimentación.

Con respecto al diseño de las dianas de los puntos de apoyo y de control, es necesario tener en consideración el tamaño del píxel del sensor de las cámaras que se van a utilizar, y el tamaño de píxel sobre el terreno (Ground Sample Distance, GSD, Tabla 13). Se calcula el GSD con la distancia más desfavorable, que en nuestro campo de calibración será de aproximadamente 20 m.

Tabla 13 GSD de las cámaras

Cámara	GSD
Canon EOS-1Ds Mark III GIFLE 24mm	0.5 cm
Canon EOS-D60 15mm	1 cm

Cámara: Canon EOS-D60 15mm
 Distancia: 20.000 Incremento: 1 Unidades: m
 Focal: 15.52013 mm
 Formato CCD: Ancho: 22.7 Alto: 15.1 mm.
 Formato imagen: Ancho: 3072 Alto: 2048 pix.
 Tamaño de píxel (Ground Sample Distance): Ancho: 0.9522 Alto: 0.9501 Unidades: cm
 Recubrimiento: Ancho: 29.2523 Alto: 19.4586 Unidades: m
 Distancia en terreno: 5 píxeles. Ancho: 4.7611 Alto: 4.7506 Unidades: cm

a

Cámara: Canon EOS-1Ds Mark III GIFLE 24mm
 Distancia: 20.000 Incremento: 1 Unidades: m
 Focal: 24 mm
 Formato CCD: Ancho: 36 Alto: 24 mm.
 Formato imagen: Ancho: 5616 Alto: 3744 pix.
 Tamaño de píxel (Ground Sample Distance): Ancho: 0.5342 Alto: 0.5342 Unidades: cm
 Recubrimiento: Ancho: 30.0000 Alto: 20.0000 Unidades: m
 Distancia en terreno: 10 píxeles. Ancho: 5.3419 Alto: 5.3419 Unidades: cm

b

Figura 4.2 Cálculo GSD a 20 m: a) Canon EOS D60; b) Canon EOS-1Ds Mark III GIFLE 24mm

Para una identificación correcta de las dianas el diámetro de éstas será de 5 cm (Figura 4.3b), que corresponde a 10 píxeles en la cámara Canon EOS-1DsMark III y 5 píxeles para la cámara EOS D60 aproximadamente, con un punto central de 1 cm y margen de 10 cm. (Ec. 4-1)

$$gsd_{mm/pix} = \frac{ccd_{mm} * distancia_{mm}}{focal_{mm} * ccd_{pix}} \quad 4-1$$

En las marcas codificadas el diámetro de la diana es de 4 cm (Figura 4.3a), lo que se traduce en 8 píxeles para la cámara EOS-1Ds Mark III y 4 píxeles para la cámara EOS D60.

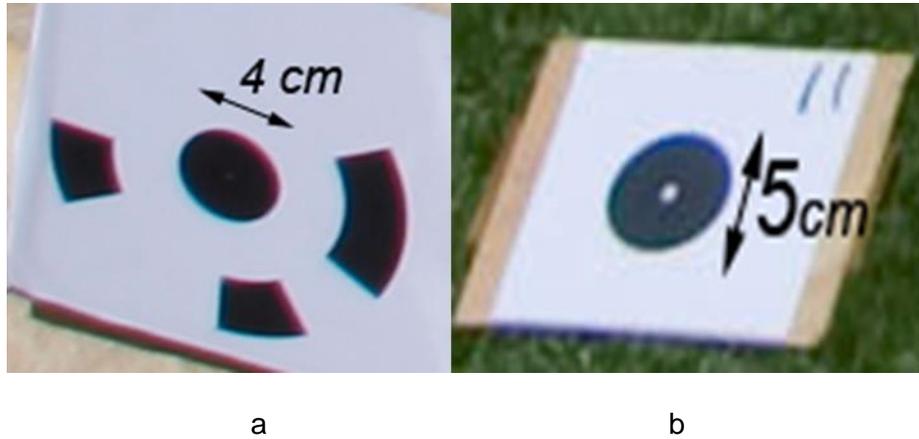


Figura 4.3 Diámetros de las marcas codificadas (a) y de las dianas (b)

Las dianas de los puntos de apoyo y control se han dispuesto de modo que se encuentren distribuidas en distintos planos y cubran la totalidad de la escena, como se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.4 Campo de calibración: pirámide invertida sita en el Campus de Vera

4.3. Sincronización de los sensores

Un aspecto importante de la georreferenciación directa es la sincronización de todos los sensores respecto a un mismo momento temporal. Para ello se necesita un sistema que funcione como unidad de control de tiempo (UCT o TCU), que registre el tiempo de cada uno de los sensores del sistema fotogramétrico. De este modo se tiene una relación temporal entre sensores.



Figura 4.5 UCT

El asincronismo entre el momento de registro del GNSS y el del momento de toma de los distintos sensores es debido a que el GNSS registra los datos en intervalos de tiempo predefinidos a una frecuencia que suele ser de 1 o 2 Hz. Sin embargo la captura de datos de la IMU registra a >200 Hz, y el momento de disparo de las imágenes rara vez coincide con las épocas de captura del GNSS.

En el momento de captura de la información, las coordenadas de la antena del receptor GNSS se interpolan a partir de las coordenadas registradas de la antena en las distintas épocas del GNSS. La interpolación puede ser (Lerma, 2002):

- Lineal, interpolando entre las épocas posterior y anterior.
- No lineal, teniendo en cuenta factores como velocidad del vehículo entre épocas.

Las diferencias entre la interpolación lineal y no lineal suelen estar entre 1 y 5 cm, pero, por aceleraciones o alteraciones en el desplazamiento del vehículo entre las épocas, puede llegar hasta los 17 cm.

Para poder minimizar el error al máximo en la calibración de los parámetros del sistema fotogramétrico, la ventaja que presentan los vehículos INS terrestres frente a los aéreos es que pueden permanecer estacionados en el momento de captura de las imágenes. De esta manera, el tiempo entre las épocas de captura de los distintos sensores se reduce notablemente. Si el tiempo de estacionamiento coincide con el registro del GNSS, no se necesita realizar interpolaciones de la posición de la antena, aumentando la precisión en la determinación del centro de proyección de las cámaras.

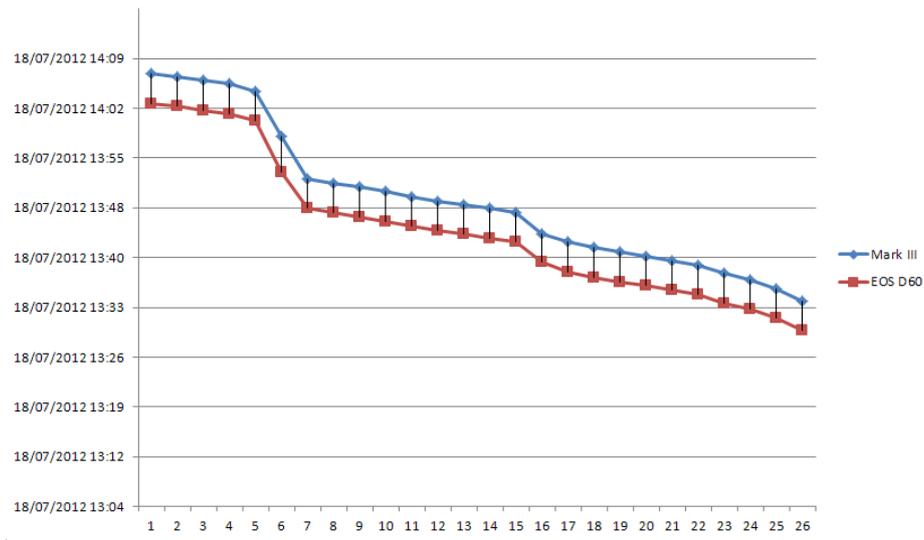


Figura 4.6 Desfase temporal en las tomas de ambas cámaras en distintos estacionamientos

Existe un desfase en los tiempos de disparo entre las dos cámaras que integran el sistema fotogramétrico GNSS/INS portátil que se mantiene constante en distintos estacionamientos (Figura 4.6). Dicho desfase se corrige a partir de los tiempos de registro de la TCU (Figura 4.7).

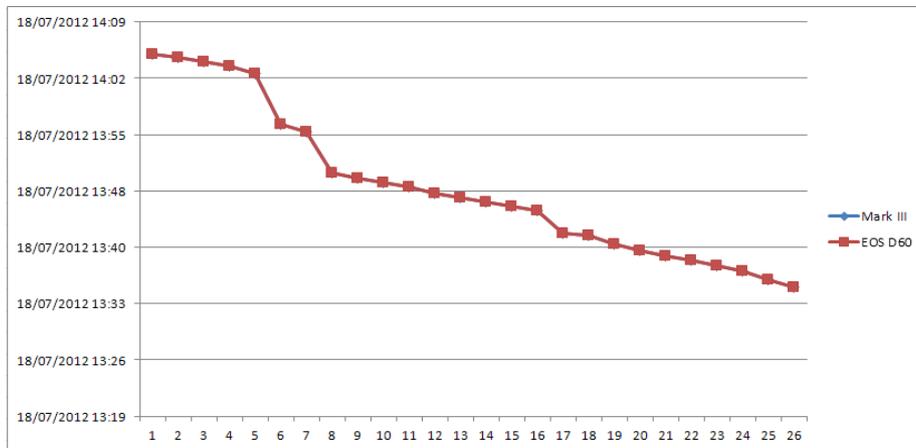


Figura 4.7 Sincronización temporal de ambas cámaras realizada por la TCU

4.4. Generación del registro de la INS

El software realizado (integrado dentro del programa FOTOGIFLE) genera la georreferenciación de las imágenes accediendo por medio del menú: *Datos/Importar/Multisensores* (Figura 4.9), partiendo del registro INS del sistema fotogramétrico multicámara portátil. El registro INS contiene las coordenadas registradas de la antena GNSS, la orientación de la IMU y el tiempo referido al momento de captura de las cámaras.

Para generar un registro INS, se introduce al programa el fichero de capturas de la IMU (Figura 4.8). Este fichero contiene todas las rotaciones registradas por la IMU en el sistema multicámara portátil GNSS/INS durante la navegación. Asimismo, se introduce el fichero de registros de la antena GNSS, en el momento de captura de las cámaras, los descentrados de la antena (X, Y, Z), la diferencia de reloj entre tomas y la diferencia de reloj para interpolar en segundos. A partir de los tiempos en el fichero del GNSS se obtienen los giros del sistema fotogramétrico, realizando un promedio de las rotaciones capturadas de la IMU en dicho instante. También se permite la opción de introducir una posible translación a los datos del GNSS.

Figura 4.8 Formulario de generación del registro GPS/IMU

El formulario relativo a la integración de sensores (Figura 4.9) requiere un fichero de registro INS. Dicho fichero indica si la antena GNSS ha estado solidaria a las rotaciones de la IMU o, por el contrario, se han realizado giros en el eje x del sistema para cambiar las orientaciones de observación de las cámaras. Asimismo, también se introduce la declinación magnética para el día y la zona de trabajo. También se introduce al programa los ficheros que contienen la información relativa a los desalineamientos, descentrados y si la navegación tiene una posible translación o deriva del GNSS. A la derecha del formulario se pueden ver y modificar los parámetros de la transformación absoluta del proyecto, especificando las coordenadas geodésicas

y locales de un punto en el sistema local, el elipsoide de referencia y el huso de la zona.

Integración de sensores

INS Fotos

Archivo INS

Declinación Magnética hhmmss pseudoSex.

hh mm ss -0.59303941290569917

GPS Local GPS solidario al IMU

Fichero: Seleccionar...

Vector IMU->GPS

Fichero: Seleccionar...

Traslación / Deriva GPS

Existe traslación/deriva

Fichero: Seleccionar...

Orientación IMU->CÁMARAS

Umbral de tiempo 1 Minutos

Orientación Fichero: Seleccionar...

Desalineamiento Fichero: Seleccionar...

Transformación UTM Para calibración

Huso 30

Origen del sistema cartesiano local

Longitud -0.20188715

Latitud 39.28469626

Altura elipsoidal 59,209

X 100 Y 100 Z 3

Elipsoide de referencia

Nombre WGRS84

Semieje mayor 6378137.000

Aplanamiento 1/ 298.2572221008827

Aceptar Cancelar

Figura 4.9 Formulario de integración de sensores

4.5. Calibración geométrica de las cámaras

Se pretende obtener los mejores parámetros de calibración geométrica de las cámaras a la distancia de trabajo. Un buen campo de calibración es fundamental en labores de producción fotogramétrica (Honkavaara, y otros, 2006). Sin un campo de calibración apropiado, hay que tener en consideración la distancias y las condiciones ambientales (temperatura) a la que se trabajará con el equipo (Jacobsen & Wegmann, 2001; Wegmann, 2002; Yastikli & Jacobsen, 2005).

Se ha seleccionado y preparado un campo de calibración que cubre la zona de estudio (Figura 4.4), que presenta una configuración geométrica ideal (en cuanto a forma y extensión) y que facilita la calibración geométrica de ambas cámaras durante el proyecto.

Se utilizan las tomas fotográficas del propio sistema multicámara portátil GNSS/INS a la hora de calibrar las cámaras. De este modo, la calibración se realiza a la distancia de trabajo y con las mismas condiciones ambientales en las que se desarrolló la toma de datos permitiendo corregir las aberraciones introducidas por la propia física de las cámaras.

La Tabla 14 muestra los errores de reproyección de los puntos 3D sobre las imágenes con las cámaras sin calibrar: coordenadas del punto principal a cero, la distancia focal la indicada en el objetivo y los parámetros de distorsión a cero. Tras el proceso de calibración geométrica (Tabla 15), los errores de reproyección son inferiores al tamaño del píxel. Los parámetros de orientación interna calibrados de cada cámara aparecen reflejados en el Anejo I d.

Tabla 14 Error de reproyección alcanzado con las cámaras sin calibrar

Cámara	Error Máximo (pix)
Canon EOS 1Ds Mark III	146.76
Canon EOS D60	26.42

Tabla 15 Error de reproyección alcanzado con las cámaras calibradas

Cámara	Error Máximo (pix)
Canon EOS 1Ds Mark III	0.80
Canon EOS D60	0.86

La Figura 4.10, muestra la reproyección de un punto 3D sobre la foto y su distancia a la posición correcta, el vector residuo (en color verde), con las cámaras sin calibrar (izquierda) y una vez calibradas (derecha).

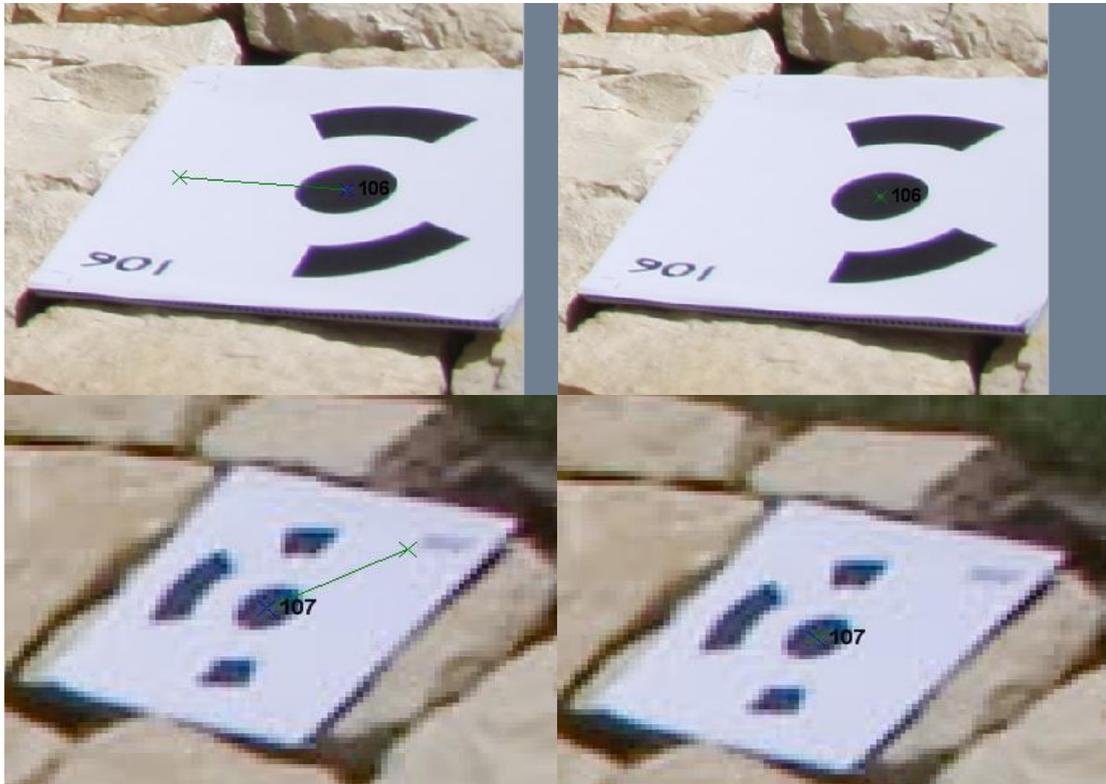


Figura 4.10 Detalle del residuo sin calibrar y calibrado: fila superior, Canon EOS 1Ds Mark III; fila inferior, Canon EOS D60

Otro problema derivado del uso de cámaras no calibradas geoméricamente es que los rayos provenientes de distintas cámaras a un mismo punto tienen un error mayor. Como se observa en la Figura 4.11, el error de intersección de haces de rayos homólogos es muy grande. Una vez calibradas las cámaras, el error en la intersección de haces de rayos homólogos se reduce de manera sustancial (Figura 4.12).

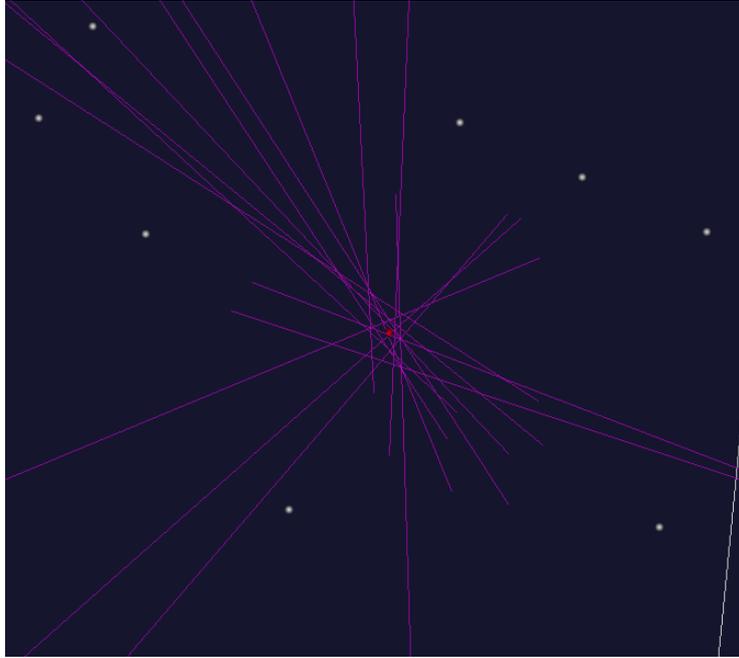


Figura 4.11 Rayos homólogos que se cruzan a la hora de determinar las coordenadas de un punto objeto en cámaras sin calibrar

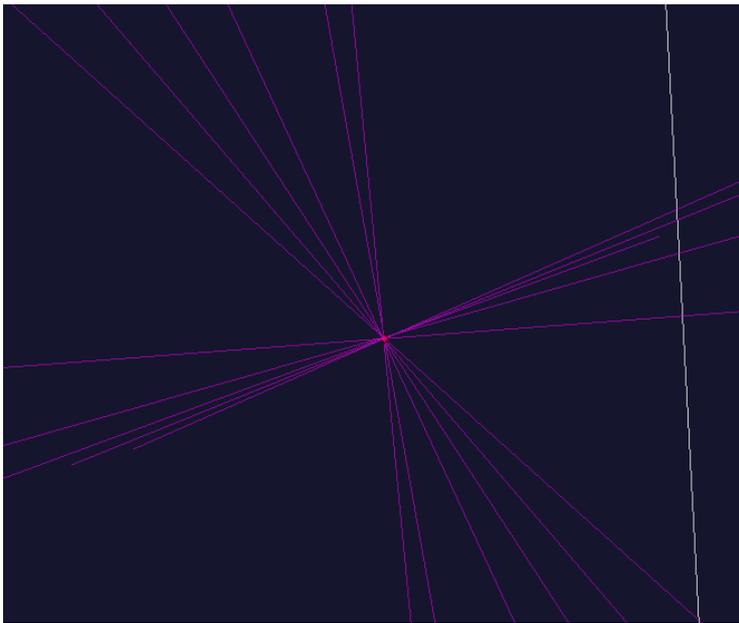


Figura 4.12 Rayos homólogos que se cruzan (cortan) a la hora de determinar las coordenadas de un punto objeto con las cámaras calibradas (mismos datos que Fig. 4.11)

4.6. Importación de constreñimientos geométricos

La introducción de los constreñimientos geométricos al ajuste de mínimos cuadrados se realiza en el programa por medio del formulario de importación de constreñimientos (Figura 4.13). Se pueden introducir tanto constreñimientos en las fotos, como en las cámaras o en los puntos 3D del modelo.

En la importación de las cámaras, las distancias entre centros de proyección y la convergencia de ejes pueden ser introducidas por ficheros separados o cargados directamente de un fichero de orientación externa de un proyecto anterior.

El fichero de convergencia de ejes contiene los identificadores de las fotos constreñidas, las convergencias de los ejes x, y, z, respectivamente y, por último los errores de las convergencias, que permiten la ponderación durante el ajuste.

El fichero de convergencia de distancias contiene los identificadores de las fotos, la distancia entre ellas y el error de la distancia.

También se pueden introducir los constreñimientos tanto por identificador de foto, como por nombre de cámara.

Mediante el formulario (Figura 4.13), además de la importación de los ficheros con los constreñimientos también se le especifica al programa qué tipo de constreñimiento quiere aplicar durante el ajuste de haces de rayos. En la sección de Fotos se puede indicar si quiere el constreñimiento de distancia entre centros de proyección y/o el constreñimiento de convergencia de ángulos especificando que ángulo quiere constreñir. En la sección de Puntos 3D se le indica si quiere utilizar el constreñimiento de distancias entre puntos del modelo introducido mediante fichero.

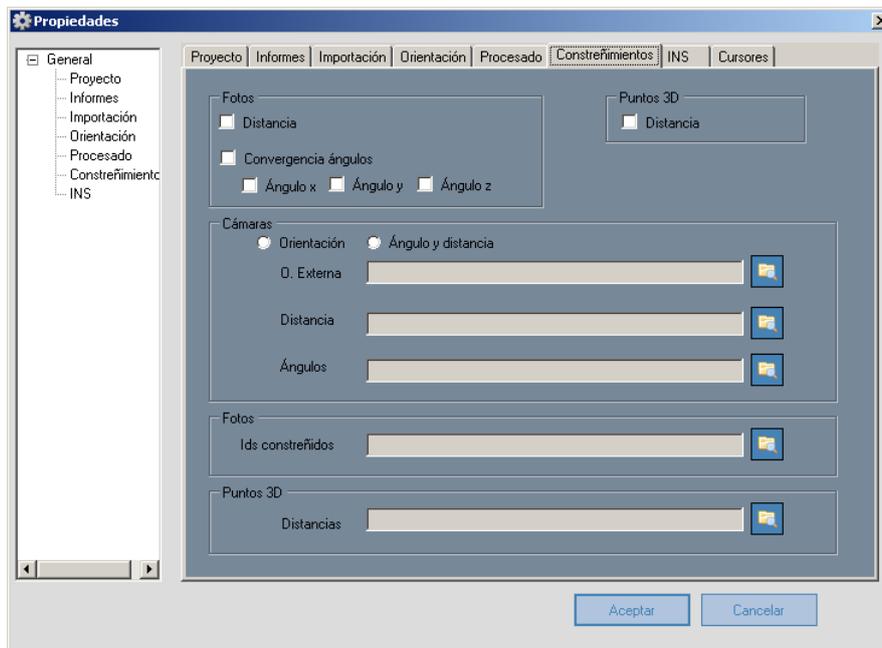


Figura 4.13 Importación de constreñimientos del sistema

4.7. Orientación Absoluta

Dado que el ajuste se resuelve en un sistema ENU_0 , se necesita definir la transformación absoluta que nos pase de un sistema ECEF a un sistema ENU para ello, se define el elipsoide de referencia (por defecto aparecen los parámetros del elipsoide WGS84, Figura 4.15). También se puede elegir el origen de un sistema cartesiano local ENU^G . De esta manera, el programa ya estará en disposición de aceptar los puntos de apoyo en el sistema UTM para realizar la orientación absoluta.

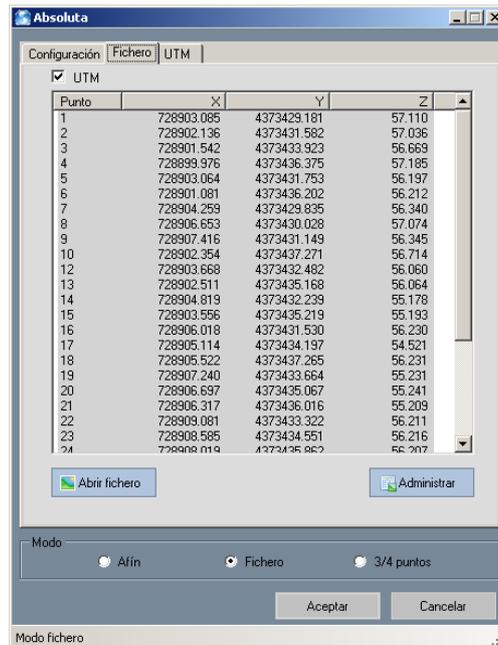


Figura 4.14 Orientación Absoluta

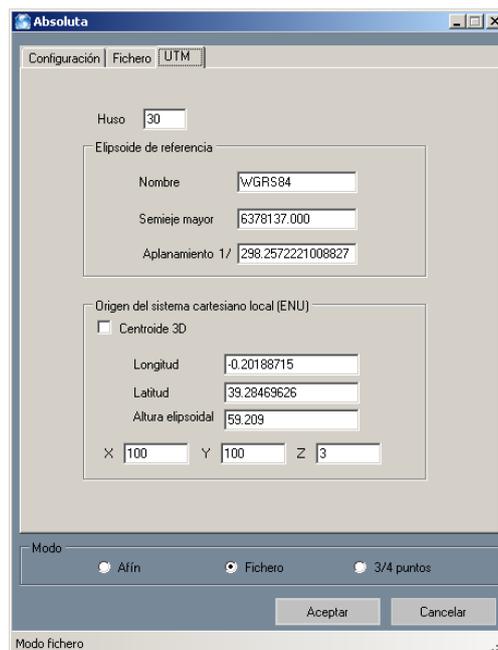


Figura 4.15 Definición del elipsoide de referencia

Los resultados de la transformación entre el sistema Modelo fotogramétrico y el sistema ENU^G de los PA obtenidos por topografía, pueden observarse en la siguiente tabla:

Tabla 16 Parámetros de transformación ENU^G-Modelo

	Traslación X(m)	Traslación Y(m)	Traslación Z(m)	Factor Escala	Giro X(g)	Giro Y(g)	Giro Z(g)
	102.202	135.982	2.519	1.192	66.9568	0.7484	40.8320
+/-	0.001	0.001	0.001	0.000	0.0107	0.0107	0.0078

El error máximo entre los puntos de apoyo observados por topografía y los calculados por fotogrametría es de 8 mm (Figura 4.16); la mediana, 3 mm. Dado que no se tienen las coordenadas terreno de todas las dianas ubicadas en el campo de calibración se utilizarán para las pruebas las dianas obtenidas por fotogrametría transformadas a sistema ENU^G (Anejo I. a).

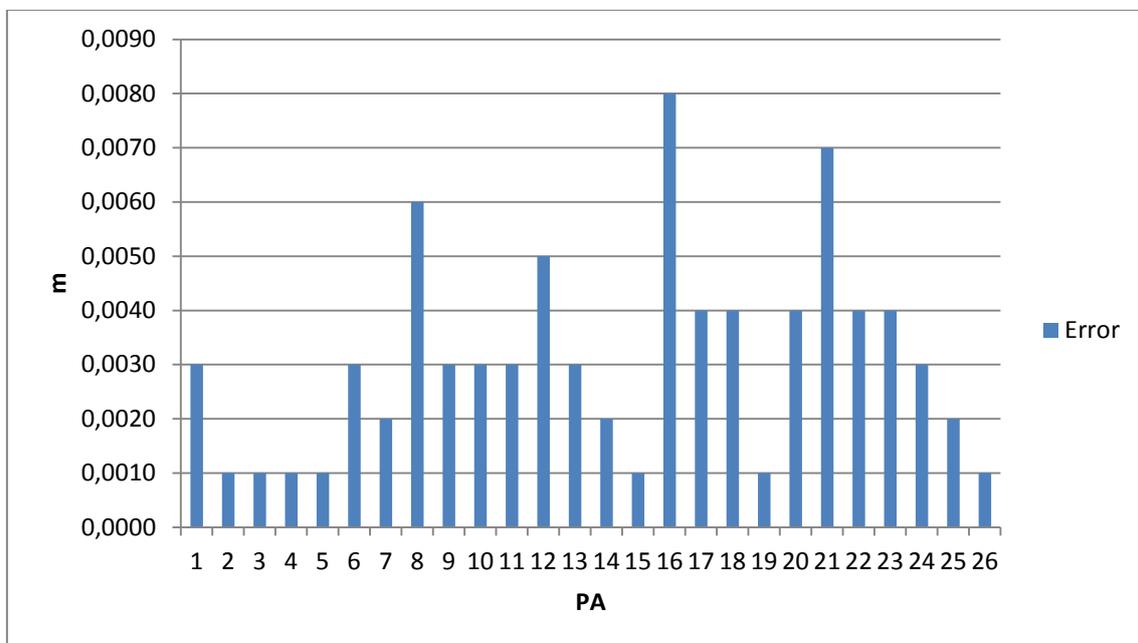


Figura 4.16 Error de transformación de los Puntos de Apoyo

4.8. Calibración del sistema fotogramétrico GNSS/INS

Una vez resuelto el bloque fotogramétrico de las imágenes capturadas por el sistema y definido el elipsoide de referencia, se procede a la calibración de los vectores que relacionan la IMU-GNSS (a, Figura 3.6), la IMU-CAM (b, Figura 3.6), la translación y deriva del GNSS, además de los posibles desalineamientos entre el sistema de la IMU y las cámaras. El ajuste trata de minimizar los residuos entre las coordenadas imagen

observadas y las calculadas, utilizando para ello las ecuaciones de georreferenciación directa (Ec. 3-8).

El cálculo de los parámetros de calibración del sistema fotogramétrico GNSS/INS ha requerido el uso de todos los puntos de apoyo situados sobre el campo de calibración. Estos puntos se calcularon en base al bloque fotogramétrico de las imágenes adquiridas por el sistema fotogramétrico GNSS/INS (Figura 3.9). Se tuvo presente el que hubiera una buena distribución de los puntos y que la geometría del bloque fuera consistente, lo que se traduce en un aumento de la precisión en la obtención de los parámetros y una reducción del error medio en el espacio imagen de las cámaras (Khoshelham, et al., 2007).

El proyecto para la calibración de los parámetros del sistema fotogramétrico GNSS/INS ha sido el mismo que se ha utilizado para el cálculo de los puntos de apoyo. Este proyecto se caracteriza por tener todas las imágenes observando los mismos puntos de la zona de calibración. Esto genera una gran redundancia de rayos, lo que permite una mejor solución del sistema.

calibrados del sistema GNSS/INS (desalineamiento de cámaras, desfase entre cámaras-IMU, desfase GNSS-IMU, la translación y la deriva del GNSS) frente a los 113.2 píxeles de la georreferenciación directa sin los parámetros calibrados (Figura 5.2), lo que supone una mejora del 17% en los resultados. Los parámetros calibrados del sistema fotogramétrico GNSS/INS aparecen reflejados en el Anejo A1.6.

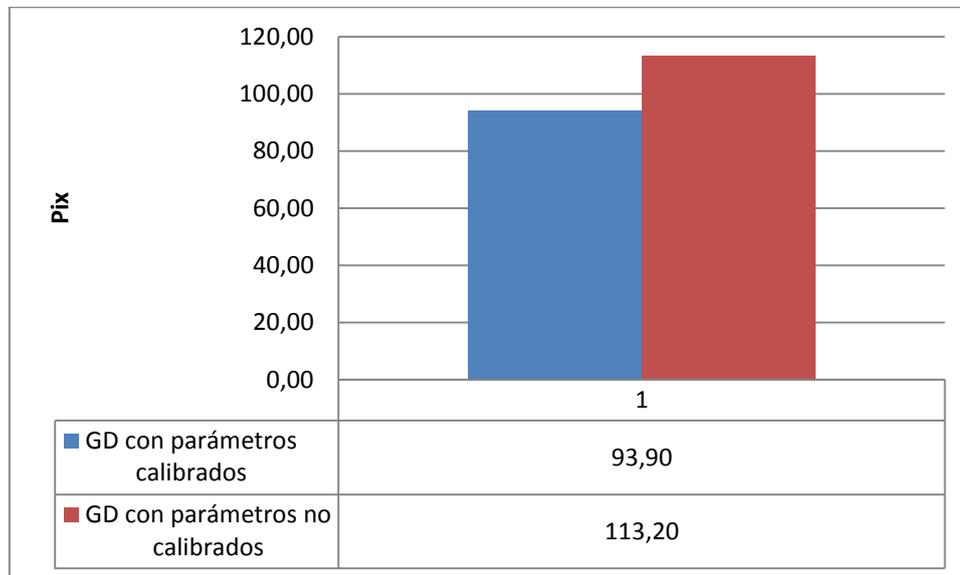


Figura 5.2 Error medio de reproyección de los PA sobre las imágenes con GD con y sin los parámetros de desalineamiento de cámaras, desfase entre cámaras-IMU, desfase GNSS-IMU, la translación y la deriva del GNSS calibrados

Con los parámetros de orientación interna de las cámaras y los parámetros de calibración del sistema fotogramétrico multicámara GNSS/INS se procedió a la realización de un proyecto de georreferenciación directa. Para estudiar el comportamiento que provoca la inclusión de los constreñimientos geométricos sobre el modelo matemático de ajuste de haces combinando dos cámaras digitales SLR convencionales, una de resolución elevada y otra de resolución media-baja y como éstos pueden ayudar a la georreferenciación directa sobre navegaciones con pocos puntos de apoyo y marcas homólogas entre imágenes con mala disposición para la correcta orientación, se procedió a realizar los siguientes pasos:

1. Se resolverá el bloque ligado con las imágenes de la cámara Canon EOS 1Ds Mark III 24 mm.
2. Las imágenes de la cámara Canon EOS D60 15 mm solo están ligadas a la cámara Canon EOS 1Ds Mark III 24 mm que está instalada en el sistema fotogramétrico portátil GNSS/INS en el que se efectúa la captura en el mismo momento de disparo.
3. Las coordenadas medidas sobre las imágenes de la cámara Canon EOS D60 15 mm que se emparejan con Canon EOS 1Ds Mark III 24 mm están mal distribuidas sobre la imagen, creando un mal recubrimiento y con 3 o 4 coordenadas emparejadas únicamente (Figura 5.3). En Fig. 5.3, las imágenes de la derecha pertenecen a la cámara EOS 1Ds Mark III y las imágenes de la

izquierda a la cámara EOS D60. Aquí podemos observar las líneas de correspondencias: en horizontal las que emparejan la Canon EOS D60 y la EOS 1Ds Mark III; y en vertical, las líneas de la derecha corresponden a los Puntos de Apoyo (PA) y a la izquierda a los Puntos de control (PC). Como puede comprobarse, solo tienen 3 o 4 líneas de correspondencias en horizontal.

4. Los puntos de control (PC) solo aparecerán en las fotos de la cámara Canon EOS D60 15 mm.
5. Los puntos de apoyo (PA) solo aparecerán en las fotos de la cámara Canon EOS-1Ds Mark III 24 mm. De esta manera serán estas imágenes las que, a través de los constreñimientos transmitirán la georreferenciación a la cámara Canon EOS D60 15 mm.

Posteriormente se crearán imágenes de formato reducido para una de las cámaras acopladas al sistema fotogramétrico, con un tamaño de imagen de 768 x 512 píxeles. De esta manera, se pretende comprobar si los constreñimientos apoyados en las imágenes de mayor resolución permiten orientar correctamente dichas imágenes.

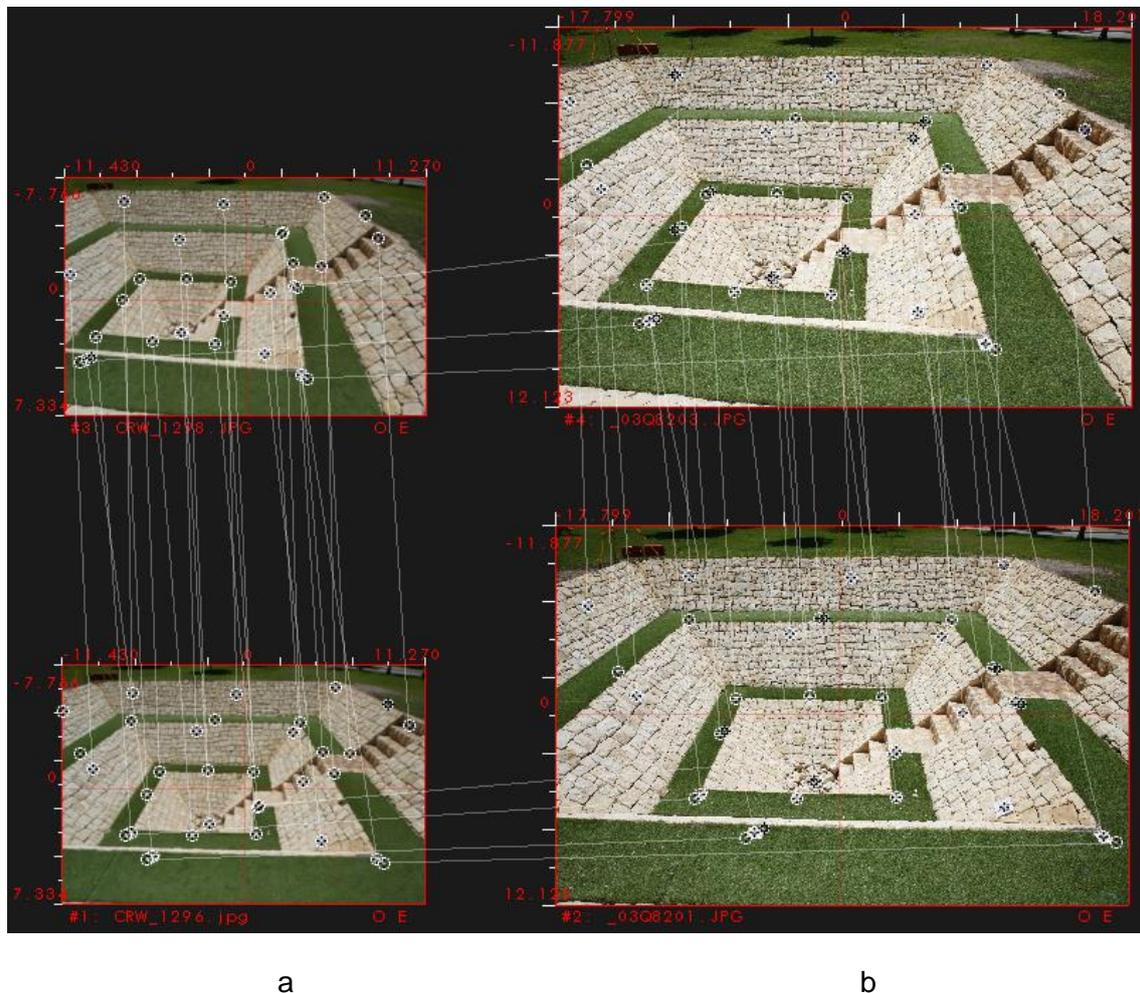


Figura 5.3 Líneas de correspondencia de las dianas, marcadas automáticamente en Orthore©, entre cámaras: a) cámara EOS D60; b) cámara EOS 1Ds Mark III

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la georreferenciación directa utilizando los parámetros internos de los sensores ópticos y los parámetros del sistema fotogramétrico GNSS/INS calibrados.

5.1.1. Georreferenciación directa

Este proceso consiste en obtener los parámetros de orientación externa de las cámaras a partir de los datos capturados por los sensores GNSS e IMU. Se compararán los puntos de control (PC) obtenidos por intersección de haces con los obtenidos en el bloque fotogramétrico (Anejo AI.3).

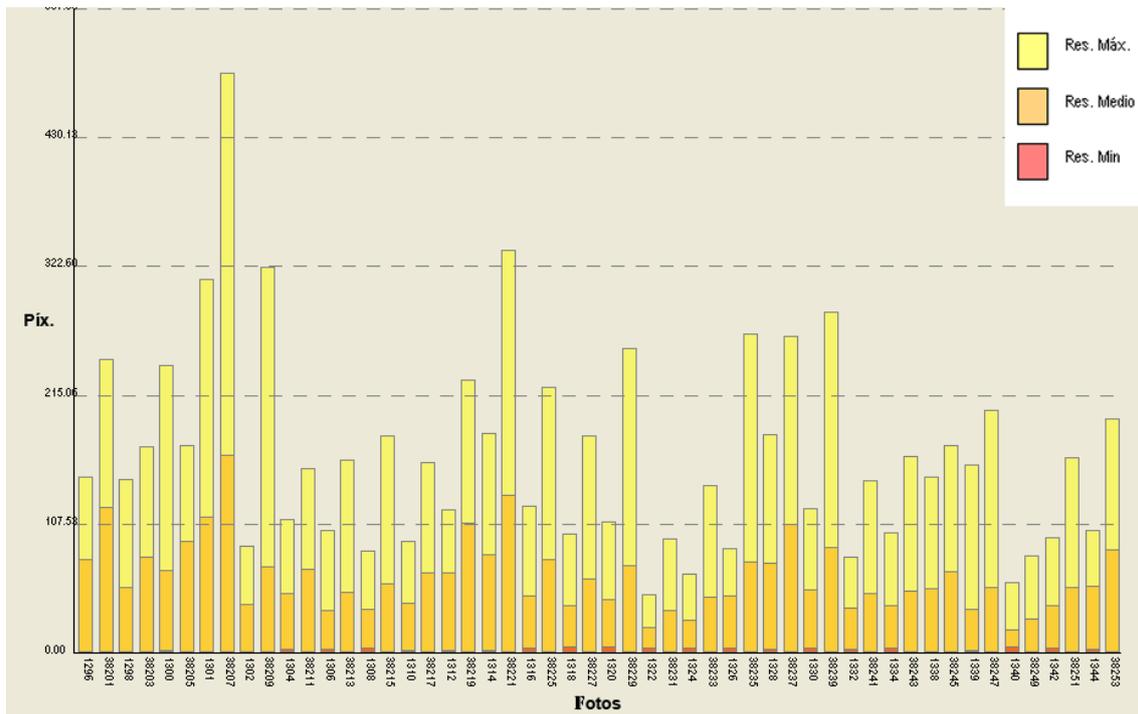


Figura 5.4 Residuos píxel de la georreferenciación directa

Los resultados alcanzados tras aplicar la georreferenciación directa sobre el proyecto nos da un residuo máximo en la foto 38207 de 483.89 píxeles situándose la media en 69.81 píxeles (Figura 5.4).

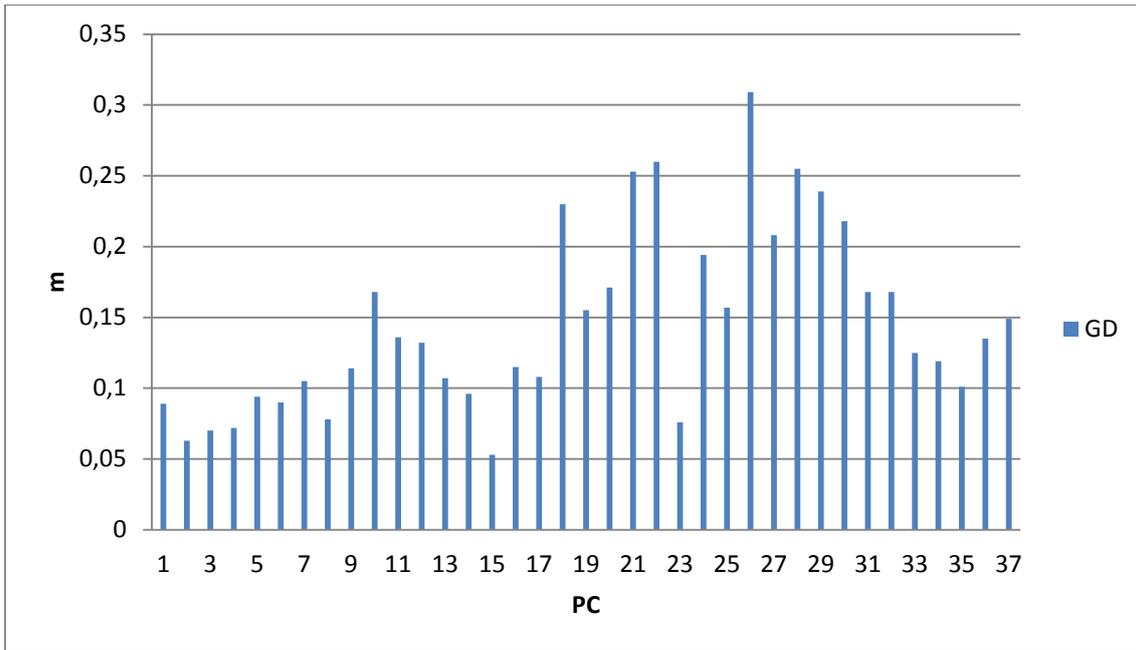


Figura 5.5 Diferencias entre los PC observados y calculados por GD

Las diferencias de las coordenadas terreno entre los PC observados y los calculados por intersección de rayos sitúa la media en 14 cm con un máximo en 0.31 m. En la Tabla 17 podemos observar los errores de intersección por GD obtenidos. En la Figura 5.6 vemos como el módulo del error de intersección de haces sitúa la mayor parte de puntos entre 0.05 y 0.2 m llegando hasta los 0.35 m.

Tabla 17 Errores de intersección en GD

	e_x (m)	e_y (m)	e_z (m)
Mediana	0.050	0.050	0.060
Media	0.055	0.064	0.063
Máximo	0.232	0.927	0.366

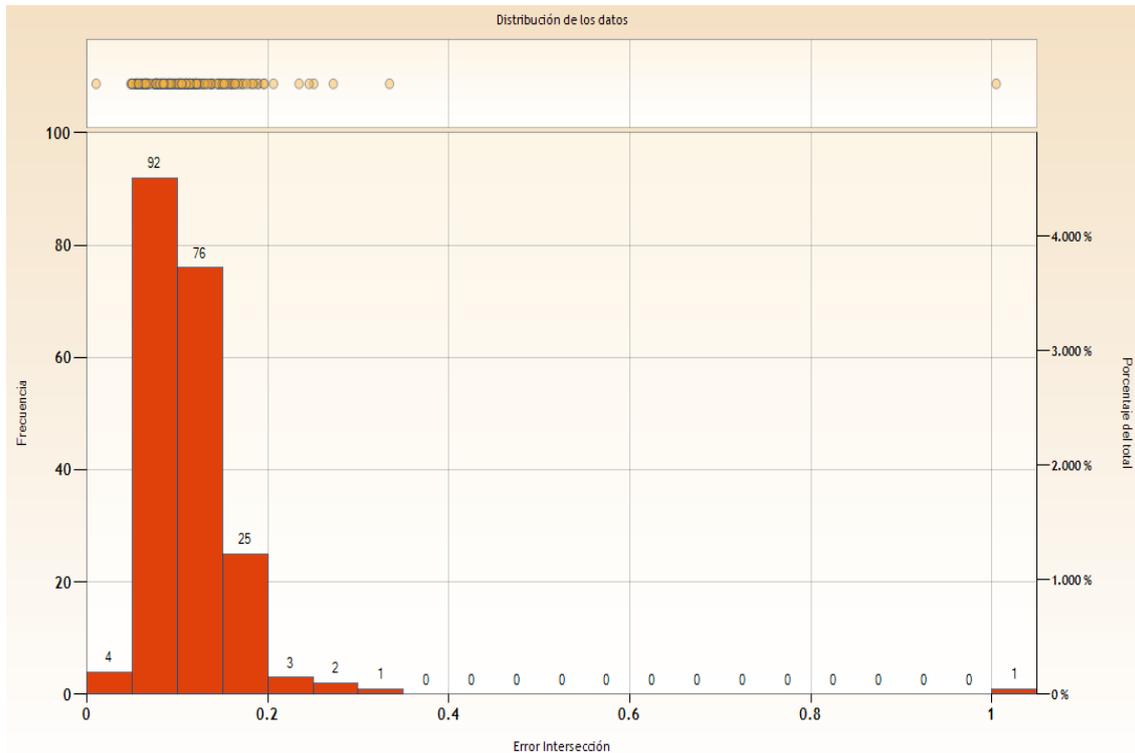


Figura 5.6 Histograma de error en la intersección espacial de los puntos medidos tras la GD (m)

5.1.2. Georreferenciación directa con ajuste de haces (Georreferenciación mixta)

Realizando un ajuste de haces (AH) en bloque de todas las fotos orientadas por georreferenciación directa se consigue minimizar los residuos del modelo matemático. De este modo se corrigen las orientaciones en cada estacionamiento de las cámaras, obteniendo los giros que mejor ajustan en el proceso de ajuste de haces. Con este doble método, se rebaja el residual máximo de 483.89 píxeles a 47.99 píxeles, y que el error máximo de intersección espacial esté por debajo de 5 cm (Figura 5.9) frente a los 50 cm que se obtienen en la georreferenciación directa sin AH (Figura 5.6). Aun estando las cámaras georreferenciadas, al no disponer el ajuste de puntos de apoyo (PA), el modelo no está colocado en su situación correcta, obteniendo una diferencia máxima de error entre los PC observados y los calculados de 54 cm (Figura 5.7). El error obtenido era el esperable ya que se está realizando un AH con imágenes con un mal recubrimiento y posición de las marcas sobre las imágenes con mala geometría (Figura 5.3).

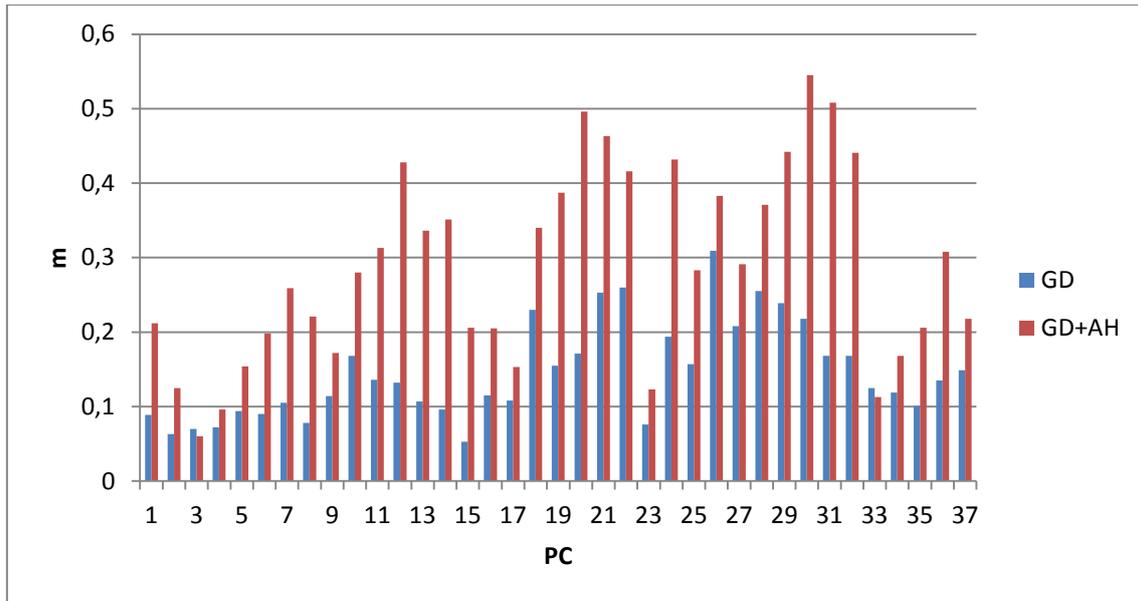


Figura 5.7 Diferencias en el proceso de intersección espacial respecto a los PC, utilizando dos soluciones: georreferenciación directa (GD); georreferenciación directa más ajuste de haces (GD+AH)

Como se puede ver en la gráfica de residuos píxel (Figura 5.8) las fotos pertenecientes a la cámara Canon EOS 1Ds Mark III 24 mm, al estar ligadas en bloque, el residuo en ellas ha bajado hasta un valor máximo de 1.11 píxeles. Por el contrario, el residuo de las imágenes de la cámara Canon EOS D60 15 mm no es inferior de 8 píxeles de error, llegando en algunos casos a los 47.99 píxeles, al tener mal recubrimiento respecto a su cámara pareja montada sobre el sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS.

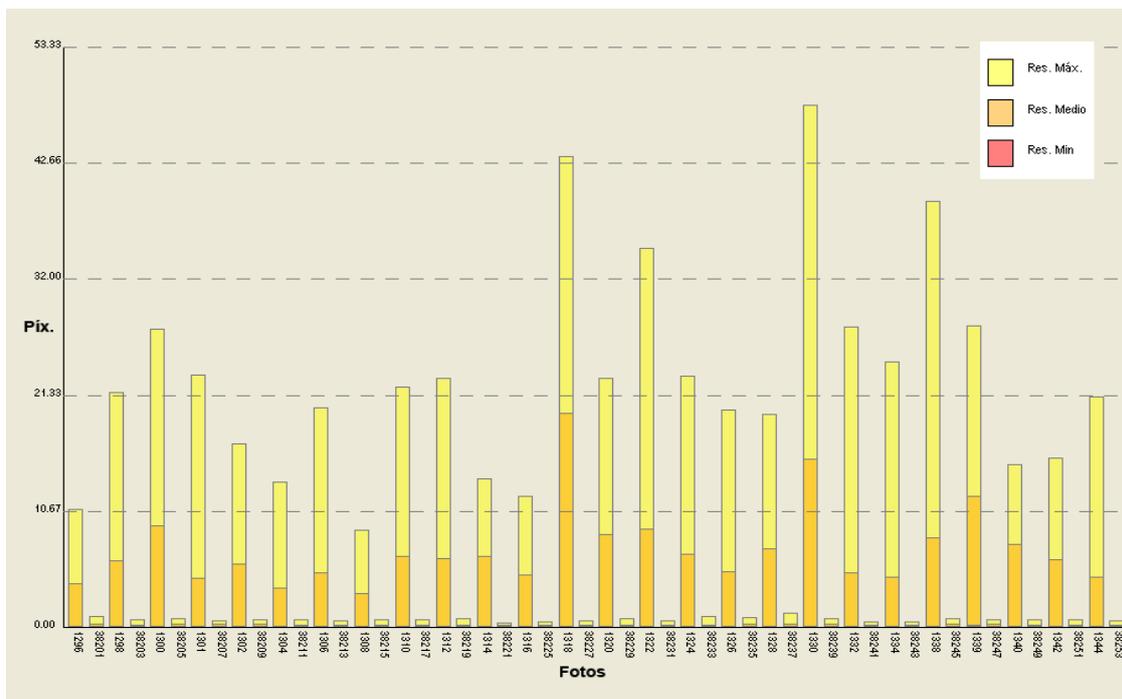


Figura 5.8 Residuos píxel de la georreferenciación directa con ajuste de haces (GD+AH)

También comprobamos, comparando la Figura 5.6 y Figura 5.9, que la aplicación de un ajuste de haces a la georreferenciación directa provoca que los errores en la intersección de haces de los puntos disminuyan. Vemos como la gran cantidad de puntos tiene un error de intersección por debajo de 1 cm (Tabla 18) frente a los 35 cm iniciales.

Tabla 18 Error intersección GD con ajuste de haces

	e_x (m)	e_y (m)	e_z (m)
Mediana	0.000	0.000	0.000
Media	0.002	0.002	0.002
Máximo	0.036	0.033	0.017

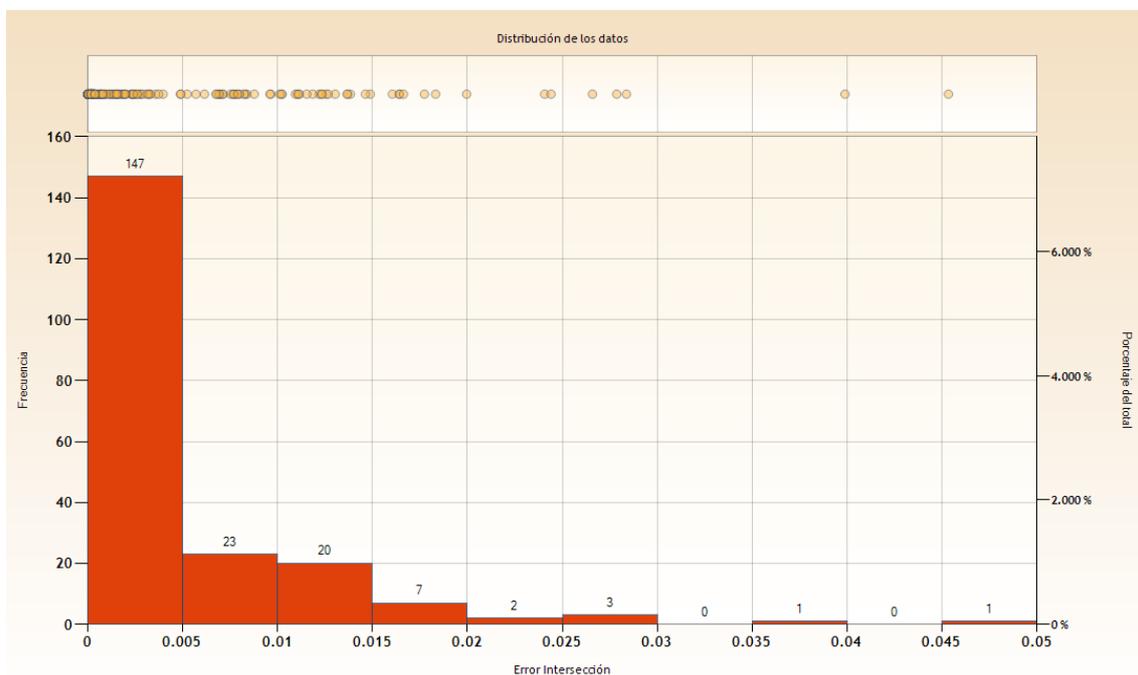


Figura 5.9 Error de intersección de la georreferenciación directa con ajuste de haces (GD+AH)

5.1.3. Estudio del comportamiento de ajuste de haces con y sin restricciones

Este apartado estudia la influencia del número de puntos de apoyo (PA) sobre el sistema de ajuste de haces con y sin los restricciones geométricas, introduciendo paulatinamente los PA 101, 10, 16 y 14. La distribución de los PA y PC se puede observar en el croquis de la Figura 5.10.

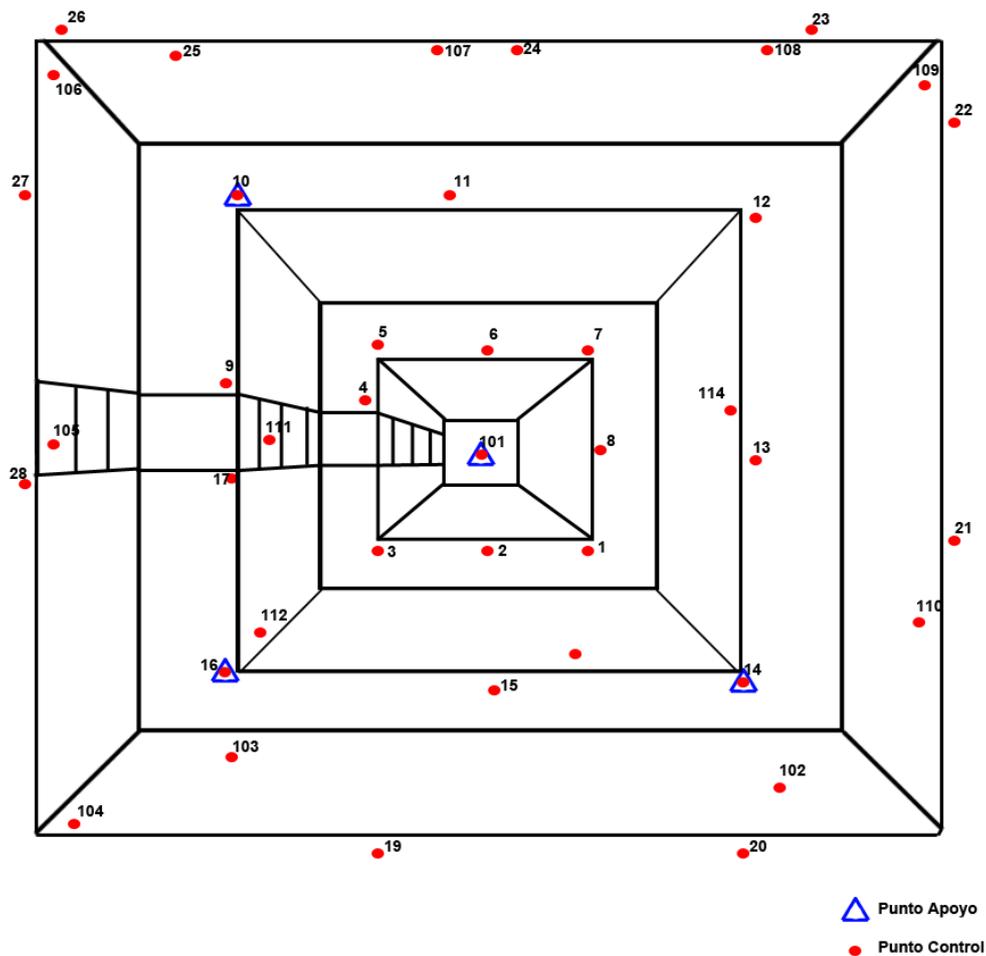


Figura 5.10 Croquis de la distribución de los PC y PA

Los restricciones geométricas se han obtenido de la media de los valores obtenidos del proyecto fotogramétrico (Anejo I. c). En las siguientes figuras podemos ver las desviaciones que tenemos de cada estacionamiento en la convergencia de ejes en x (Figura 5.11), y (Figura 5.12) y z (Figura 5.13) respecto al valor medio que se tomará como la convergencia restringida.

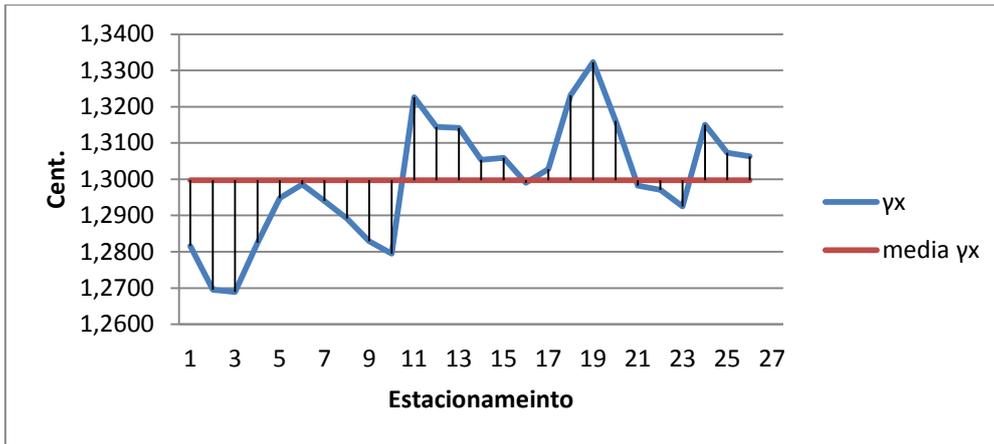


Figura 5.11 Desviaciones respecto a la media de convergencia de ejes X

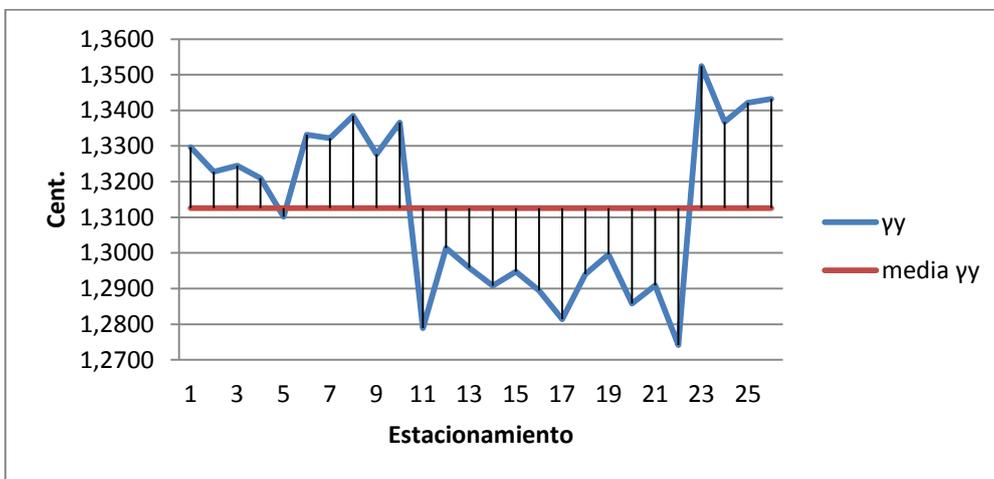


Figura 5.12 Desviaciones respecto a la media de convergencia de ejes Y

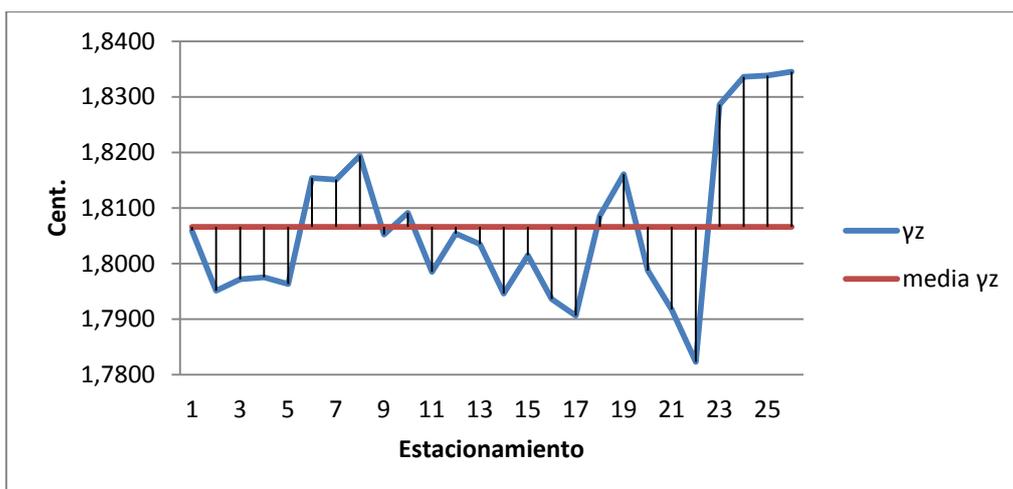


Figura 5.13 Desviaciones respecto a la media de convergencia de ejes Z

En la Figura 5.14 vemos las distancias en cada estacionamiento entre los sensores ópticos y la media que definirá el constreñimiento.

Orientación espacial de múltiples sensores integrados con restricciones geométricas

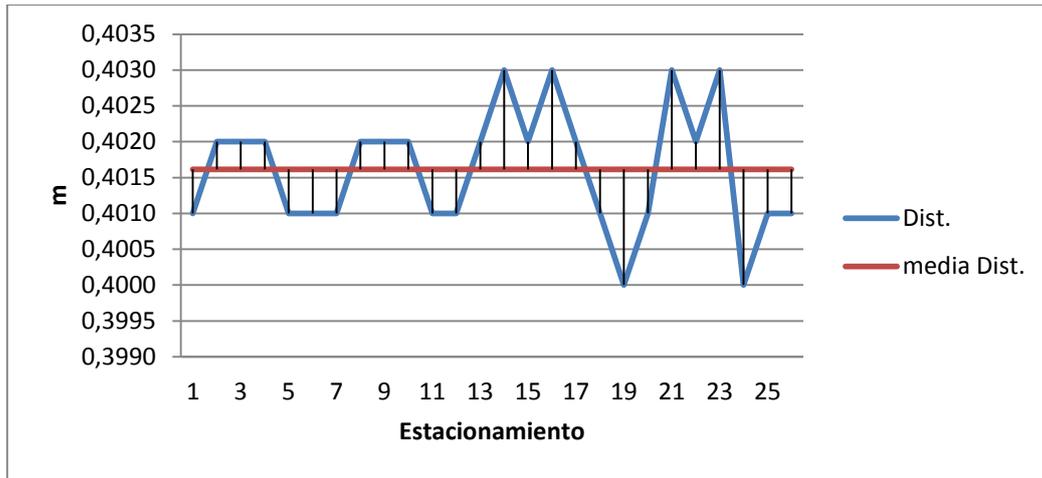


Figura 5.14 Desviaciones de las distancias respecto a la media

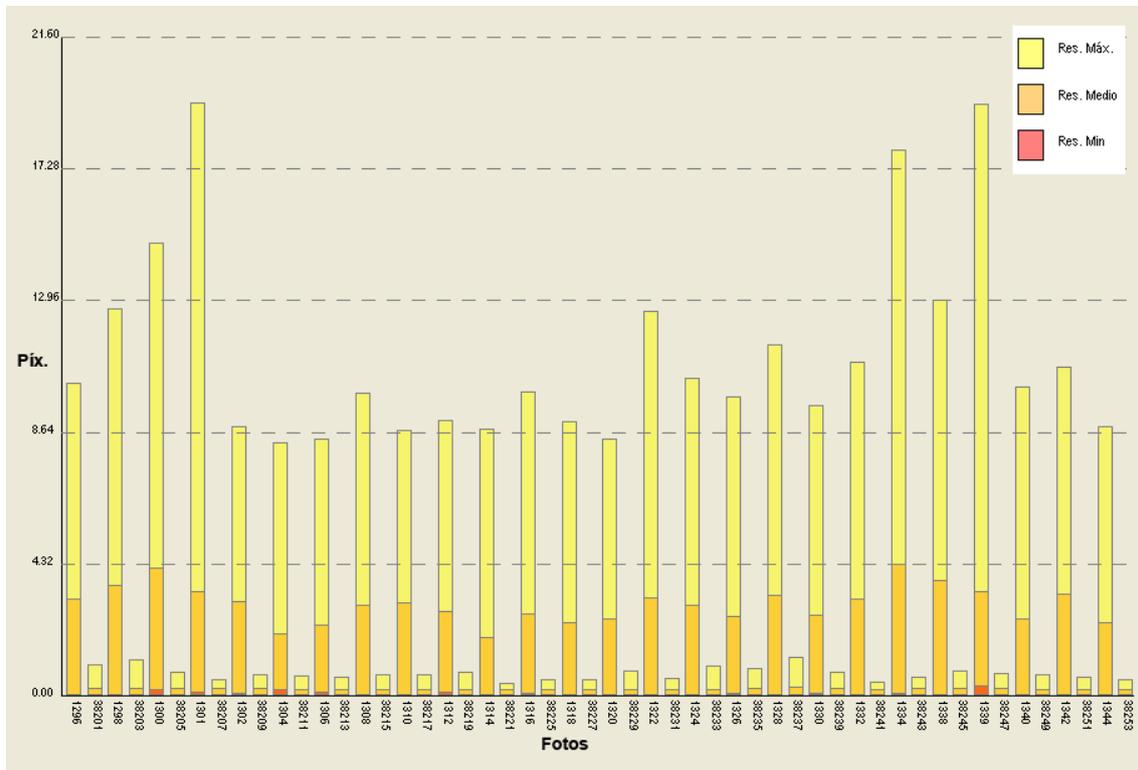


Figura 5.15 Residuos píxel de la georreferenciación mixta más restricciones (GD + AH + Const)

Con la inclusión de restricciones de distancia y de ángulo en el ajuste de haces, el residuo máximo del sistema baja a 18.22 píx. (Figura 5.15) frente a los 47.99 píx. (Figura 5.8) que se obtiene aplicando solo georreferenciación mixta.

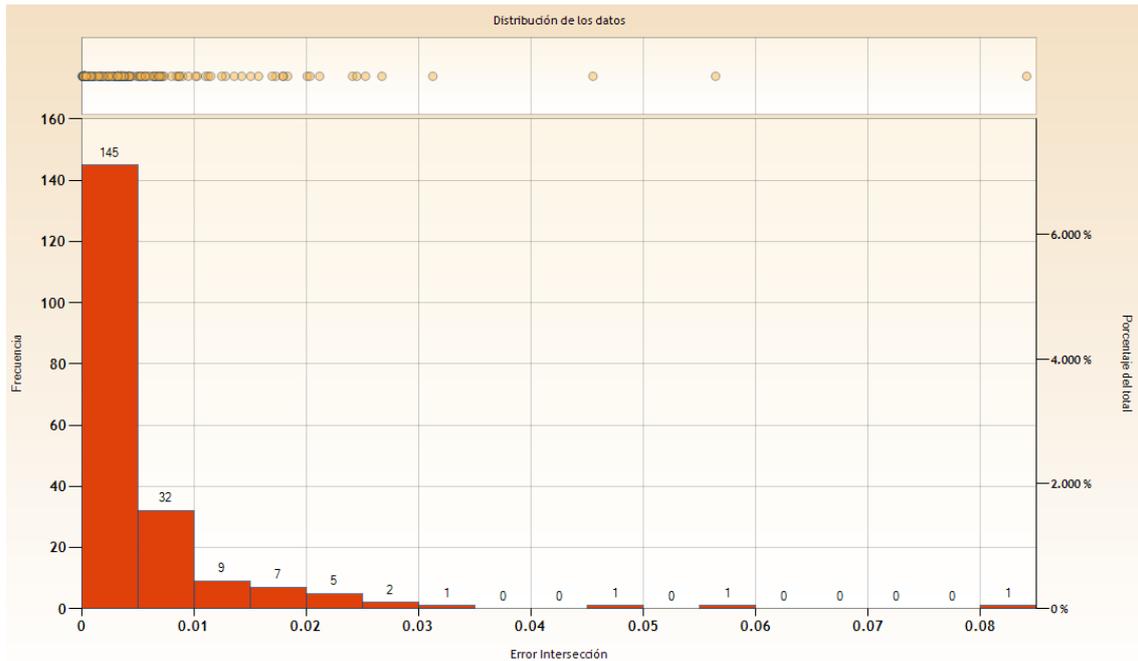


Figura 5.16 Error de intersección de la georreferenciación mixta con restricciones (GD+AH+Const)

Se puede ver una mejora en el modelo digital generado por la GM y restricciones geométricas (CG), donde los puntos 3D generados por el ajuste sin los condicionantes geométricos generan puntos dispersos de su posición correcta (Figura 5.17). Este resultado se obtiene, debido a que los PA y los PC pertenecen a la misma diana medida, con la salvedad que las coordenadas de los PA se obtienen de la cámara Canon EOS 1Ds Mark III y los PC de la cámara Canon EOS D60.

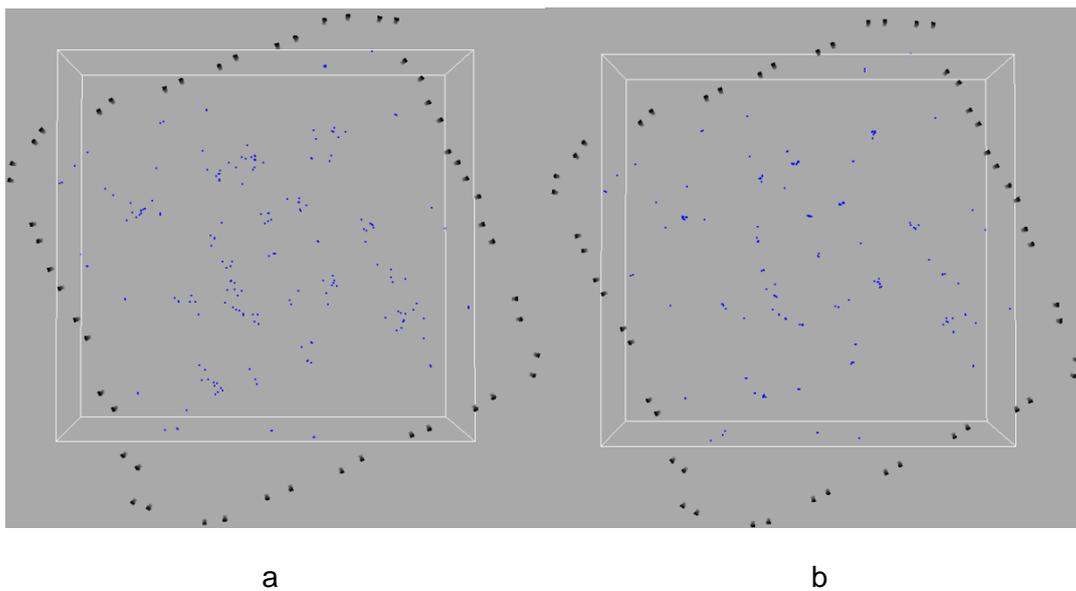


Figura 5.17 Vista 3D de los PA y PC: a) sin AH; b) con AH

En la Figura 5.18 se observa cómo el promedio del error de intersección de los puntos calculados se sitúa por debajo del centímetro, frente a los 5 cm de promedio y 35 cm de máximo que se obtiene en la GD sin ajustes de haces (Figura 5.6).

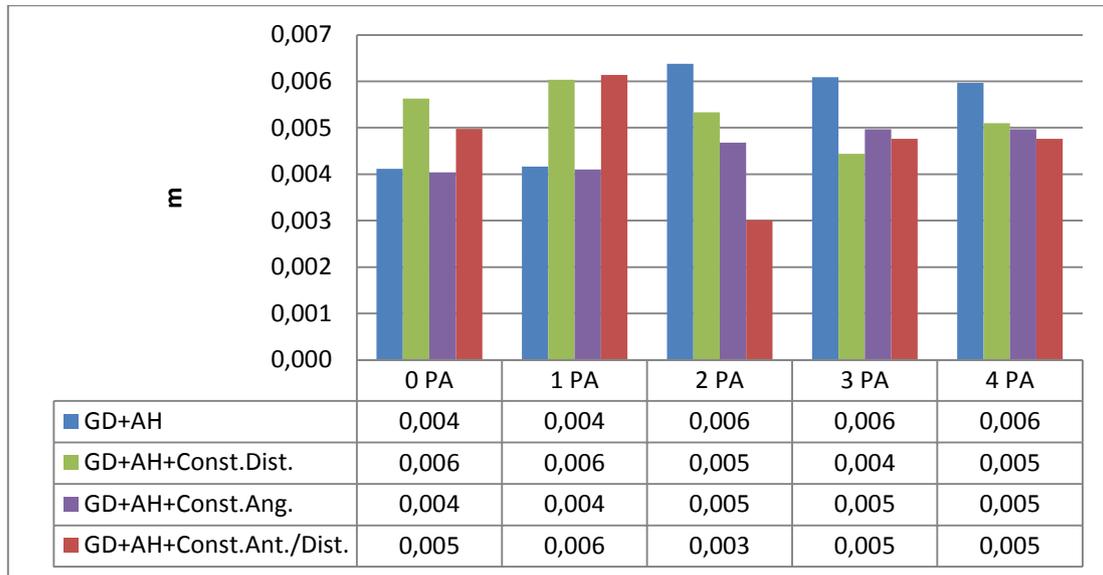


Figura 5.18 Promedio del error de intersección de los puntos medidos en las imágenes

La Figura 5.19 muestra las diferencias entre los puntos de control según el número de puntos de apoyo introducidos al ajuste y el tipo de constreñimiento aplicado. Se observa como la GD sin puntos de apoyo obtiene una media de 29 cm de error, y como éste descende aplicando constreñimientos e introduciendo puntos de apoyo al sistema; llegando a precisiones centimétricas cuando se aplica la GM (GD + AH) o solo uno de los constreñimientos; y por debajo del centímetro, cuando se aplican ambos constreñimientos geométricos.

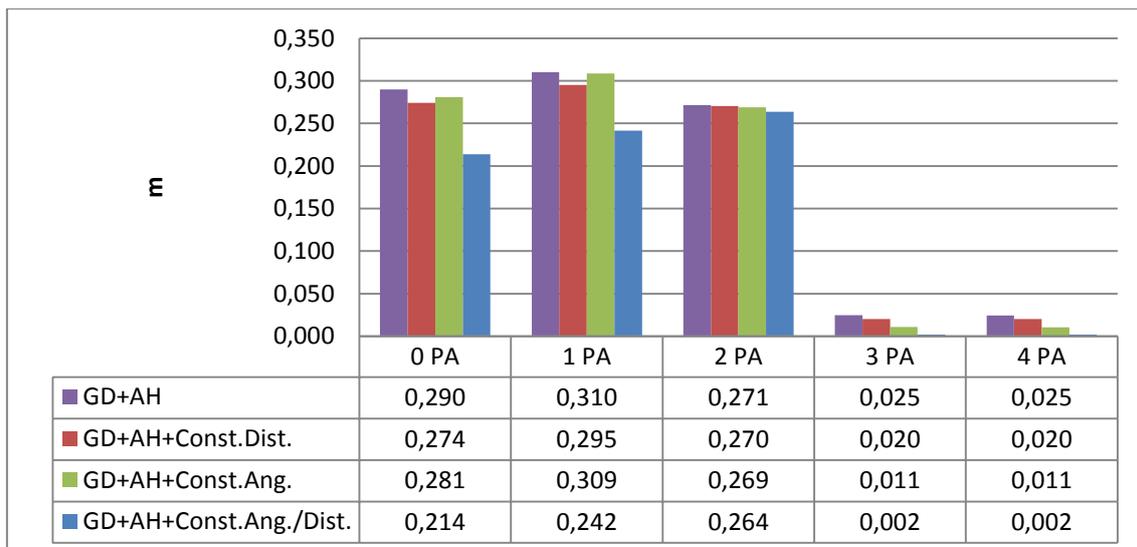


Figura 5.19 Comparación de diferencias con PC entre constreñimientos aplicados.

Este aumento de precisión en la determinación de la orientación de los sensores ópticos se traduce en una reducción de los residuos píxel. Podemos ver en la Figura 5.20 como con 0 puntos de apoyo con constreñimientos se consigue un residuo medio de 1.6 píxeles frente a los 3.69 píxeles de la solución sin constreñimientos geométricos. Se observa también que la combinación de aplicar los constreñimientos de distancia y convergencia de ángulos entre los sensores, proporciona una mejor solución que aplicados individualmente.

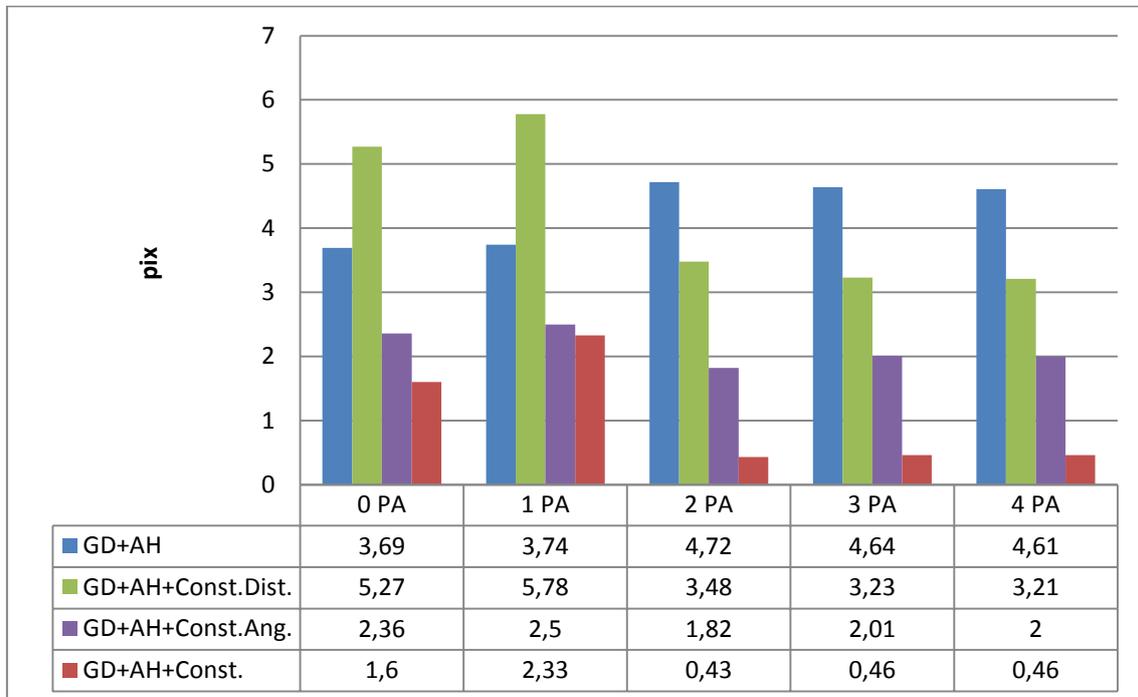


Figura 5.20 Residuos píxel medios de los ajustes realizados

Las siguientes figuras (Figura 5.21, Figura 5.22) muestran cómo afectan los constreñimientos geométricos en la determinación de la orientación de las fotos de la cámara Canon EOS D60. Podemos comprobar cómo el error en la determinación de los parámetros sin constreñimientos oscila entre 0.01° - 0.25° , situándolo cuando se trata de la solución con constreñimientos entre 0.001° - 0.003° . El error máximo de la toma 24 corresponde con una imagen donde se marcaron 3 marcas homólogas y próximas entre sí, lo que provoca un gran error en la determinación de los parámetros.

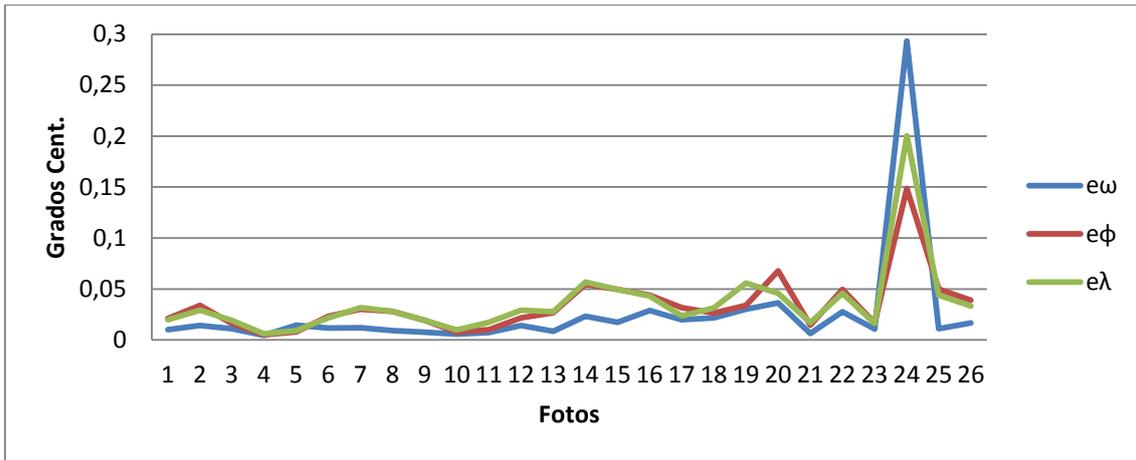


Figura 5.21 Desviación típica de la orientación angular GM

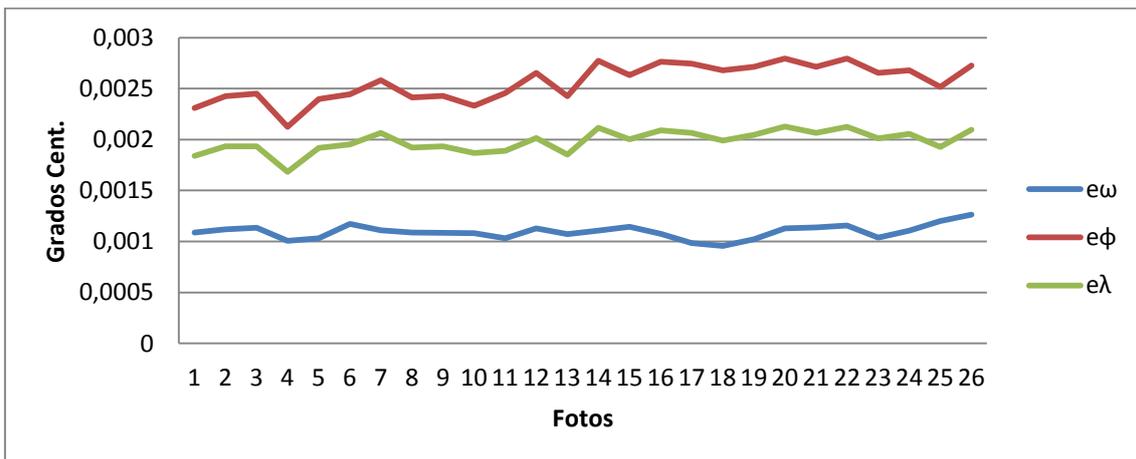


Figura 5.22 Desviación típica de la orientación angular GM + Const.

Al igual que ocurre en la determinación de los ángulos de rotación de los sensores ópticos, la utilización del constreñimiento de distancia entre cámaras mejora sustancialmente la determinación del centro de proyección, obteniendo un error máximo de 2 cm para el caso sin constreñimiento (Figura 5.23) y situándose por debajo de 3 mm con constreñimiento (Figura 5.24).

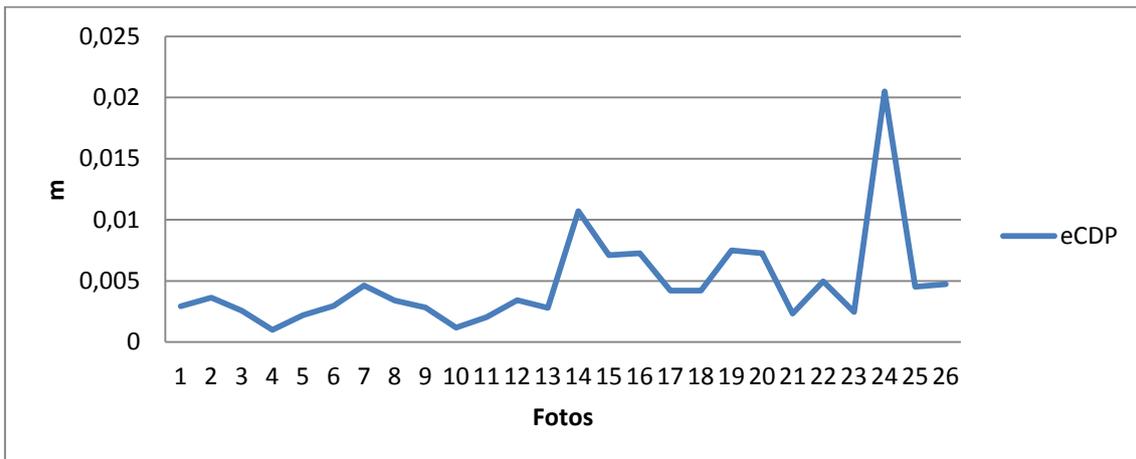


Figura 5.23 Error del centro de proyección GM

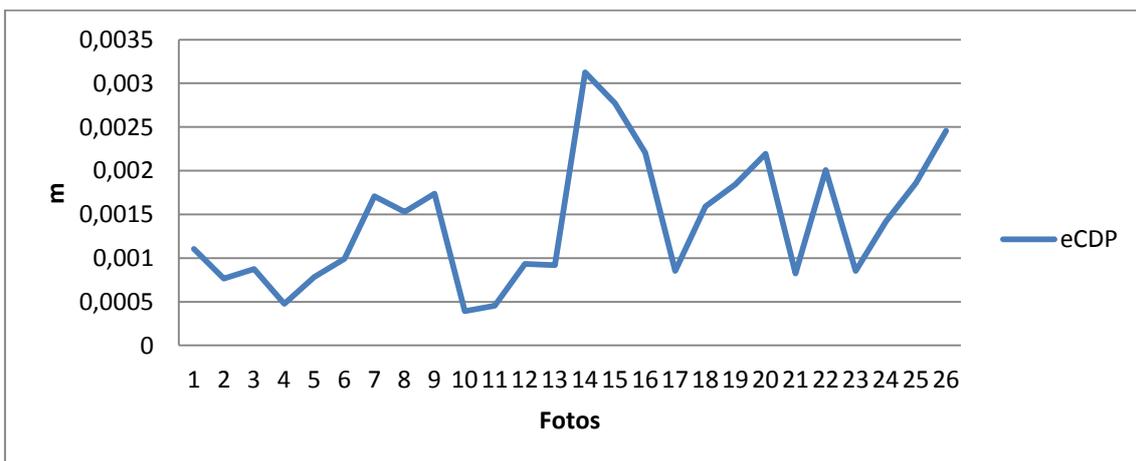


Figura 5.24 Error del centro de proyección GM + Const.

5.1.4. Georreferenciación directa con imágenes de formato reducido

Se ha realizado el estudio del comportamiento que generan los constreñimientos sobre imágenes con formato reducido (FR). Para ello se ha reducido también los parámetros de orientación interna de la cámara Canon EOS D60 15 mm, un factor de reducción de 2x, obteniendo una focal de 3.75 mm con un formato de imagen de 768 x 512 píx y un sensor de 5.5 X 3.77 mm. El tamaño del píxel sobre el terreno (GSD) pasa a ser de 4 cm en las direcciones principales y 5.65 cm en la diagonal, a una distancia de 20 m (Figura 5.25).

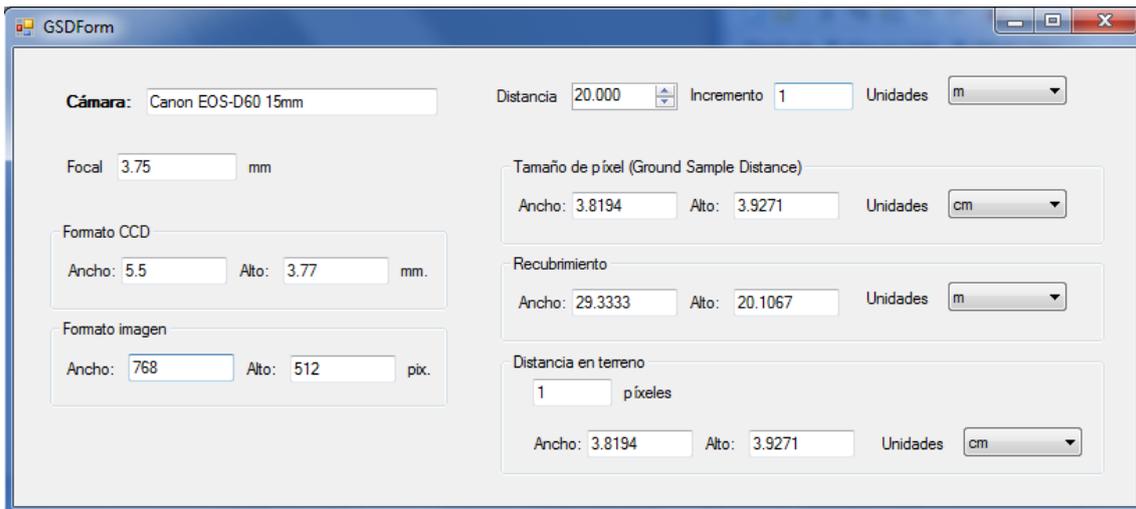
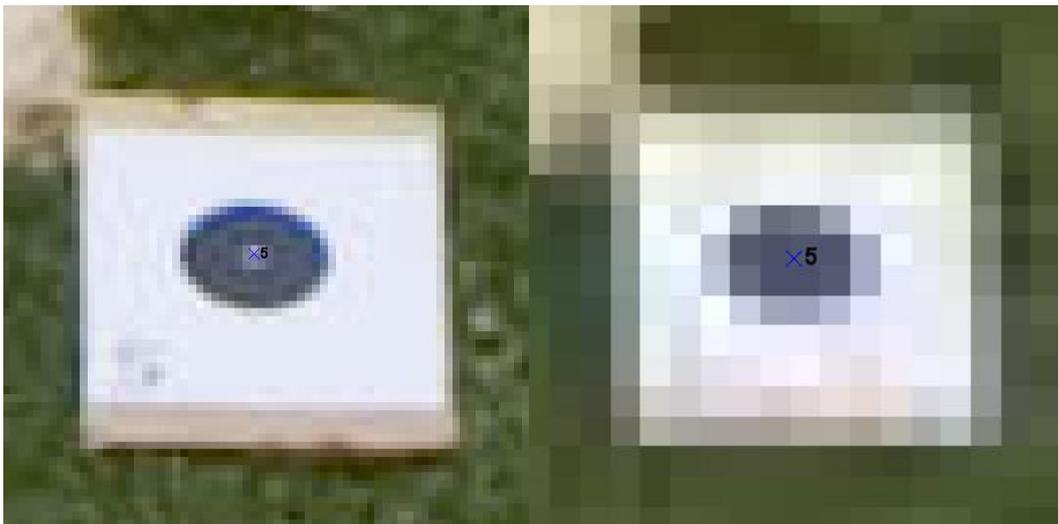


Figura 5.25 GSD de formato reducido

El principal inconveniente en trabajar con imágenes de FR es la difícil identificación de los puntos homólogos entre las imágenes, en la Figura 5.26, podemos observar la diferencia entre la diana en la imagen original y su homóloga reducida. Esta difícil identificación del mismo punto sobre las imágenes hace que se esté introduciendo un error en la determinación de las coordenadas 3D en la intersección de haces.



a

b

Figura 5.26 Detalle de Diana de PA en la imagen original (a) y su imagen reducida (b)

En la Figura 5.27 podemos observar que sin puntos de apoyo el promedio del error se sitúa en los 26 cm bajando a los 7.2 cm con 3 puntos de apoyo y en 6 cm con constreñimientos geométricos de convergencia de ejes y distancia.

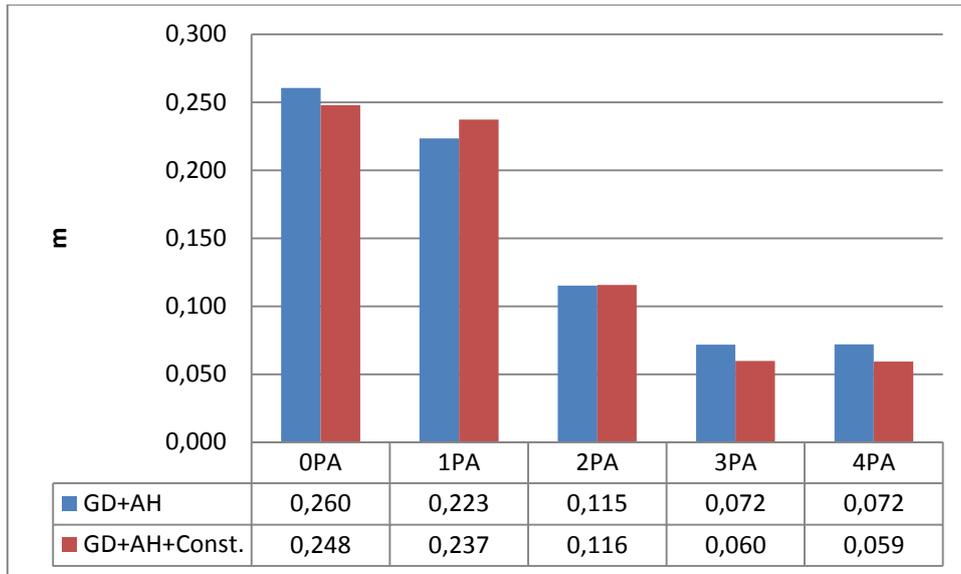


Figura 5.27 Diferencias de los PC observados y calculados con imágenes de FR georreferenciadas

En la gráfica de residuos píxel medios (Figura 5.28) vemos que sin constreñimientos geométricos el error medio se sitúa por encima de 1.5 píxeles. Aplicando los constreñimientos geométricos que obligan a las cámaras de formato reducido y con mal recubrimiento a posicionarse aproximadamente en la orientación correcta (conseguida por medio de las cámaras de mayor resolución), el valor del residuo medio en píxeles se sitúa en torno a 1.5 píxeles de error.

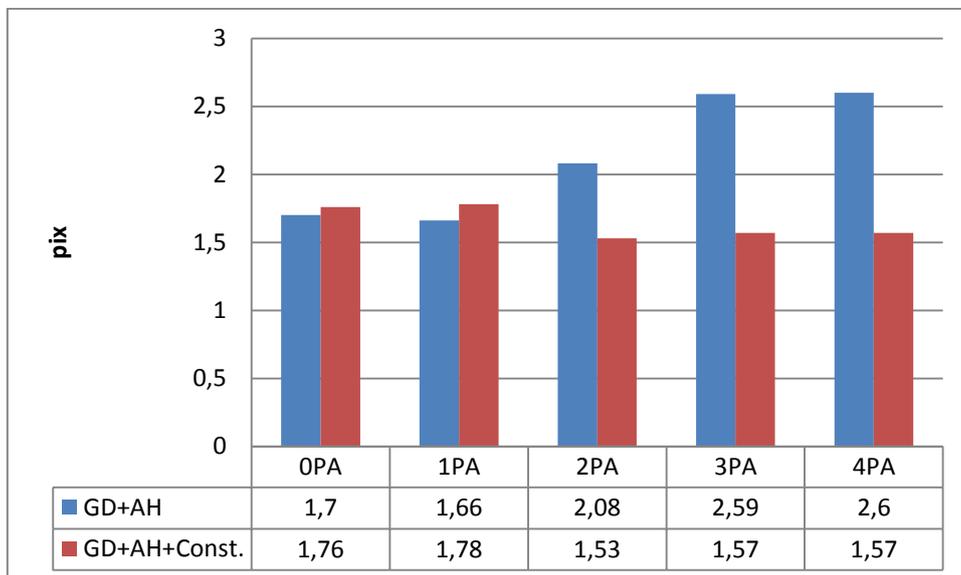


Figura 5.28 Residuo píxel medio en imágenes FR georreferenciadas

5.2. Generación de la nube de puntos 3D

Una vez finalizado el proceso de calibración del sistema fotogramétrico portátil GNSS/INS y ajustado mediante los PA y los constreñimientos, se puede realizar la correlación cruzada normalizada (Lerma García, 2002). Los resultados obtenidos se refinarán a precisión subpíxel para obtener un modelo denso de superficie de la zona capturada por el sistema fotogramétrico en el sistema UTM.

Dado que el sistema parte con una orientación, se puede densificar la zona de modo que la correlación tenga puntos semilla que faciliten la búsqueda homológica mediante algún tipo de detector de puntos característicos, ya sea con un detector de esquinas como Harris o algoritmos más avanzados invariantes a factores de escala como SIFT o SURF (Lowe, 2003; Bay, et al., 2006). La ventaja que reporta la georreferenciación directa como dato previo a un ajuste en bloque y la consiguiente generación del modelo digital puede consultarse en Lerma, et al., 2013.

Una vez calibrado el sistema fotogramétrico GNSS/INS con constreñimientos geométricos, se pueden obtener nubes densas de puntos 3D mediante procesos de correspondencia multi-imagen (Figura 5.29 y Figura 5.30).



Figura 5.29 Nube de puntos 3D y configuración espacial de la toma. Vista en planta

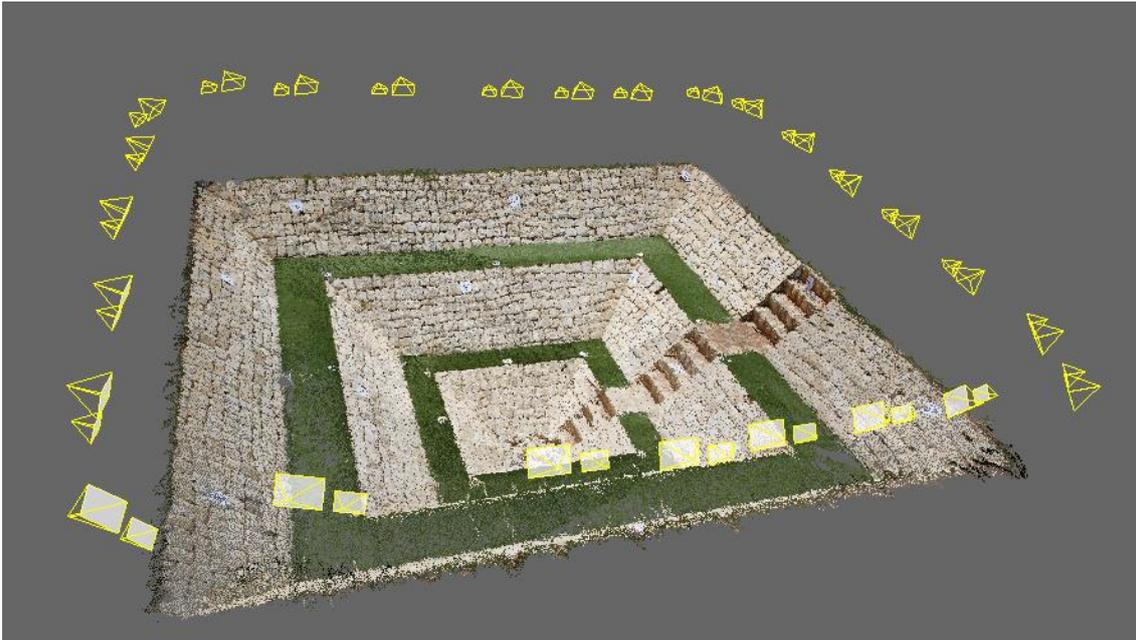


Figura 5.30 Nube de puntos 3D y configuración espacial de la toma. Vista en perspectiva

6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

6.1. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos podemos concluir que mediante la inclusión de los constreñimientos geométricos que relacionan los sensores del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS se puede conseguir una georreferenciación más precisa y reducir considerablemente la necesidad de puntos de apoyo. Además, permite introducir en el sistema imágenes de baja resolución, como son imágenes térmicas, cámaras web, etc. obteniendo una mejor georreferenciación directa de estos dispositivos.

La orientación directa de los sensores utilizando los parámetros calibrados del sistema multicámara portátil GNSS/INS (descentrados y desalineaciones entre sensores) proporciona una solución de navegación. El error de reproyección espacial en el sistema imagen permite pasar de 113.20 píxeles a 93.90 píxeles (Figura 5.2), lo que supone una mejoría en torno al 17% en el proyecto.

Los constreñimientos ofrecen una mayor precisión en el proceso de georreferenciación y reducen la necesidad de puntos de apoyo cuando se trata de sensores de distinta resolución (Figura 5.19). Con 3 puntos de apoyo (PA), la georreferenciación directa con parámetros calibrados sin constreñimientos sitúa la media con respecto a los puntos de control en aprox. 2 cm mientras que la solución con constreñimientos de ángulo y distancia la sitúa por debajo del centímetro.

La solución de la georreferenciación directa con constreñimientos angulares y de distancia ofrece mejores resultados que cada constreñimiento por separado (Figura 5.19 y Figura 5.20). Se comprueba que con 4 PA ambas soluciones por separado obtienen un error medio respecto a los PC de 2 cm mientras que el ajuste con los dos constreñimientos sitúa el error medio en 2 mm.

Ofrece mayor flexibilidad en la geometría del bloque fotogramétrico lo que reduce los tiempos de cálculo dedicados a la orientación externa de las imágenes y los costes que suponen la obtención de los puntos de apoyo que se utilizan en la triangulación del bloque fotogramétrico.

La georreferenciación directa con constreñimientos geométricos es mucho más robusta y estable, y particularmente útil cuando se utilizan sensores de imagen de distinta naturaleza. En el Apartado 5.1.4 - Georreferenciación directa con imágenes de formato reducido, se ha conseguido obtener los parámetros de orientación externa de un sensor de baja resolución por medio de otro sensor de mayor resolución, partiendo de un error de 26 cm llegando a trabajar con precisión del GSD de la imagen de formato reducido establecida aproximadamente en 5 cm. Este resultado demuestra que es aconsejable la utilización de constreñimientos geométricos en las plataformas GNSS/INS que combinen sensores de captura de datos de distinta resolución (Figura 5.27).

Asimismo, la solución con constreñimientos geométricos en el ajuste de haces genera una solución más estable en la determinación de los parámetros de orientación de los

sensores (Figura 5.22 y Figura 5.24), frente a la solución de georreferenciación directa con ajuste de haces (Figura 5.21 y Figura 5.23).

La orientación espacial de múltiples sensores integrados con constreñimientos geométricos de distancia y de ángulo permite obtener nubes de puntos 3D y consiguientemente modelos digitales tridimensionales con textura georreferenciados, proporcionando además la precisión en la determinación de las coordenadas 3D de cada punto.

Sin embargo, el sistema multicámara portátil GNSS/INS necesita de una calibración periódica tanto de los parámetros de orientación interna de las cámaras (tanto mayor cuanto menor sea la estabilidad de las mismas), como de los parámetros del sistema multicámara portátil GNSS/INS, de manera que la transferencia de orientación y de posición entre sensores sea precisa. Los constreñimientos geométricos pueden no servir entre distintas sesiones de trabajo, debido al montaje de las cámaras, por lo que también se tendrán que recalibrar o comprobar su estabilidad en cada nueva sesión.

Los constreñimientos geométricos ofrecen una solución óptima al resultado del ajuste mínimo cuadrático cuando la propia configuración geométrica del bloque es débil. Por tanto, se estima fundamental incorporar constreñimientos cuando no pueda aportar o no exista suficiente información topográfica en el ajuste como para situar y orientar los sensores en su posición correcta.

6.2. Futuras líneas de investigación

La realización de esta Tesis ha abierto posibles líneas de investigación futuras, entre las que cabe citar las siguientes líneas:

- La incorporación de sensores de ultra bajo coste:

Realizar estudios sobre la integración de sensores de navegación de ultra bajo coste en procesos de georreferenciación en los que se incluyan constreñimientos geométricos.

- Reducción de ruidos aleatorios por medio de constreñimientos entre sensores:

En esta Tesis se ha estudiado el comportamiento que sufren los sensores ópticos por medio de los constreñimientos geométricos. Se podría profundizar en la integración de sensores de distinta naturaleza (ópticos y no ópticos) y GNSS/IMU. Se podría utilizar el potencial de los constreñimientos geométricos para predecir la posición y la orientación de otro sensor, pudiendo utilizarse también en labores de reducción de ruidos aleatorios, bien sean producidos por interferencias o por pérdidas de señal.

- Estudios empíricos sobre precisiones esperables con el sistema multicámara portátil GNSS/INS:

Se podría profundizar más en análisis estadísticos que abordaran la calidad del dato obtenido para cartografía. En este punto se puede estudiar a qué intervalos de distancias se podría trabajar con el sistema multicámara portátil GNSS/INS, qué bases entre estaciones serían óptimas, qué errores se obtendrían en la determinación de un punto, así como la relación entre el error estimado a partir de la propagación de varianzas, la orientación de los sensores y el error de los puntos generados, etc.

- Calibración automática del sistema multicámara portátil GNSS/INS:

Generación de un módulo de control al sistema multicámara portátil GNSS/INS que controle en campo si se han descalibrado los parámetros internos del sistema GNSS/INS o los constreñimientos geométricos, mediante captura de dianas u otras técnicas de control. El resultado sería un módulo de autocalibración del propio sistema cartográfico.

- Guiado y orientación de los sensores del sistema multicámara portátil GNSS/INS:

Generación de un módulo de guiado sobre una ruta preestablecida. De este modo se podría guiar al usuario o a la plataforma autónoma teledirigida a su posición y orientación espacial óptima desde la que se debería realizar los disparos.

7. Referencias bibliográficas

7.1. Bibliografía

- 3Dcomplete. (2012). 7 Capacities. <http://3dcomplete.eu/member-login/meetings/control-fair-stuttgart-ger-8-11-5-2012/>, (15.Jul.2013).
- Alba, M. I., Barazzetti, L., Scaioni, M., Rosina, E., & Previtali, M. (2011). MAPPING INFRARED DATA ON TERRESTRIAL LASER SCANNING 3D MODELS OF BUILDINGS. *Remote Sensing*, 3(9), pp 1847-1870.
- Anquela, A. B., Martín, A., Berné, J. L., & Padín, J. (2013). GPS AND GLONASS STATIC AND KINEMATIC PPP RESULTS. *Journal of surveying engineering*, 139, pp 47-58.
- Applanix. (2013). APPLANIX MOBILE MAPPING AND POSITIONING SOLUTIONS. http://www.applanix.com/media/downloads/products/specs/posav_specs_1212.pdf, (15.Jul.2013).
- Barbour, N. (2010). INERTIAL NAVIGATION SENSORS. *NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology*, 28 pp.
- Bäumker, M., & Heimes, F. (2001). NEW CALIBRATION AND COMPUTING METHOD FOR DIRECT GEOREFERENCING OF IMAGE AND SCANNER DATA USING THE POSITION AND ANGULAR DATA OF AN HYBRID INERTIAL NAVIGATION SYSTEM. *OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation, Hannover, CD-ROM*, 17 pp.
- Bay, H., Tuytelaars, T., & Gool, L. (2006). SURF: SPEEDED UP ROBUST FEATURES. *Proceedings of the ninth European Conference on Computer Vision*, 14 pp.
- Bejuri, W. M., Wan, Y., Mohamad, M., & Sapri, M. (2011). UBIQUITOUS POSITIONING: A TAXONOMY FOR LOCATION DETERMINATION ON MOBILE NAVIGATION SYSTEM. *Signal & Image Processing : An International Journal(SIPIJ)*, 2 No 1, pp 24-34.
- Bendea, H., Chiabrandu, F., Tonolo, F., & Marenchino, D. (2007). MAPPING OF ARCHAEOLOGICAL AREAS USING A LOW-COST UAV THE A UGUSTA BAGIENNORUM TEST SITE. *Proceedings in : XXI International CIPA Symposium,01-06 October,Athens, Greece*, pp 01-06.
- BOE. (27 de julio de 2007). *BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO*, (BOE-A-2007-15822 ed., Vol. 207). (I. D. generales, Ed.) Real Decreto 1071/2007, pp 35986 - 35989.
- Börlin, N., Grussenmeyer, P., Eriksson, J., & Lindström, P. (2004). PROS AND CONS OF CONSTRAINED AND UNCONSTRAINED FORMULATION OF THE BUNDLE ADJUSTMENT PROBLEM. *XXth Congress of the International*

Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Turkey, XXXV, pp 589-594.

- Borrmann, D., Elseberg, J., & Nuchter, A. (2012). THERMAL 3D MAPPING OF BUILDING FACADES. *work was supported by SEE-ERA.NET project ThermalMapper under the project number ERA 14/01, Project Webpage. Project ThermalMapper. <http://www.faculty.jacobs-university.de/anuechter/thermalmapper.html>, 2011, 10 pp.*
- Bosch, E., Alamús, R., Serra, A., Baron, A., & Talaya, J. (2003). GEOVAN: EL SISTEMA DE CARTOGRAFÍA TERRESTRE MÓVIL DEL ICC. *Setmana Geomàtica, Barcelona, España, 12 pp.*
- Bossler, J., & Toth, C. (1996). FEATURE POSITIONING ACCURACY IN MOBILE MAPPING: RESULTS OBTAINED BY THE GPSVan. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vienna, XXXI (B4), pp 139-142.*
- Bruce King, R. (1995). BUNDLE ADJUSTMENT OF CONSTRAINED STEREOPAIRS - MATHEMATICAL MODELS. *Geomatics Research Australia, 63, pp 67-92.*
- Burman, H. (2000). CALIBRATION AND ORIENTATION OF AIRBORNE IMAGE AND LASER SCANNER DATA USING GPS AND INS. *Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology. Department of Geodesy and Photogrammetry Stockholm, Sweden, April, 111 pp.*
- Cabrelles, M., Galcerá, S., Navarro, S., Lerma, J. L., Akasheh, T., & Haddad, N. (2009). INTEGRATION OF 3D LASER SCANNING, PHOTOGRAMMETRY AND THERMOGRAPHY TO RECORD ARCHITECTURAL MONUMENTS. *The CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, 22, ISSN 2076-7730, pp 1 - 6.*
- Cai, C. (2009). PRECISE POINT POSITIONING USING DUAL-FREQUENCY GPS AND GLONASS MEASUREMENTS. *In Masters Abstracts International (Vol. 48, No. 03) UNIVERSITY OF CALGARY, 153 pp.*
- Changjun, C., Young, L., Qingzhou, M., & Wang, G. (2009). STEREO CAMERAS CALIBRATION FOR VEHICLE BASED MULTI-SENSORS INTEGRATED SYSTEM. *MIPPR 2009: Pattern Recognition and Computer Vision, edited by Mingyue Ding. Proc of SPIE, 7496, pp 1-8.*
- Colomina, I. (1999). GPS, INS AND AERIAL TRIANGULATION: WHAT IS THE BEST WAY FOR THE OPERATIONAL DETERMINATION OF PHOTOGRAMMETRIC IMAGE ORIENTATION? *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Conference "Automatic Extraction of Gis Objects from Digital Imagery", 32, pp 121-130.*
- Cornou, S., Dhome, M., & Sayd, P. (2003). ARCHITECTURAL RECONSTRUCTION WITH MULTIPLE VIEWS AND GEOMETRIC CONSTRAINTS. *British Machine Vision Conference, Norwich, 10 pp.*

- Cothren, J. (2005). RELIABILITY IN CONSTRAINED GAUSS-MARKOV MODELS: AN ANALYTICAL AND DIFFERENTIAL APPROACH WITH APPLICATIONS IN PHOTOGRAMMETRY. *Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science The Ohio State University Columbus, Ohio, 67 pp.*
- Cramer, M. (1997). GPS/INS INTEGRATION. *En Fritsch/Hobbie (ed.) Photogrammetric Week, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, pp 3-12.*
- Cramer, M. (2001). PERFORMANCE OF GPS/INERTIAL SOLUTIONS IN PHOTOGRAMMETRY. *Photogrammetric Week, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, pp 49-62.*
- Cramer, M., & Stallmann, D. (2002). SYSTEM CALIBRATION FOR DIRECT GEOREFERENCING. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34 (3A), pp 79-84.*
- Cramer, M., Stallmann, D., & Haala, N. (2000). DIRECT GEOREFERENCING USING GPS/INERTIAL EXTERIOR ORIENTATIONS FOR PHOTOGRAMMETRIC APPLICATIONS. *En International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,, XXXIII (B3), pp 198-205.*
- Creixell, F., Colomina, I., & Baron, A. (2003). DETERMINACIÓN PRECISA DE TRAYECTORIAS CONSISTEMAS INERCIALES Y GNSS. *5ª Setmana Geomàtica de Barcelona (Institut Cartogràfic de Catalunya), pp 1-11.*
- Deng, W. Y., Dong, M. L., Guang, L. N., & Wang, Y. (2008). PHOTOGRAMMETRIC METHOD WITH DISTANCE CONSTRAINT FOR PROFILE OF INFLATABLE SPACE ANTENNA. *Key Engineering Materials, Measurement Technology and Intelligent Instruments VIII, 381 - 382, pp 313-316.*
- Eisenbeiss, h. (2011). THE POTENTIAL OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR MAPPING. *Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany, Dieter Fritsch (Ed.), pp 135-145.*
- Eneriquez, C. (2006). INTEGRACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL. *XII CONGRESO NACIONAL DE TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN GRÁFICA. Granada, España, 64 pp.*
- Everaerts, J. (2008). THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS) FOR REMOTE SENSING AND MAPPING. *En: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China,, XXXVII (B1), pp 1187-1192.*
- Fagueras, O., Loung, Q., & Maybank, J. (1992). CAMERA SELF-CALIBRATION: THEORY AND EXPERIMENTS. *Proceedings of the second European Conference on Computer Vision, Santa Margherita Ligure, Italy., pp 321-334.*

- García Álvarez, D. A. (2008). SISTEMA GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM). *Master's thesis, Universidad Autónoma de Madrid, 124 pp.*
- García-Asenjo Villamayor, L., & Garrigues Talens, P. (2001). GEODESIA Y GPS. (Universidad Politécnica de Valencia, Ed.) *Dep. Ing. Cartografía, Geodesia y Fotogrametría, 311 pp.*
- García-Asenjo Villamayor, L., & Hernandez, D. (2004). GEODESIA. (Universidad Politécnica de Valencia, Ed.) *Dep. Ing. Cartografía, Geodesia y Fotogrametría, Febrero, 536 pp.*
- García-Asenjo, L., Lerma, J., Garrigues, P., Baselga, S., Cabrelles, M., Hernández, D., y otros. (2008). INTEGRACIÓN DE GNSS Y UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN INERCIAL DE BAJO COSTE PARA LA GEORREFERENCIACIÓN DIRECTA DE IMÁGENES FOTOGRAMÉTRICAS. *International Congress on Geomatic and Surveying Engineering, CD-ROM, 9 pp.*
- GeoAutomation. (2013). VISICS DEPARTMENT OF THE UNIVERSITY OF LEUVEN AND A SURVEYING & ENGINEERING COMPANY. <http://klmaerocartobelgium.com/>, (15.Jul.2013).
- Gianinetto, M., Giussani, A., Roncoroni, F., & Scaioni, M. (2005). INTEGRATION OF MULTI-SOURCE CLOSE-RANGE DATA. *En: Proceedings of the CIPA XX International Symposium, 26 September- 01 October Torino, Italy, 6 pp.*
- GIFLE. (2013). GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN FOTOGRAMETRÍA Y LÁSER ESCÁNER. <http://gifle.webs.upv.es>, 22 Jul 2013.
- Grejner-Brzezinska, D. A. (1999). DIRECT EXTERIOR ORIENTATION OF AIRBORNE IMAGERY WITH GPS/INS SYSTEM: PERFORMANCE ANALYSIS. *Navigation, 46 (4), pp 261-270.*
- Grejner-Brzezinska, D. A. (2001). DIRECT SENSOR ORIENTATION IN AIRBORNE AND LAND-BASED MAPPING APPLICATIONS. *Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Ohio, 461, 52 pp.*
- Grejner-Brzezinska, D. A., Ron, L., Haala, N., & Toth, C. (2002). MULTISENSOR SYSTEMS FOR LAND-BASED AND AIRBORNE MAPPING: TECHNOLOGY OF THE FUTURE? *ISPRS COMMISSION II, Xian, Aug. 20-23, XXXIV (2), 42 pp.*
- Grenzdörffer, G., Engel, A., & Teichert, B. (2008). THE PHOTOGRAMMETRIC POTENTIAL OF LOW-COST UAVs IN FORESTRY AND AGRICULTURE. *IAPRS&SIS, Veijing, China, 37(B1), pp 1207-1213.*
- Grossmann, E., & Santors-Victor, J. (2005). LEAST-SQUARES 3D RECONSTRUCTION FROM ONE OR MORE VIEWS AND GEOMETRIC CLUES. *In: Computer Vision and Image Understanding, 99 (2), pp 151-174.*

- He, G., Novak, K., & Tang, W. (1994). THE ACCURACY OF FEATURES POSITIONED WITH THE GPSVAN. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30 (2), pp 480-486.
- Heipke, C. (2001). THE OEEPE TEST ON INTEGRATED SENSOR ORIENTATION - RESULTS OF PHASE I. *En: Proceedings of photogrammetric week, Stuttgart, Germany, pp 195-204.*
- Heipke, C., Jacobsen, K., & Wegmann, H. (2001). THE OEEPE TEST ON INTEGRATED SENSOR ORIENTATION. *OEEPE Workshop "Integrated Sensor Orientation", Hannover, CD-ROM, 20 pp.*
- Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H., & Nilsen, B. (2000). INTEGRATED SENSOR ORIENTATION - AN OEEPE TEST. *Archives of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, XXXIII, pp 373-380.*
- Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H., Andersen, Ø., & Nilsen, B. J. (2002). TEST GOALS AND TEST SET UP FOR THE OEEPE TEST "INTEGRATED SENSOR ORIENTATION. *OEEPE Official Publication, 43, pp 11-29.*
- Hernández-López, D., Cabrelles, M., Felipe-García, B., & Lerma, J. L. (2012). CALIBRATION AND DIRECT GEOREFERENCING ANALYSIS OF A MULTI-SENSOR SYSTEM FOR CULTURAL HERITAGE RECORDING. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, June, 3, pp 237-250.*
- Honkavaara, E., Ahokas, E., Hyypä, J., Jaakkola, J., Kaartinen, H., Kuitinen, R., y otros. (2006). GEOMETRIC TEST FIELD CALIBRATION OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRIC SENSORS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60(6), pp 387-399.*
- Honkavaara, E., Jaakkola, J., & Ilves, R. (2003). PRACTICAL RESULTS OF GPS/IMU/CAMERA SYSTEM CALIBRATION. *Proceedings of Workshop: Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS/Sensor Orientation, ISPRS WG I/5, Barcelona,, CD-ROM, 10 pp.*
- Hutton, J., & Mohamed, M. M. (2005). 10 YEARS OF DIRECT GEOREFERENCING FOR AIRBORNE PHOTOGRAMMETRY. *Geo-Information-Systeme, 11, pp 33-41.*
- Indra. (2012). CONSULTORÍA, TECNOLOGÍA, INNOVACIÓN Y TALENTO. *www.indracompany.com, (15.Jul.2013).*
- Jacobsen, K. (2000). COMBINED BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT VERSUS DIRECT SENSOR ORIENTATION. *ASPRS Annual Convention, 7 pp.*
- Jacobsen, K. (2002). CALIBRATION ASPECTS IN DIRECT GEOREFERENCING OF FRAME IMAGERY. *ISPRS Commission Pecora 15, Conference Proceedings, 34 (1), pp 82-89.*

- Jacobsen, K., & Wegmann, H. (2001). DEPENDENCIES AND PROBLEMS OF DIRECT SENSOR ORIENTATION. *OEEPE-Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, 11 pp.*
- Jekeli, C. (2000). *INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS WITH GEODETIC APPLICATIONS*. Walter de Gruyter, 364 pp.
- Kersting, A. P., Habib, A., & Rau, J. (2012). NEW METHOD FOR THE CALIBRATION OF MULTI-CAMERA MOBILE MAPPING SYSTEMS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 25 Agosto– 01 Septiembre, Melbourne, Australia, XXXIX (B1), pp 121-126.*
- Khoshelham, K. (2009). ROLE OF TIE POINTS IN INTEGRATED SENSOR ORIENTATION FOR PHOTOGRAMMETRIC MAP COMPILATION. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Marzo, 75 (3), pp 305-311.*
- Khoshelham, K., Saadatseresht, M., & Gorte, B. G. (2007). INFLUENCE OF TIE POINT DISTRIBUTION ON INTEGRATED SENSOR ORIENTATION. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34 (Part.XXX), 6 pp.*
- Kim, S., Goo, S., Park, Y. C., & Cho, M. (2012). STRATEGIC MULTIPLE SENSOR DATA FUSION FOR TIME-CRITICAL NATURAL DISASTER RESPONSE. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, XXII ISPRS Congress, 25 Agosto – 01 Septiembre, Melbourne, Australia, XXXIX (B4), pp 327-330.*
- Kirchhöfer, M., Chandler, J., & Wackrow, R. (2010). TESTING AND APPLICATION OF A LOW-COST PHOTOGRAMMETRIC RECORDING SYSTEM SUITABLE FOR CULTURAL HERITAGE RECORDING. *Proceedings of RSPSoc and Irish Earth Observation Symposium, University College Cork, 1-3 Septiembre, pp 330-337.*
- Kirchhöfer, M., Chandler, J., & Wackrow, R. (2011). CULTURAL HERITAGE RECORDING UTILISING LOW-COST CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY. *Proceedings of CIPA 23rd International Symposium, 2 – 16 Septiembre 2011, 8 pp*
- Kraus, K., KagerKraus, H., & Jansa, J. (1997). PHOTOGRAMMETRY VOL. II, ADVANCED METHODS AND APPLICATIONS. (4. edition, Ed.) *Dümmlers, 466 pp.*
- Lawrence, A. (2001). *MODERN INERTIAL TECHNOLOGY*. Springer New York Ed. 278 pp.
- Lee, Y.-J., & Yilmaz, A. (2011). BORESIGHT CALIBRATION OF THE AERIAL MULTI-HEAD CAMERA SYSTEM. *En Proc. SPIE, 8059, pp 805908-805913.*
- Lerma García, J. L. (2002). FOTOGAMETRÍA MODERNA: ANALÍTICA Y DIGITAL. *Universidad Politécnica de Valencia, Ed., 550 pp.*

- Lerma García, J. L., García-Asenjo Villamayor, L., & Garrigues Talens, P. (2009). SOPORTE DE SISTEMA FOTOGAMETRICO MULTI-CÁMARA PORTÁTIL PARA APLICACIONES TERRESTRES. *Patente nº 200900365. Universidad Politécnica de Valencia, España.*
- Lerma, J. L., & Cabrelles, M. (2007). A REVIEW AND ANALYSES OF PLUMB-LINE CALIBRATION. *The Photogrammetric Record*, 22(118), pp 135-150.
- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., Seguí, A., & Hernández, D. (2013). AUTOMATIC ORIENTATION AND 3D MODELLING FROM MARKERLESS ROCK ART IMAGERY. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, pp 64-75.
- Lerma, J., Navarro, S., Cabrelles, M., & Seguí, A. (2010). CAMERA CALIBRATION WITH BASELINE DISTANCE CONSTRAINTS. *The Photogrammetric Record*, 25(130), pp 140-158.
- Lowe, D. (2003). SIFT: Scale Invariant Feature Transform. *Online: <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/>, 22 Jul 2013.*
- Madeira, S., Gonçalves, J. A., & Bastos, L. (2007). IMPLEMENTATION OF A LOW COST MOBILE MAPPING SYSTEM. *Proceedings of The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Padua, Italia*, 8 pp.
- Martín, A., & Padín, J. (2004). GRAVIMETRÍA PORTADA, AEROPORTADA Y POR SATÉLITE. INTRODUCCIÓN A LA NAVEGACIÓN INERCIAL. (*Universidad Politécnica de Valencia, Ed.*) 74 pp.
- Martín, A., Anquela, A. B., Berné, J. L., & Sanmartín, M. (2012). KINEMATIC GNSS - PPP RESULTS FROM VARIOUS SOFTWARE PACKAGES AND RAW DATA CONFIGURATIONS. *Scientific Research and Essays*, 7(3), pp 419-431.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & Mcglone, C. J. (2001). INTRODUCTION TO MODERN PHOTOGRAMMETRY. (J. Wiley, & I. Sons, Edits.) New York, NY, 496 pp.
- Mohamed, M. M., & Klaus-Peter, S. (2000). A MULTI-SENSOR SYSTEM FOR AIRBORNE IMAGE CAPTURE AND GEOREFERENCING. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Diciembre, 66, pp 1417-1423.
- Mohamed, M. R., & Klaus-Peter, S. (2001). DIGITAL IMAGE GEOREFERENCING FROM A MULTIPLE CAMERA SYSTEM BY GPS/INS. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56, pp 1-12.
- Oktay, B., & Guoqing, Z. (2009). UAV-BASED MULTISENSOR DATA FUSION FOR TIME-CRITICAL DISASTER RESPONSE. *Proceedings in ISPRS International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVIII, 6 pp.
- Orthoware. (2013). RECONSTRUCCIÓN DIGITAL DEL PATRIMONIO HISTÓRICO Y CULTURAL. *<http://www.orthoware.es>, (15.Jul.2013).*

- Peñafiel, J., & Zayas, J. (2001). FUNDAMENTOS DEL SISTEMA GPS Y APLICACIONES EN LA TOPOGRAFIA. *Colegio Oficial de I.T. en Topografía. Delegación de Madrid, Castilla-La Mancha.*, 135 pp.
- Portalés, C., & Lerma, J. L. (2003). GEORREFERENCIACIÓN GPS/INS DE IMÁGENES AÉREAS ADQUIRIDAS CON ESCÁNERES ROTACIONALES: EJEMPLO PRÁCTICO Y RESULTADOS. *TOPCART: Revista del colegio oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, XX (116), pp 4-9.
- Remondino, F., & Fraser, C. (2006). DIGITAL CAMERAS CALIBRATION METHODS: CONSIDERATIONS AND COMPARISONS. *IAPRS&SIS*, 36(5), 266-272.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV PHOTOGRAMMETRY FOR MAPPING AND 3D MODELING -CURRENT STATUS AND FUTURE PERSPECTIVES-. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland, XXXVIII-1/C22*, 7 pp.
- Retscher, G. (2002). ACCURACY PERFORMANCE OF VIRTUAL REFERENCE STATION (VRS) NETWORKS. *Journal of Global Positioning Systems*, 1 (1), pp 40-47.
- Rönnbäck, S. (2000). DEVELOPEMENT OF A INS/GPS NAVIGATION LOOP FOR AN UAV. *Ph.D. dissertation, Lulea University of Technology. Department of Computer Science and Electrical Engineering, ISSN: 1402-1617 ISRN:LTU-EX-00/081-SE, Febrero*, 81, 131 pp
- Sánchez Lopera, J., & Lerma García, J. L. (2012). ACTUALIZACIÓN DE CARTOGRAFÍA CATASTRAL URBANA MEDIANTE LIDAR Y SIG. *Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 12, pp 53-70.
- Sanz Muñoz, P. M. (2004). APOYO AÉREO CINEMÁTICO Y AEROTRIANGULACIÓN DIGITAL FRENTE A LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INERCIAL: ANÁLISIS DE PRECISIONES. *Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Madrid*, 563 pp.
- Schwan, K.-P. (1995). INTEGRATED AIRBORNE NAVIGATION SYSTEMS FOR PHOTOGRAMMETRY. *Photogrammetric week. Wichmann Verlag Heidelberg*, I, pp 139-154.
- Schwarz, K. P., & El-Sheim, N. (2004). MOBILE MAPPING SYSTEMS - STATE OF THE ART AND FUTURE TRENDS. *IAPRS Istanbul*, XXXV (B1), 10 pp.
- Skaloud, J. (1999). OPTIMIZING GEOREFERENCING OF AIRBORNE SURVEY SYSTEMS BY INS/DGPS. *Ph.D. dissertation, University of Calgary*, Marzo, 180 pp.

- Skaloud, J., & Schwan, K.-P. (2000). ACCURATE ORIENTATION FOR AIRBORNE MAPPING SYSTEMS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Abril, 66, pp 393-401.
- Skaloud, J., Cramer, M., & Schwarz, K. (1996). EXTERIOR ORIENTATION BY DIRECT MEASUREMENT OF CAMERA POSITION AND ATTITUDE. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31 (B3), pp 125-130.
- Sminchisescu, C., Metaxas, D., & Dickinson, S. (2005). INCREMENTAL MODEL-BASED ESTIMATION USING GEOMETRIC CONSTRAINTS. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Mayo, 27 (5), pp 1-12.
- StreetMapper. (2013). Mobile Mapping Using LiDAR Technology. www.streetmapper.net, (15.Jul.2013).
- Trimble. (2013). GPS 5700. http://www.trimble.com/srv_5700_ds.asp, (15.Jul.2013).
- Vallet, J., & Skaloud, J. (2004). DEVELOPMENT AND EXPERIENCES WITH A FULLY-DIGITAL HANDHELD MAPPING SYSTEM OPERATED FROM A HELICOPTER. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul*, 35 (Part B), 6 pp.
- Van den Heuvel, F. A. (1998). 3D RECONSTRUCTION FROM A SINGLE IMAGE USING GEOMETRIC CONSTRAINTS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, pp 354-368.
- Vermeille, H. (2002). DIRECT TRANSFORMATION FROM GEOCENTRIC COORDINATES TO GEODETIC COORDINATES. *Journal of Geodesy*, 78, pp 451-454.
- Vermeille, H. (2004). COMPUTING GEODETIC COORDINATES FROM GEOCENTRIC COORDINATES. *Journal of Geodesy*, 78, pp 94-95.
- Wegmann, H. (2002). IMAGE ORIENTATION BY COMBINED (A)AT WITH GPS AND IMU. *Proceedings of ISPRS Commission I Mid-term Symposium, Nov.2002 Denver, Colorado, USA.*, 6 pp.
- Wicherson, R. J., Heine, M. R., Van den Heuvel, F. A., & Bresters, P. W. (2000). COMBINED BLOCK ADJUSTMENT FOR EVALUATING A GPS/INERTIAL SYSTEM IN A LARGE SCALE PHOTOGRAMMETRIC PRODUCTION ENVIRONMENT. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Amsterdam, XXXIII (B3)*, pp 971-978.
- Wing Lun, A. (2005). ANALYSIS OF INTEGRATED SENSOR ORIENTATION FOR AERIAL MAPPING. *Ph.D. dissertation, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering*, 202 pp.
- Xsens. (2013). 3D MOTION TRACKING TECHNOLOGY AND PRODUCTS. <http://www.xsens.com/>, (15.Jul.2013).

- Yastikli, N., & Jacobsen, K. (2002). INVESTIGATION OF DIRECT SENSOR ORIENTATION FOR DEM GENERATION. *Proceedings of ISPRS Commission I Symposium " Integrated Remote Sensing at the Global Regional and Local Scale" Denver USA, 5 pp.*
- Yastikli, N., & Jacobsen, K. (2005). DIRECT SENSOR ORIENTATION FOR LARGE SCALE MAPPING- POTENTIAL, PROBLEMS, SOLUTIONS. *The Photogrammetric Record, September, 20 (111), pp 274-284.*
- Yastikli, N., & Jacobsen, K. (2005). INFLUENCE OF SYSTEM CALIBRATION ON DIRECT SENSOR ORIENTATION. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71(5), pp 629-633.*
- Zhang, L., Li, Q., Guo, D., He, Y., & Yan, Y. (2006). EVALUATION OF GPS/ IMU SUPPORTED AERIAL PHOTOGRAMMETRY. *Geoscience and Remote Sensing IEEE International Symposium, pp. 1512-1514.*
- Zhang, X., & Yuan, X. (2008). EFFECTS OF EXTERIOR ORIENTATION ELEMENTS ON DIRECT GEOREFERENCING IN POS-SUPPORTED AERIAL PHOTOGRAMMETRY. *Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, pp 30-36.*

7.2. Glosario

AH	Geometric Dilution Of Precision..... 50
Ajuste de Haces..... 21, 107, 109	GIS
ARINC	Geographic Information System 17, 18, 66
Airlines Electronic Engineering Comitte 30	GNSS
CCD	Global Navigation Satellite Systems 17, 21, 25, 33,
Charge Coupled Device 19, 20, 58, 79	49, 50, 52, 53, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 74,
cdp	79, 80, 82, 87, 91, 143
Centro de Proyección 28	GPS
CMOS	Global Positioning System.....15, 16, 18, 19, 20, 25,
Complementary Metal-Oxide-Semiconductor ... 79	33, 34, 42, 49, 53, 62, 64, 66, 69, 71, 79, 91, 93,
ECEF	100
Earth Centered Earth Fixed ..25, 35, 36, 37, 38, 39,	GRS80
40, 43, 44, 46, 48, 71, 72	Geodetic Reference System 1980 33, 34
ED50	GSD
European Datum 1950 33	Ground Sample Distance..... 88, 89, 117, 118
ENU	IMU 21
East North Up35, 38, 40, 41, 42, 45, 46, 71, 72, 79,	Inertial Measurement Unit...18, 19, 30, 35, 41, 47,
80, 99	48, 49, 53, 54, 55, 59, 60, 61, 64, 65, 67, 69, 71,
ETRS89	74, 79, 80, 82, 87, 91, 100, 142, 143
European Terrestrial Reference System 1989 ... 33,	INS
34	Inertial Navigation System ...15, 16, 17, 18, 19, 20,
f	21, 24, 30, 31, 32, 41, 47, 49, 50, 58, 62, 64, 69,
Longitud focal..... 28	71, 73, 79, 80, 82, 83, 87, 88, 91, 93, 94, 100,
FR	108, 120, 123
Formato Reducido..... 55, 117, 119	ITRF
GD	International Terrestrial Reference Frame..... 34
Georeferenciación Directa 106, 109	IUGG
GDOP	Union of Geodesy and Geophysics 34

Orientación espacial de múltiples sensores integrados con constreñimientos geométricos

MMS		SAR	
Mobile Mapping System	15, 16, 17, 18, 19	Synthetic Aperture Radar	15
NAD83		TCU	
North American Datum 1983	35	Time Control Unit.....	91, 92
PA		UAV	
Puntos Apoyo	87, 103, 104, 106, 107, 120	Unmanned Aerial Vehicle.....	16, 17, 69
PC		UTM	
Puntos Control	87, 104, 106, 114, 119	Universal Transverse Mercator	35
<i>pp</i>		VRS	
Punto Principal	28	Virtual Reference Station	66
REGCAN95		WGS	
Red Geodésica Canarias 1995	33	World Geodetic System	25
RTK		WGS84	
Real Time Kinematic.....	17, 66	World Geodetic System 1984.....	33, 34, 35, 99

Anejo I Proyecto Fotogramétrico

En este anejo se muestran los resultados obtenidos de la realización de un bloque fotogramétrico con las imágenes capturadas por el sistema fotogramétrico GNSS/INS, con la finalidad de obtener los ángulos de convergencia de los ejes de las cámaras así como la distancias entre ellas, calibración de los sensores ópticos y obtención de las coordenadas 3D en sistema ENU^G que se utilizarían como puntos de apoyo y control para los estudios de la georreferenciación directa.

AI.1 Orientación Externa en sistema ENU^G

Orientación externa calculada de los sensores ópticos en sistema ENU^G.

ID Foto	Omega	Phi	Kappa	X	Y	Z	eOmega	ePhi	eKappa	eXYZ
1296	64.2445	399.6705	224.2030	94.927	144.143	2.379	0.0172	0.0180	0.0130	0.006
38201	65.5476	0.5591	225.1264	95.273	144.332	2.453	0.0171	0.0179	0.0129	0.006
1298	63.8126	399.8341	228.4204	93.890	143.718	2.405	0.0171	0.0181	0.0130	0.006
38203	65.1128	0.7157	229.3339	94.224	143.930	2.480	0.0170	0.0180	0.0129	0.006
1300	63.8674	399.8733	240.3826	92.909	143.225	2.408	0.0171	0.0181	0.0130	0.006
38205	65.1708	0.7505	241.2996	93.197	143.495	2.484	0.0170	0.0180	0.0129	0.006
1301	63.9174	399.8076	281.3256	91.691	142.559	2.375	0.0174	0.0177	0.0130	0.007
38207	65.2118	0.7079	282.2390	91.759	142.948	2.451	0.0174	0.0176	0.0129	0.007
1302	63.7163	399.8997	289.1594	91.604	141.393	2.337	0.0178	0.0176	0.0130	0.007
38209	64.9996	0.8147	290.0756	91.625	141.786	2.414	0.0175	0.0175	0.0129	0.007
1304	63.7271	399.7797	315.3535	92.253	140.137	2.375	0.0183	0.0172	0.0130	0.006
38211	65.0319	0.6973	316.2725	92.113	140.505	2.451	0.0180	0.0171	0.0129	0.006
1306	63.7486	399.8049	322.2207	92.720	138.688	2.408	0.0184	0.0171	0.0130	0.006
38213	65.0552	0.7112	323.1443	92.542	139.040	2.484	0.0180	0.0171	0.0129	0.006
1308	63.7642	399.8395	317.4325	93.225	137.341	2.414	0.0186	0.0172	0.0131	0.006
38215	65.0798	0.7354	318.3596	93.073	137.705	2.489	0.0180	0.0171	0.0129	0.006
1310	63.8864	399.8013	337.6029	93.761	135.707	2.442	0.0186	0.0171	0.0130	0.005
38217	65.1892	0.6962	338.5222	93.504	136.005	2.518	0.0181	0.0170	0.0129	0.005
1312	63.9069	399.7302	349.0058	94.477	134.042	2.415	0.0184	0.0171	0.0130	0.005
38219	65.2176	0.6236	349.9217	94.170	134.291	2.490	0.0181	0.0170	0.0129	0.005
1314	65.7379	399.7225	378.0040	95.326	133.445	2.356	0.0179	0.0174	0.0130	0.005
38221	66.9897	0.6115	378.9833	94.941	133.531	2.430	0.0177	0.0173	0.0129	0.005
1316	65.6388	399.8115	11.1324	96.819	134.078	2.368	0.0173	0.0179	0.0130	0.004
38225	66.9127	0.7055	12.0960	96.442	133.961	2.442	0.0172	0.0178	0.0129	0.004
1318	65.6808	399.7647	17.1878	97.925	134.503	2.382	0.0172	0.0179	0.0130	0.004
38227	66.9498	0.6526	18.1568	97.561	134.350	2.456	0.0171	0.0179	0.0129	0.004
1320	65.6335	399.8408	17.2233	99.175	135.113	2.457	0.0173	0.0179	0.0130	0.004
38229	66.8993	0.7221	18.1864	98.810	134.961	2.532	0.0171	0.0179	0.0129	0.004
1322	65.6339	399.7960	23.9687	100.990	135.674	2.445	0.0172	0.0180	0.0130	0.003
38231	66.9057	0.6682	24.9406	100.643	135.483	2.519	0.0171	0.0179	0.0129	0.003
1324	65.7210	399.8184	39.9006	102.491	136.254	2.441	0.0171	0.0181	0.0130	0.003
38233	66.9883	0.6835	40.8696	102.202	135.983	2.515	0.0170	0.0180	0.0129	0.003
1326	65.7779	399.7578	52.5931	103.605	136.494	2.423	0.0171	0.0180	0.0130	0.003
38235	67.0361	0.6237	53.5666	103.376	136.173	2.498	0.0170	0.0180	0.0129	0.003
1328	65.5406	399.7738	96.1740	103.916	138.285	2.439	0.0177	0.0175	0.0130	0.003
38237	66.8080	0.6685	97.1487	103.942	137.892	2.514	0.0177	0.0174	0.0129	0.003
1330	65.5964	399.7910	115.3629	103.223	139.806	2.456	0.0182	0.0172	0.0130	0.003
38239	66.8675	0.6977	116.3391	103.365	139.439	2.532	0.0180	0.0171	0.0129	0.003
1332	65.6504	399.8236	119.1432	102.607	141.640	2.426	0.0183	0.0172	0.0130	0.004
38241	66.9108	0.7105	120.1155	102.770	141.282	2.502	0.0180	0.0171	0.0129	0.004
1334	65.6209	399.8096	121.5224	101.759	143.378	2.413	0.0183	0.0172	0.0130	0.004
38243	66.8878	0.6816	122.4841	101.936	143.024	2.487	0.0180	0.0171	0.0129	0.004
1338	65.6000	0.0031	123.9886	101.148	144.954	2.389	0.0185	0.0172	0.0130	0.004
38245	66.8552	0.8662	124.9569	101.338	144.608	2.465	0.0181	0.0171	0.0129	0.004
1339	65.4989	399.8120	175.5571	100.183	146.129	2.412	0.0179	0.0173	0.0130	0.005
38247	66.8260	0.6923	176.5035	100.565	146.027	2.486	0.0178	0.0173	0.0129	0.005
1340	65.4969	399.8588	199.3499	98.779	145.678	2.452	0.0176	0.0177	0.0130	0.005
38249	66.8092	0.7499	200.3170	99.170	145.723	2.527	0.0174	0.0177	0.0129	0.005
1342	65.5466	399.8766	220.2249	96.884	144.928	2.465	0.0172	0.0180	0.0130	0.005
38251	66.8658	0.7584	221.1900	97.240	145.097	2.540	0.0171	0.0179	0.0129	0.005
1344	65.5336	399.8318	221.3055	95.773	144.621	2.433	0.0173	0.0180	0.0130	0.006
38253	66.8537	0.7117	222.2711	96.127	144.795	2.508	0.0171	0.0179	0.0129	0.005

Al.2 Puntos de apoyo obtenidos por topografía

Listado de coordenadas en sistema ENU^G de las dianas situadas en el campo de calibración, obtenidas por topografía.

ID Pto	X	Y	Z
1	99.4786	139.3107	-0.9526
2	98.2548	138.6555	-0.9976
3	96.9955	138.2237	-0.9956
4	96.3358	139.8031	-0.9896
5	96.038	140.6738	-0.9996
6	97.1939	141.1839	-0.9856
7	98.3515	141.6248	-0.9696
8	98.9989	140.3706	-0.9656
9	94.8468	139.4571	0.0204
10	94.1494	141.6113	0.0264
11	96.7613	142.5982	0.0174
12	99.4412	143.374	0.0234
14	101.2553	138.2091	0.0244
15	98.6818	137.2231	0.0264
16	96.1438	136.2915	0.0234
17	95.1955	138.4546	0.0224
21	102.3512	140.7665	0.9504
22	100.858	144.9702	0.9234
23	99.3006	145.469	0.9504
24	96.9025	144.3389	0.9824
25	93.8615	143.1721	0.9404
101	97.5442	139.9348	-1.8066
102	102.0725	137.1267	0.6694
103	98.5276	135.8363	0.6214
104	95.3486	134.3339	0.8764
105	93.5406	138.2138	0.8264
108	99.0579	144.9585	0.7814
112	96.2422	136.7879	-0.1796
113	99.0975	137.7484	-0.1986
115	94.8328	141.0448	-0.4196
1107	96.3564	144.0516	0.8824
1111	95.4714	139.0825	-0.5116
1116	92.5151	141.3703	0.8264

Al.3 Puntos de apoyo obtenidos por fotogrametría

Listado de coordenadas 3D en sistema ENU^G calculados de las marcas codificadas y dianas situadas en el campo de calibración.

ID Pto	X	Y	Z	eX	eY	eZ
1	99.4649	139.2934	-0.9664	0.0005	0.0012	0.0017
2	98.2534	138.6527	-0.9977	0.0006	0.0010	0.0019
3	96.9956	138.2225	-0.9959	0.0007	0.0007	0.0022
4	96.3348	139.8022	-0.9898	0.0009	0.0009	0.0024
5	96.0368	140.6740	-1.0003	0.0011	0.0009	0.0025
6	97.1933	141.1843	-0.9851	0.0010	0.0011	0.0023
7	98.3490	141.6243	-0.9709	0.0009	0.0013	0.0020
8	98.9978	140.3691	-0.9660	0.0007	0.0012	0.0018
9	94.8522	139.4595	0.0211	0.0008	0.0006	0.0029
10	94.1465	141.6119	0.0263	0.0011	0.0008	0.0031
11	96.7585	142.5993	0.0177	0.0009	0.0012	0.0025
12	99.4401	143.3764	0.0241	0.0007	0.0016	0.0020
13	100.4756	140.7039	0.0211	0.0003	0.0014	0.0016
14	101.2556	138.2044	0.0250	0.0002	0.0012	0.0014
15	98.6803	137.2208	0.0277	0.0001	0.0008	0.0019
16	96.1454	136.2914	0.0241	0.0002	0.0004	0.0025
17	95.1960	138.4547	0.0230	0.0006	0.0005	0.0028
18	93.8872	136.9957	0.9760	0.0002	0.0001	0.0033
19	97.6036	134.9438	0.9791	0.0004	0.0005	0.0022
20	101.0294	136.1452	0.9523	0.0007	0.0010	0.0015
21	102.3524	140.7587	0.9486	0.0005	0.0015	0.0019
24	96.8991	144.3415	0.9827	0.0009	0.0014	0.0027
25	93.8587	143.1747	0.9394	0.0010	0.0009	0.0035
26	92.1522	142.5937	0.9161	0.0009	0.0003	0.0043
101	97.5432	139.9340	-1.8072	0.0010	0.0011	0.0021
102	102.0626	137.1207	0.6716	0.0005	0.0012	0.0013
103	98.5299	135.8394	0.6224	0.0003	0.0006	0.0020
104	95.3531	134.3385	0.8748	0.0003	0.0001	0.0029
105	93.5439	138.2147	0.8251	0.0005	0.0003	0.0033
106	92.5174	141.3728	0.8258	0.0010	0.0005	0.0037
107	96.3517	144.0538	0.8825	0.0009	0.0013	0.0028
108	99.0590	144.9598	0.7846	0.0007	0.0018	0.0022
109	100.6165	143.9454	0.6601	0.0004	0.0019	0.0018
110	102.2335	139.6426	0.6241	0.0003	0.0015	0.0013
111	95.4800	139.0867	-0.5095	0.0008	0.0007	0.0027
112	96.2445	136.7889	-0.1803	0.0001	0.0005	0.0027
113	99.0978	137.7469	-0.1980	0.0001	0.0010	0.0020
114	100.0065	140.8533	-0.2237	0.0004	0.0014	0.0018
115	94.8331	141.0457	-0.4201	0.0010	0.0008	0.0030

Al.4 Convergencia de ejes y distancia

Seguidamente se muestran los ángulos de convergencia de ejes y las distancias calculadas entre los sensores ópticos.

ID Foto	ID Foto	γ_x^g	γ_y^g	γ_z^g	$e\gamma_x^g$	$e\gamma_y^g$	$e\gamma_z^g$	Dist (m)	eDist (m)
38201	1296	1.2816	1.3297	1.8059	0.0020	0.0024	0.0023	0.401	0.000
38203	1298	1.2695	1.3228	1.7951	0.0021	0.0025	0.0024	0.402	0.000
38205	1300	1.2689	1.3245	1.7972	0.0021	0.0025	0.0024	0.402	0.000
38207	1301	1.2825	1.3210	1.7975	0.0020	0.0021	0.0021	0.402	0.000
38209	1302	1.2948	1.3102	1.7963	0.0026	0.0031	0.0030	0.401	0.000
38211	1304	1.2986	1.3332	1.8154	0.0030	0.0035	0.0034	0.401	0.000
38213	1306	1.2940	1.3322	1.8151	0.0030	0.0038	0.0036	0.401	0.000
38215	1308	1.2892	1.3385	1.8194	0.0033	0.0045	0.0041	0.402	0.000
38217	1310	1.2829	1.3277	1.8052	0.0031	0.0041	0.0038	0.402	0.000
38219	1312	1.2795	1.3366	1.8091	0.0029	0.0036	0.0034	0.402	0.000
38221	1314	1.3226	1.2789	1.7985	0.0025	0.0027	0.0027	0.401	0.000
38225	1316	1.3144	1.3014	1.8054	0.0022	0.0026	0.0024	0.401	0.000
38227	1318	1.3142	1.2958	1.8035	0.0021	0.0025	0.0023	0.402	0.000
38229	1320	1.3054	1.2908	1.7946	0.0022	0.0028	0.0025	0.403	0.000
38231	1322	1.3059	1.2948	1.8015	0.0021	0.0022	0.0022	0.402	0.000
38233	1324	1.2990	1.2895	1.7936	0.0021	0.0022	0.0021	0.403	0.000
38235	1326	1.3028	1.2814	1.7906	0.0022	0.0022	0.0022	0.402	0.000
38237	1328	1.3231	1.2940	1.8086	0.0024	0.0023	0.0024	0.401	0.000
38239	1330	1.3323	1.2996	1.8161	0.0027	0.0032	0.0030	0.400	0.000
38241	1332	1.3161	1.2858	1.7987	0.0028	0.0036	0.0033	0.401	0.000
38243	1334	1.2982	1.2909	1.7917	0.0027	0.0034	0.0032	0.403	0.000
38245	1338	1.2971	1.2742	1.7823	0.0032	0.0044	0.0039	0.402	0.000
38247	1339	1.2925	1.3524	1.8286	0.0023	0.0028	0.0027	0.403	0.000
38249	1340	1.3150	1.3368	1.8336	0.0023	0.0028	0.0026	0.400	0.000
38251	1342	1.3073	1.3421	1.8338	0.0023	0.0026	0.0026	0.401	0.000
38253	1344	1.3063	1.3432	1.8345	0.0023	0.0028	0.0027	0.401	0.000

Al.5 Parámetros internos calibrados de sensores ópticos

A continuación se muestran los parámetros de orientación interna de los sensores ópticos utilizados en el sistema fotogramétrico GNSS/INS. Los parámetros de calibración han sido obtenidos en bloques fotogramétricos calculados independientemente por modelo de cámara, tal y como se menciona en el apartado 3.7.1 Calibración sensores ópticos.

Resultados de calibración:

Cámara: Canon EOS-D60 Objetivo: 15 mm

Resolución: Ancho: 3072 píx. Alto: 2048 pix

Tamaño del sensor: Ancho: 22.7 mm Alto: 15.1 mm

Longitud focal: -2102.66 píx. (-15.52 mm) σ_f : 0.12 pix

Punto principal:

$$X_o = 9.92 \text{ pix} \quad \sigma_{x_o} : 0.11 \text{ píx.}$$

$$Y_o = -25.19 \text{ pix} \quad \sigma_{y_o} : 0.23 \text{ pix}$$

Distorsión radial:

$$K_1: 2.04101 \text{ E-08 pix}^{-2} \quad \sigma_{K_1}: 2.73634 \text{ E-11 pix}^{-2}$$

$$K_2: -2.05262 \text{ E-15 pix}^{-4} \quad \sigma_{K_2}: 8.91114 \text{ E-18 pix}^{-4}$$

$$K_3: 0.00 \text{ pix}^{-6} \quad \sigma_{K_3}: 0.00 \text{ pix}^{-6}$$

Distorsión tangencial:

$$P_1: 2.45193 \text{ E-07 pix}^{-1} \quad \sigma_{P_1}: 5.86511 \text{ E-09 pix}^{-1}$$

$$P_2: 0.00 \text{ pix}^{-1} \quad \sigma_{P_2}: 0.00 \text{ pix}^{-1}$$

Distorsión de afinidad:

$$B_1: 0.00 \text{ rad} \quad \sigma_{B_1}: 0.00 \text{ rad}$$

$$B_2: 0.00 \text{ rad} \quad \sigma_{B_2}: 0.00 \text{ rad}$$

Cámara: Canon EOS-1Ds Mark III Objetivo: 24mm

Resolución: Ancho: 5616 píx. Alto: 3744 pix

Tamaño del sensor: Ancho: 36 mm Alto: 24 mm

Longitud focal: -3817.43 píx. (-24.47 mm) σ_f : 0 .04 píx.

Punto principal:

$$X_o = -31.14 \text{ pix} \quad \sigma_{x_o} : 0.04 \text{ píx.}$$

$$Y_o = 20.07 \text{ pix} \quad \sigma_{y_o} : 0.07 \text{ pix}$$

Distorsión radial:

$$K_1: 7.72153 \text{ E-09 pix}^{-2} \quad \sigma_{K_1}: 2.36031 \text{ E-12 pix}^{-2}$$

$$K_2: -5.05678 \text{ E-16 pix}^{-4} \quad \sigma_{K_2}: 2.471671 \text{ E-19 pix}^{-4}$$

$$K_3: 0.00 \text{ pix}^{-6} \quad \sigma_{K_3}: 0.00 \text{ pix}^{-6}$$

Distorsión tangencial:

$$P_1: 1.17879 \text{ E-07 pix}^{-1} \quad \sigma_{P_1}: 1.07108 \text{ E-09 pix}^{-1}$$

$$P_2: 0.00 \text{ pix}^{-1} \quad \sigma_{P_2}: 0.00 \text{ pix}^{-1}$$

Distorsión de afinidad: B_1 : 0.00 rad σ_{B1} : 0.00 rad B_2 : 0.00 rad σ_{B2} : 0.00 rad**AI.6 Parámetros calibrados del sistema fotogramétrico GNSS/INS**

En las siguientes tablas se muestra la orientación de las cámaras respecto a la plataforma y su posición respecto a la IMU.

Tabla 19 Orientación Canon EOS-1Ds Mark III 24mm

	ω	ϕ	λ	a_x	a_y	a_z
	0.3090	0.4354	0.0073	-0.171	0.149	0.098
error	0.0158	0.0093	0.0211	0.001	0.002	0.001

Tabla 20 Orientación Canon EOS-D60 15mm

	ω	ϕ	λ	a_x	a_y	a_z
	0.3148	0.4837	399.9642	0.222	0.204	0.054
error	0.0575	0.0342	0.0760	0.003	0.007	0.004

Desalineamiento entre los ejes de las cámaras y los ejes de la IMU:

Tabla 21 Desalineamiento Canon EOS-1Ds Mark III 24mm

	$d\omega$	$d\phi$	$d\chi$
	-1.0957	0.0859	0.3561
error	0.0156	0.0210	0.0093

Tabla 22 Desalineamiento Canon EOS-D60 15mm

	$d\omega$	$d\phi$	$d\chi$
	0.1983	0.3176	1.5570
error	0.0577	0.0761	0.0341

Posición centro de fase de la antena GNSS respecto al IMU

Tabla 23 Desfase GNSS-IMU

	b_x	b_y	b_z
	-0.005	-0.010	0.145
error	0.001	0.002	0.001

Traslación GNSS:

Tabla 24 Traslación GNSS

	t_x	t_y	t_z
	-0.023	0.110	0.060
error	0.002	0.002	0.002

Deriva GNSS:

Tabla 25 Deriva GNSS

	d_x	d_y	d_z
	0.001	-0.004	-0.005
error	0.000	0.000	0.00

Anejo II Parámetros de orientación externa de sensores ópticos

All.1 Datos necesarios para la georreferenciación de la zona de estudio

Fecha de toma de datos: 18-07-2012

Definición del Sistema Geodésico Local:

- Coordenadas Geodésicas:
 - Latitud = 39° 28' 46"9626
 - Longitud = -0° 20' 18"8715
 - Altura elipsoidal = 59.209 m
 - Huso = 30
- Coordenadas Locales:
 - X=100
 - Y=100
 - Z=3

Elipsoide de referencia:

- Nombre : WGRS84
- Semieje Mayor: 6378137.000 m
- Aplanamiento: 1/298.2572221008827

Declinación magnética: -0° 27'46"467576 -0°.46290766 (grados sex)

All.2 Georreferenciación directa sin constreñimientos

Tabla 26 Orientación externa sin constreñimientos

	ω	ϕ	λ	X_{UTM}	Y_{UTM}	h
1296	64.1860	399.9240	224.4097	728902.702	4373438.486	58.600
(+/-)	0.0102	0.0211	0.0199	0.002	0.001	0.002
1298	62.6409	399.2463	228.1651	728901.726	4373438.057	58.719
(+/-)	0.0142	0.0341	0.0292	0.003	0.001	0.001
1300	63.7019	0.4130	240.9609	728900.678	4373437.469	58.633
(+/-)	0.0111	0.0159	0.0193	0.002	0.001	0.001
1301	63.7674	399.6938	280.8918	728899.562	4373436.915	58.613
(+/-)	0.0044	0.0053	0.0059	0.000	0.001	0.001
1302	63.7081	0.0676	289.3905	728899.491	4373435.599	58.539
(+/-)	0.0145	0.0080	0.0092	0.001	0.001	0.002
1304	63.7346	1.0283	316.4394	728900.179	4373434.319	58.610
(+/-)	0.0116	0.0233	0.0217	0.001	0.002	0.001
1306	63.5889	0.0824	322.4901	728900.673	4373432.940	58.659
(+/-)	0.0121	0.0302	0.0317	0.002	0.003	0.003
1308	63.7120	0.0478	317.5626	728901.229	4373431.623	58.637
(+/-)	0.0091	0.0280	0.0280	0.001	0.003	0.001
1310	63.8248	399.9280	337.7286	728901.813	4373430.004	58.669

(+/-)	0.0077	0.0192	0.0193	0.002	0.002	0.001
1312	63.8930	399.8120	349.0688	728902.584	4373428.377	58.626
(+/-)	0.0057	0.0076	0.0098	0.001	0.001	0.000
1314	65.6913	399.8410	378.2067	728903.457	4373427.803	58.572
(+/-)	0.0074	0.0101	0.0173	0.002	0.001	0.001
1316	65.6409	399.7681	11.0359	728904.926	4373428.488	58.574
(+/-)	0.0143	0.0218	0.0291	0.003	0.001	0.002
1318	65.6189	399.1412	16.4930	728905.962	4373428.914	58.606
(+/-)	0.0085	0.0268	0.0276	0.002	0.001	0.001
1320	65.7513	0.0939	17.5124	728907.286	4373429.634	58.618
(+/-)	0.0234	0.0545	0.0568	0.005	0.005	0.008
1322	65.6569	399.8943	24.0688	728909.049	4373430.200	58.656
(+/-)	0.0173	0.0495	0.0496	0.004	0.004	0.004
1324	65.7882	0.1329	40.1779	728910.544	4373430.848	58.635
(+/-)	0.0291	0.0440	0.0430	0.003	0.004	0.005
1326	65.9225	399.5273	52.6548	728911.618	4373431.106	58.607
(+/-)	0.0199	0.0319	0.0237	0.003	0.001	0.003
1328	65.9652	0.3033	96.8475	728911.890	4373432.994	58.603
(+/-)	0.0218	0.0264	0.0316	0.002	0.003	0.002
1330	64.8527	399.6069	115.8990	728911.221	4373434.454	58.814
(+/-)	0.0300	0.0340	0.0560	0.002	0.005	0.005
1332	65.7429	0.1660	119.4817	728910.468	4373436.241	58.617
(+/-)	0.0365	0.0678	0.0457	0.004	0.004	0.005
1334	65.4256	399.4515	120.8374	728909.624	4373437.927	58.663
(+/-)	0.0065	0.0145	0.0170	0.001	0.002	0.001
1338	65.4726	0.4228	124.1830	728908.921	4373439.511	58.605
(+/-)	0.0276	0.0495	0.0458	0.002	0.003	0.003
1339	65.4720	399.8335	175.1304	728907.919	4373440.634	58.615
(+/-)	0.0106	0.0166	0.0159	0.001	0.001	0.002
1340	62.9115	399.8763	200.0166	728906.523	4373440.089	58.805
(+/-)	0.2934	0.1487	0.2003	0.013	0.008	0.014
1342	65.6141	399.8265	220.1947	728904.678	4373439.339	58.668
(+/-)	0.0111	0.0499	0.0439	0.004	0.002	0.002
1344	65.5851	399.8411	221.2994	728903.586	4373439.001	58.637
(+/-)	0.0166	0.0390	0.0334	0.003	0.002	0.003
38201	65.5476	0.5492	225.1077	728903.076	4373438.691	58.662
(+/-)	0.0005	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38203	65.1126	0.7053	229.3152	728902.039	4373438.259	58.689
(+/-)	0.0006	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38205	65.1685	0.7400	241.2807	728901.025	4373437.794	58.693
(+/-)	0.0006	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38207	65.2035	0.7027	282.2203	728899.604	4373437.205	58.661
(+/-)	0.0005	0.0006	0.0004	0.000	0.000	0.000
38209	64.9914	0.8093	290.0563	728899.503	4373436.039	58.623
(+/-)	0.0005	0.0006	0.0005	0.000	0.000	0.000
38211	65.0224	0.6966	316.2530	728900.029	4373434.773	58.660
(+/-)	0.0006	0.0006	0.0004	0.000	0.000	0.000
38213	65.0453	0.7118	323.1244	728900.500	4373433.321	58.693
(+/-)	0.0006	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38215	65.0704	0.7342	318.3407	728901.071	4373432.002	58.698
(+/-)	0.0005	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38217	65.1793	0.6984	338.5030	728901.551	4373430.316	58.727
(+/-)	0.0005	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38219	65.2087	0.6275	349.9027	728902.267	4373428.621	58.700
(+/-)	0.0005	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38221	66.9833	0.6191	378.9642	728903.060	4373427.884	58.639
(+/-)	0.0005	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38225	66.9098	0.7157	12.0778	728904.548	4373428.358	58.651
(+/-)	0.0006	0.0006	0.0004	0.000	0.000	0.000
38227	66.9499	0.6607	18.1381	728905.655	4373428.779	58.664
(+/-)	0.0005	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38229	66.9002	0.7314	18.1676	728906.886	4373429.426	58.740
(+/-)	0.0005	0.0006	0.0004	0.000	0.000	0.000
38231	66.9061	0.6786	24.9210	728908.703	4373430.002	58.727
(+/-)	0.0006	0.0006	0.0005	0.000	0.000	0.000
38233	66.9907	0.6898	40.8505	728910.247	4373430.548	58.723
(+/-)	0.0005	0.0006	0.0004	0.000	0.000	0.000

38235	67.0419	0.6327	53.5473	728911.415	4373430.772	58.705
(+/-)	0.0004	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38237	66.8160	0.6712	97.1298	728911.931	4373432.507	58.721
(+/-)	0.0004	0.0006	0.0004	0.000	0.000	0.000
38239	66.8748	0.6961	116.3195	728911.308	4373434.037	58.739
(+/-)	0.0005	0.0006	0.0004	0.000	0.000	0.000
38241	66.9210	0.7122	120.0973	728910.660	4373435.861	58.710
(+/-)	0.0006	0.0006	0.0005	0.000	0.000	0.000
38243	66.8979	0.6822	122.4664	728909.775	4373437.579	58.695
(+/-)	0.0006	0.0006	0.0005	0.000	0.000	0.000
38245	66.8683	0.8643	124.9368	728909.131	4373439.145	58.672
(+/-)	0.0006	0.0006	0.0005	0.000	0.000	0.000
38247	66.8347	0.6857	176.4835	728908.317	4373440.541	58.693
(+/-)	0.0005	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38249	66.8135	0.7409	200.2980	728906.931	4373440.196	58.735
(+/-)	0.0005	0.0005	0.0004	0.000	0.000	0.000
38251	66.8706	0.7485	221.1703	728905.019	4373439.514	58.747
(+/-)	0.0006	0.0006	0.0005	0.000	0.000	0.000
38253	66.8586	0.6998	222.2506	728903.916	4373439.180	58.715
(+/-)	0.0007	0.0006	0.0005	0.000	0.000	0.000

All.3 Georreferenciación directa con constreñimientos

Tabla 27 Orientación externa con constreñimientos

	ω	ϕ	λ	X_{UTM}	Y_{UTM}	h
1296	64.2621	399.6496	224.1694	728902.735	4373438.493	58.586
(+/-)	0.0011	0.0023	0.0018	0.001	0.001	0.001
1298	63.8239	399.8044	228.3796	728901.714	4373438.037	58.609
(+/-)	0.0011	0.0024	0.0019	0.000	0.000	0.001
1300	63.8792	399.8435	240.3409	728900.746	4373437.516	58.615
(+/-)	0.0011	0.0024	0.0019	0.001	0.000	0.001
1301	63.9178	399.7696	281.3203	728899.539	4373436.814	58.591
(+/-)	0.0010	0.0021	0.0017	0.000	0.000	0.000
1302	63.7019	399.9060	289.1224	728899.490	4373435.645	58.548
(+/-)	0.0010	0.0024	0.0019	0.001	0.000	0.000
1304	63.7349	399.7909	315.3213	728900.176	4373434.407	58.585
(+/-)	0.0012	0.0024	0.0020	0.001	0.000	0.001
1306	63.7578	399.8041	322.1935	728900.694	4373432.979	58.610
(+/-)	0.0011	0.0026	0.0021	0.001	0.001	0.001
1308	63.7823	399.8307	317.4064	728901.233	4373431.643	58.620
(+/-)	0.0011	0.0024	0.0019	0.001	0.001	0.001
1310	63.8915	399.7973	337.5666	728901.815	4373430.023	58.651
(+/-)	0.0011	0.0024	0.0019	0.001	0.001	0.001
1312	63.9223	399.7242	348.9678	728902.580	4373428.381	58.623
(+/-)	0.0011	0.0023	0.0019	0.000	0.000	0.000
1314	65.6971	399.7406	378.0057	728903.448	4373427.806	58.570
(+/-)	0.0010	0.0025	0.0019	0.000	0.000	0.000
1316	65.6219	399.8368	11.1196	728904.922	4373428.485	58.579
(+/-)	0.0011	0.0027	0.0020	0.000	0.001	0.001
1318	65.6624	399.7853	17.1773	728906.014	4373428.943	58.591
(+/-)	0.0011	0.0024	0.0019	0.000	0.001	0.001
1320	65.6118	399.8536	17.2087	728907.246	4373429.589	58.666
(+/-)	0.0011	0.0028	0.0021	0.001	0.002	0.002
1322	65.6185	399.8004	23.9626	728909.050	4373430.196	58.664
(+/-)	0.0011	0.0026	0.0020	0.001	0.002	0.002
1324	65.7029	399.8138	39.8903	728910.532	4373430.823	58.655
(+/-)	0.0011	0.0028	0.0021	0.001	0.001	0.002
1326	65.7549	399.7565	52.5877	728911.637	4373431.099	58.634
(+/-)	0.0010	0.0027	0.0021	0.001	0.000	0.001
1328	65.5283	399.7924	96.1720	728911.897	4373432.901	58.650

Orientación espacial de múltiples sensores integrados con restricciones geométricas

(+/-)	0.0010	0.0027	0.0020	0.001	0.000	0.001
1330	65.5866	399.8191	115.3603	728911.158	4373434.402	58.667
(+/-)	0.0010	0.0027	0.0020	0.001	0.001	0.001
1332	65.6327	399.8348	119.1381	728910.491	4373436.219	58.641
(+/-)	0.0011	0.0028	0.0021	0.001	0.001	0.001
1334	65.6096	399.8095	121.5042	728909.587	4373437.926	58.621
(+/-)	0.0011	0.0027	0.0021	0.000	0.000	0.001
1338	65.5775	399.9880	123.9767	728908.935	4373439.488	58.604
(+/-)	0.0012	0.0028	0.0021	0.001	0.001	0.001
1339	65.5464	399.8076	175.5251	728907.933	4373440.630	58.614
(+/-)	0.0010	0.0027	0.0020	0.000	0.001	0.001
1340	65.5248	399.8597	199.3422	728906.542	4373440.137	58.654
(+/-)	0.0011	0.0027	0.0021	0.000	0.001	0.001
1342	65.5820	399.8682	220.2138	728904.667	4373439.337	58.672
(+/-)	0.0012	0.0025	0.0019	0.001	0.001	0.001
1344	65.5703	399.8223	221.2920	728903.570	4373438.993	58.635
(+/-)	0.0013	0.0027	0.0021	0.001	0.001	0.002
38201	65.5474	0.5495	225.1077	728903.076	4373438.691	58.662
(+/-)	0.0009	0.0008	0.0007	0.000	0.000	0.000
38203	65.1122	0.7058	229.3152	728902.039	4373438.259	58.689
(+/-)	0.0009	0.0008	0.0006	0.000	0.000	0.000
38205	65.1685	0.7403	241.2806	728901.025	4373437.794	58.693
(+/-)	0.0009	0.0008	0.0006	0.000	0.000	0.000
38207	65.2038	0.7034	282.2198	728899.604	4373437.205	58.660
(+/-)	0.0007	0.0009	0.0006	0.000	0.000	0.000
38209	64.9915	0.8097	290.0563	728899.503	4373436.039	58.623
(+/-)	0.0008	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000
38211	65.0226	0.6969	316.2529	728900.029	4373434.773	58.660
(+/-)	0.0010	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000
38213	65.0453	0.7120	323.1242	728900.500	4373433.321	58.693
(+/-)	0.0009	0.0008	0.0006	0.000	0.000	0.000
38215	65.0706	0.7343	318.3405	728901.071	4373432.002	58.698
(+/-)	0.0008	0.0009	0.0006	0.000	0.000	0.000
38217	65.1795	0.6985	338.5029	728901.551	4373430.316	58.727
(+/-)	0.0008	0.0008	0.0006	0.000	0.000	0.000
38219	65.2089	0.6275	349.9026	728902.267	4373428.621	58.700
(+/-)	0.0008	0.0008	0.0007	0.000	0.000	0.000
38221	66.9835	0.6190	378.9641	728903.060	4373427.884	58.639
(+/-)	0.0008	0.0008	0.0007	0.000	0.000	0.000
38225	66.9099	0.7155	12.0776	728904.548	4373428.358	58.651
(+/-)	0.0009	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000
38227	66.9500	0.6606	18.1380	728905.655	4373428.779	58.664
(+/-)	0.0008	0.0008	0.0006	0.000	0.000	0.000
38229	66.9002	0.7312	18.1676	728906.886	4373429.426	58.740
(+/-)	0.0009	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000
38231	66.9061	0.6784	24.9210	728908.703	4373430.002	58.727
(+/-)	0.0009	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000
38233	66.9908	0.6898	40.8506	728910.247	4373430.548	58.723
(+/-)	0.0008	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000
38235	67.0419	0.6327	53.5475	728911.415	4373430.772	58.705
(+/-)	0.0007	0.0008	0.0006	0.000	0.000	0.000
38237	66.8159	0.6710	97.1298	728911.930	4373432.507	58.721
(+/-)	0.0007	0.0009	0.0006	0.000	0.000	0.000
38239	66.8747	0.6960	116.3195	728911.308	4373434.037	58.739
(+/-)	0.0008	0.0009	0.0006	0.000	0.000	0.000
38241	66.9209	0.7119	120.0972	728910.660	4373435.861	58.710
(+/-)	0.0009	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000
38243	66.8980	0.6820	122.4663	728909.775	4373437.579	58.695
(+/-)	0.0009	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000
38245	66.8682	0.8640	124.9366	728909.131	4373439.144	58.672
(+/-)	0.0009	0.0010	0.0008	0.000	0.000	0.000
38247	66.8343	0.6856	176.4834	728908.317	4373440.541	58.693
(+/-)	0.0008	0.0008	0.0006	0.000	0.000	0.000
38249	66.8131	0.7410	200.2980	728906.931	4373440.196	58.735
(+/-)	0.0009	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000
38251	66.8704	0.7487	221.1703	728905.019	4373439.514	58.747
(+/-)	0.0010	0.0009	0.0007	0.000	0.000	0.000

38253	66.8583	0.7001	222.2506	728903.916	4373439.180	58.715
(+/-)	0.0011	0.0009	0.0008	0.000	0.000	0.000

Anejo III Listado de publicaciones relacionadas con esta Tesis

En el siguiente Anejo se citan las publicaciones relacionadas total o parcialmente con esta Tesis realizadas por el autor.

1. Lerma J. Navarro S., Cabrelles M. Seguí A. CAMERA CALIBRATION WITH BASELINE DISTANCE CONSTRAINTS. *Junio 2010. The Photogrammetric Record 25(130): pp 140-158* .
2. Garcia-Asenjo, L. Lerma, J.L. Garrigues, P. Baselga, S. Cabrelles, M. Hernandez, D. Buchon, F, Navarro S. INTEGRATION OF A GNSS AND LOW COST NAVIGATION SYSTEM FOR DIRECT GEOREFERENCING OF TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRIC IMAGINERY. *IX Congreso Nacional TOP-CART Valencia 2008*.
3. Lerma, J.L., Navarro, S., Cabrelles, M., Seguí, A.E., Hernández, D., 2013. AUTOMATIC ORIENTATION AND 3D MODELLING FROM MARKERLESS ROCK ART IMAGERY. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 76: pp 64-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.08.002>*.
4. Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., Seguí, A.E., Haddad, N. and Akasheh, T., 2011. INTEGRATION OF LASER SCANNING AND IMAGERY FOR PHOTOREALISTIC 3D ARCHITECTURAL DOCUMENTATION. *In: Laser Scanning, Theory and Applications (Chau-Chang Wang, Ed.). Intech, pp. 414-430*.
5. Cabrelles, M., Seguí, A. E., Navarro, S., Galcerá, S., Portalés, C. and Lerma, J. L., 2010. 3D PHOTOREALISTIC MODELLING OF STONE MONUMENTS BY DENSE IMAGE MATCHING. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, pp.121-124. Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK*.
6. Lerma, J.L., Navarro, S., Cabrelles, M. and Villaverde, V., 2010. TERRESTRIAL LASER SCANNING AND CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR 3D ARCHEOLOGICAL DOCUMENTATION: THE UPPER PALAEOLITHIC CAVE OF PARPALLÓ AS A CASE STUDY. *Journal of Archaeological Science, 37(3): pp 499-507*.
7. Portalés, C., Lerma, J.L. and Navarro, S., 2010. AUGMENTED REALITY AND PHOTOGRAMMETRY: A SYNERGY TO VISUALIZE PHYSICAL AND VIRTUAL CITY ENVIRONMENTS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(1): pp 132-142, DOI:10.1016/j.isprsjprs.2009.10.001*.