

OBTENCIÓN DE GEOINFORMACIÓN A PARTIR DE LA CÁMARA DIGITAL NO MÉTRICA NIKON D1H

Ingeniero Catastral y Geodesta Alexander Mogollón Díaz^{1*}

Capitán de Fragata Julián Augusto Reyna Moreno^{2*}

División de Zona Costera^{1*}. Director CCCP^{2*}, Centro Control Contaminación del Pacífico - CCCP

Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia

Tél: +52 (2) 727 26 37, Fax: +57 (2) - 727 11 80

e-mail: cccp@cccp.org.co amogollon@cccp.org.co^{1*} jreyna@cccp.org.co^{2*}

Recibido en septiembre de 2004; aceptado en septiembre de 2004

RESUMEN

El Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP, desarrolló e implementó una metodología para la captura de datos espaciales en plataformas aerotransportadas a partir del uso del sensor Dispositivo de Carga Acoplada o Dispositivo Electrónico Fotosensible, CCD (por sus siglas en inglés). El proceso metodológico incluye el diseño y elaboración del dispositivo mecánico de soporte, el cual se ensambló asegurando la ortogonalidad del lente de la cámara con el terreno, en las plataformas aéreas de la Armada Nacional, en el momento del vuelo, así como la adaptación del hardware y software específico que permite la intercomunicación entre el Sistema de Posicionamiento Global, GPS (por sus siglas en inglés), el computador personal el sensor para obtener fotografías controladas en tiempo real. Para lograr una mejor exactitud posicional se georreferenciaron las fotografías, a partir de una corrección diferencial satelital, utilizando el servicio gratuito de Wide Area Augmentation System, WAAS (por sus siglas en inglés). Éste permite obtener las coordenadas geográficas del punto principal de la foto, referenciadas al WGS 84 (World Geodetic System, 1984), reduciendo el trabajo de fotocontrol necesario para aplicar las ecuaciones de colinearidad. Una vez obtenidas las fotografías, se realizan procesos de calibración del sensor en función de la distancia focal de la cámara en el momento de la toma, para, posteriormente, realizar un ajuste por mínimos cuadrados que permita reducir al máximo la distorsión radial del lente de la cámara Nikon D1H. Las primeras fotografías se utilizaron para calibrar la totalidad del sistema (captura, georreferenciación y calibración del sensor). Sobre la base de los resultados alcanzados en la fase de experimentación, se realizó el diseño de vuelo final sobre el municipio de Tumaco, controlando la altura de vuelo y la velocidad de la plataforma aérea (helicóptero Huey), así como el tiempo de obturación, manteniendo un traslape transversal y longitudinal en cada toma del 60 y el 25%, respectivamente. Como resultado principal se obtuvo una panorámica del borde costero de Tumaco, con una exactitud posicional dentro de los rangos esperados por los investigadores¹, útil para el proceso de actualización y generación de cartografía para la Dirección General Marítima, DIMAR, o para cualquier entidad que tenga interés en obtener información de esta región del país. Otro uso potencial que tiene el resultado de esta investigación se basa en la nitidez de la información de captura del sensor CCD, convirtiendo este producto en una herramienta de planeación táctica militar, si se aprovecha la resolución espacial y la combinación de diferentes rangos espectrales de las fotografías obtenidas.

Palabras claves: Sensor CCD, Corrección Diferencial, Helicóptero Huey, Rango Espectral, Panorámica, Exactitud Posicional.

ABSTRACT

The Pacific Contamination Control Center, CCCP, developed and implemented a methodology to capture space data from airborne platforms with the use of a CCD sensor (Charge Coupled Device). The methodological process includes the design and elaboration of a mechanical device of support, which was assembled to ensure the orthogonality of the camera's lens with respect to land, on board Colombian Army air platforms, during flight, and adapting hardware and specific software to support intercommunication between the GPS, the PC and the CCD, to obtain real time controlled photos. In order to obtain better accuracy, the photos were georeferenced from a differential satellital correction using WAAS's (Wide Area Augmentation System) free service. This system allows obtaining geographical coordinates of the main point of the picture referenced in WGS 84, reducing the necessary photocontrol to apply colinearity equations. Photos are then taken through processes such as calibration of sensor in function of the focal distance of the camera and adjustment by the minimum square method to reduce radial distortion of de lens. The first photos were used to calibrate the system (capture, georeference and calibration of the sensor). Based on the results obtained during the experimentation phase, a flight pattern was designed over the municipality of Tumaco, controlling the flight height and the speed of the air platform (Huey helicopters), as well as the time of exposure, keeping a transversal and longitudinal overlap of 60% and 25% respectively in each exposure. As main result a panoramic view was obtained with an accuracy expected by investigators, of the coastal border of Tumaco², useful to DIMAR in the process of generating and updating cartography, or for any entity that has an interest in obtaining information of this region of the country. Another potential use of this investigation is based on the sharpness of the information captured by the sensor; transforming this product, into a military tool, if advantage is taken of the space resolution and the combination of different spectral ranges of the photos obtained.

Key words: CCD Sensor, Differential Correction, Huey Helicopter, Spectral Range, Panoramic, Positional Accuracy.

INTRODUCCIÓN

A escala nacional el espacio geográfico del litoral Pacífico colombiano no cuenta con una información descriptiva apropiada, la situación es tan particular que el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, no cuenta con la totalidad de los mapas de esta región, a escalas que permitan observar en detalle los aspectos físico-bióticos predominantes; obstaculizando la generación de programas de desarrollo sostenible y disminuyendo la posibilidad de mejorar la calidad de vida de los pobladores de este sector deprimido del país.

Esta situación es consecuencia de los pocos bienes y servicios industriales generados por la zona, lo cual no despierta en el ámbito gubernamental o privado un interés particular para el desarrollo de la región. Esto, sumado a las características meteorológicas propias del Pacífico colombiano, donde la nubosidad predomina durante la mayor parte del año, hace que los proyectos cartográficos convencionales no se aborden con facilidad, dada la consecuente interferencia que este fenómeno atmosférico presenta para los sensores aerofotográficos.

Consciente de esta situación, el CCCP, en calidad de centro de investigaciones adscrito a la DIMAR, y comprometido con la problemática social del litoral Pacífico colombiano, investigó métodos alternativos para la captura de información geoespacial, labor que culminó con la obtención de varios métodos de tecnología espacial, basados en la utilización de sensores remotos como LIDAR, CASI y RADARSAT, cuya implementación resulta costosa para ser desarrollada de manera inmediata por el CCCP.

En aras de obtener un resultado rápido y acorde con el presupuesto asignado para este tipo de investigaciones, se trabajó en la implementación de un dispositivo mecánico ensamblado a las plataformas aéreas dispuestas por la Armada de la República de Colombia, el cual soporta una cámara no métrica (Nikon D1H), con el fin de capturar datos en tiempo real, con una resolución espacial de hasta 0.5 m, acompañado de un proceso de georreferenciación cinemático, como método apropiado de corrección geométrica por la densa vegetación predominante y la intrincada topografía resultante de la presencia de manglares, esteros y desembocaduras de ríos que dificultan los controles terrestres.

Con este dispositivo mecánico y una apropiada metodología de uso, el CCCP contribuye a la caracterización del litoral Pacífico colombiano, obteniendo información descriptiva de referencia a escala detallada o semidetallada, la cual puede ser utilizada para facilitar la labor legal de la DIMAR, determinando el estado de ocupación de los bienes de uso público bajo su jurisdicción; así como por entidades locales y nacionales (Planeación Nacional y corporaciones autónomas regionales, entre otras), con interés en propiciar planes de desarrollo en esta región costera del país.

Este método resulta útil para la propia Armada Nacional en la planeación y ejecución de operaciones militares, contribuyendo como centro de investigaciones del Estado a la resolución del conflicto interno del país, con aportes técnico-científicos.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de esta investigación corresponde al borde costero noroccidental del municipio de San Andrés de Tumaco (Fig. 1).

El criterio de selección del área de estudio se basó en definir un espacio geográfico que reuniera las características propias del Pacífico colombiano (nubosidad y mediana pluviométrica) cercano a las instalaciones del CCCP, que facilitará la verificación de campo, necesaria para inferir la exactitud posicional de las fotos captadas y probar el sistema en su totalidad, sin incurrir en costos de traslado a puntos geográficos distanciados del centro de investigaciones. Igualmente, esta área representa gran importancia para la DIMAR, 50 m de la parte continental medidos desde la línea de más alta marea que pertenecen a su jurisdicción.

Sin embargo, esta metodología es adaptable a cualquier área geográfica del litoral Pacífico colombiano, con sólo variar los parámetros del diseño de vuelo, adaptándolos a cada zona en un espacio-tiempo apropiado.

METODOLOGÍA

La investigación realizada para la captura de información geoespacial, con la cámara digital no métrica Nikon D1H, se abordó a partir de ocho pasos fundamentales descritos a continuación:

1. Obtención de la plataforma aérea

La primera variable a despejar en el desarrollo de esta investigación fue la determinación de la plataforma aérea a utilizar. Siendo lo más recomendable en este tipo de proyectos el uso de aviones pequeños, por su tamaño y facilidad para mantener la línea de vuelo planificada. Sin embargo, el proyecto se realizó con recursos propios, por tal razón se experimentó el montaje del sistema de captura desde otro tipo de plataforma aérea. Así el CCCP se supeditó al apoyo que la Policía Nacional y las Fuerzas Militares prestaron para llevar a cabo el experimento. Dichas entidades, conscientes de la importancia del trabajo, colocaron a disposición del proyecto helicópteros Huey (Fig. 2).

Las condiciones de uso del helicóptero restringían los cambios internos o externos que alteraran el diseño físico de la máquina, con esta exigencia abrir el típico agujero del tamaño del lente de la cámara en el fuselaje para toma de aerofotografía no era viable. Esto exigió una ingeniosa etapa de diseño de un dispositivo mecánico que no alterara las condiciones propias del helicóptero y soportara el sensor, adecuándose al propósito de la investigación, capturando información geoespacial con una exactitud posicional aceptable para los fines de control de los litorales de DIMAR, y el planeamiento y ejecución de operaciones militares.

2. Diseño y elaboración del dispositivo mecánico de soporte de la cámara digital Nikon D1H

La estructura y la forma de la plataforma aérea disponible para la investigación se convirtieron en la directriz del diseño del sistema de captura.

Así, sobre la forma aerodinámica y geométrica de dicha plataforma se inició el diseño de un dispositivo mecánico escualizable, con el fin de ser adaptado a los helicópteros Huey, sin descuidar la posibilidad de acople a otras plataformas aéreas disponibles por la Armada Nacional. Esto justifica la forma modular del dispositivo mecánico, minimizando el problema de la falta de un helicóptero Huey a futuro.

Con el concepto de esta idea patrón, el diseño del dispositivo se inició con la toma de fotografías

de la planta y del perfil de la aeronave, a escala; partiendo de un criterio multidisciplinario se concluyó que la alternativa más viable, desde el punto de vista físico, era la adaptación de un brazo mecánico ensamblado, rigidamente, a la plataforma tubular, la misma donde se ubica el dispositivo bélico de defensa del helicóptero (ametralladora M-60), el cual a su vez soportará un módulo de nivelación y otro de almacenamiento del sensor (Fig. 3).

Para consolidar la totalidad del ensamble mecánico se tuvieron en cuenta aspectos tales como:

Cálculo del momento³: Proceso físico geométrico que permite identificar la componente de fuerza generada por la acción del viento para evitar la rotación del brazo mecánico en el momento de la toma de las fotos aéreas (Mc Lachalan, 1951), o el aumento de las gravedades ejercidas sobre el dispositivo al aterrizar o despegar. En la Figura 4 se representa el vector L (momento de inercia), calculado en el CCCP, teniendo los valores de la masa del soporte mecánico de la cámara y la velocidad aproximada con la que se desplaza la aeronave, de tal manera que se puede aplicar la ecuación $L = r \cdot mv$

Adaptabilidad del sensor: Conjunto de medidas realizadas al cuerpo de la cámara digital Nikon D1H, para ser transferidas al diseño del soporte mecánico que la almacena durante la toma de datos. Estas medidas garantizan que el sensor CCD de la cámara se adapte al proceso.

Adaptabilidad de la plataforma: Conjunto de medidas realizadas al cuerpo del helicóptero para ser transferidas al diseño de soporte de la cámara Nikon D1H, asegurando la perfecta adaptabilidad a la forma de la plataforma aérea.

Horizonte del lente de la cámara: El helicóptero Huey cuenta con dos patines de un diámetro aproximado de 30 cm, los cuales sobresalen 40 cm del extremo izquierdo y derecho del fuselaje de la aeronave. Para mantener la visual de la cámara Nikon D1H, con un horizonte despejado de 180°, se diseñó el brazo con una longitud de 75 cm, de tal manera que el patín del helicóptero no resultara un obstáculo para la

obtención de la información geoespacial, al momento de la toma de las aerofotografías.

Vibración de la cámara Nikon D1H: El movimiento del helicóptero en el momento del vuelo genera vibración, la cual se propaga en forma ascendente en los dispositivos que no son propios de su estructura original. Esto significa que las fotografías se afectan por lo que comúnmente se conoce como ruido⁴. Para minimizar este efecto se recubrió el dispositivo mecánico con polipropileno, absorbiendo gran cantidad de la energía de las ondas vibratorias que se le propagan a la cámara desde el rotor del helicóptero, a través del fuselaje. De esta manera se asegura mejor calidad a las fotos y se evitan daños al CCD.

Ortogonalidad del sensor con el terreno: En busca de buena exactitud posicional de las fotografías obtenidas se debe asegurar que el sensor CCD en el momento de la captura de datos se encuentre perpendicular al terreno (James, 1977), para lo cual se diseñó un módulo de nivelación manual, que debe ser establecido una vez se instala la totalidad el dispositivo. Este tipo de nivelación se debe realizar previa el vuelo, al igual que en cualquier otra aeronave, y puede verse influenciado por la inestabilidad del helicóptero, lo cual se minimiza con los datos del movimiento inercial de la plataforma, obtenidos a través de sus mismos sensores.

Los criterios mencionados se concretaron en un plano tridimensional a escala, realizado en software CAD, como interpretación y primer resultado tangible de las medidas y conceptos concebidos, sirviendo como base para el personal altamente capacitado, que de acuerdo con las especificaciones técnicas descritas hizo realidad el sistema mecánico de acople de la cámara Nikon D1H (Fig. 5).

3. Adaptabilidad del software y hardware necesario para la interacción del sistema (sensor - GPS- unidad de almacenamiento)

La cámara Nikon D1H se caracteriza por tener una capacidad de almacenamiento propia de 250 MB (Nikon D1H, 2001); condición poco conveniente si se desea capturar información de una extensa región, creando la necesidad de utilizar una unidad

de almacenamiento más robusta, como un disco duro externo. Por esta razón se adquirió e instaló una tarjeta IEEE1394, con su respectivo conector de ocho pines (Fig. 6), la cual permite, a través de software, especificar la transmisión de datos del sensor CCD al disco duro de un computador portátil, de forma inmediata.

Dadas las condiciones de ubicación de la cámara Nikon D1H, en el momento de la toma de los datos espaciales, se constituye como requisito indispensable que la obturación y control visual de las fotos se realice de manera remota; esto obligó a investigar la manera de realizar esta operación en tiempo real. En consecuencia se instaló un software denominado Nikon Capture versión 4.0 y, aprovechando las características electrónicas de la cámara, se obtuvo el control remoto deseado en un 100%. De tal manera que características como: el enfoque automático, la distancia focal, el tiempo de obturación, la fecha de toma y el ISO, se controlan de acuerdo a las características de vuelo, en pasos que no superan un tiempo de cinco minutos. Así, el diseño de vuelo puede ser alterado si las circunstancias naturales de la región obligan, sin exponer la seguridad del operario.

Igualmente, el software permite analizar la calidad de la foto en el vuelo mismo, ya que cada una de las fotografías capturadas se visualiza en la pantalla del computador; esta característica permite tener certeza de la coincidencia entre la línea de vuelo planeada y la ejecutada.

En busca de la calidad del producto final, se indagó sobre la obtención de las coordenadas geográficas del punto principal de las aerofotografías, con lo cual es más fácil realizar el ajuste de mínimos cuadrados al aplicar las ecuaciones de colinearidad (Faig, 1975).

Las ecuaciones de colinearidad definen la relación entre la cámara Nikon D1H, la fotografía digital y el terreno:

$$X_p - X_o = -F \left[\frac{m_{11}(X_p - X_o) + m_{12}(Y_p - Y_o) + m_{13}(Z_p - Z_o)}{m_{31}(X_p - X_o) + m_{32}(Y_p - Y_o) + m_{33}(Z_p - Z_o)} \right] \quad (1)$$

$$Y_p - Y_o = -F \left[\frac{m_{21}(X_p - X_o) + m_{22}(Y_p - Y_o) + m_{23}(Z_p - Z_o)}{m_{31}(X_p - X_o) + m_{32}(Y_p - Y_o) + m_{33}(Z_p - Z_o)} \right] \quad (2)$$

Donde,

$$m_{11} = \cos\theta \cos\sigma + \sin\theta \cos\lambda \sin\sigma$$

$$m_{12} = -\sin\theta \cos\sigma + \cos\theta \cos\lambda \sin\sigma$$

$$m_{13} = \sin\lambda \sin\sigma$$

$$m_{21} = -\cos\theta \sin\sigma + \sin\theta \cos\lambda \cos\sigma$$

$$m_{22} = \sin\theta \sin\sigma + \cos\theta \cos\lambda \cos\sigma$$

$$m_{23} = \sin\lambda \cos\sigma$$

$$m_{31} = \sin\theta \cos\lambda$$

$$m_{32} = \sin\theta \sin\lambda$$

$$m_{33} = -\cos\lambda$$

θ = azimut

λ = inclinación

σ = rotación

Ecuación matricial para el desarrollo de los mínimos cuadrados:

$$V = AX - L \text{ incluyendo la matriz de pesos } P. (3)$$

Donde,

V La matriz que contiene los residuales de la imagen.

A La matriz que contiene las derivadas parciales con respecto a los parámetros desconocidos, incluyendo la orientación exterior, la orientación interior, los puntos de amarre XYZ y las coordenadas GCP.

X La matriz que contiene las correcciones de los parámetros desconocidos.

L La matriz que contiene las observaciones de entrada (es decir, las coordenadas imagen y las coordenadas GCP).

Los componentes de la condición de mínimos cuadrados están relacionados directamente con el modelo funcional, basado en las ecuaciones de colinearidad.

La matriz A se obtiene derivando el modelo funcional basado en las ecuaciones de colinearidad, con respecto a los parámetros desconocidos tales como la orientación exterior. La matriz L se obtiene restando los resultados obtenidos en una nueva iteración durante el procesamiento. La matriz X contiene las correcciones de los parámetros de orientación exterior desconocidos.

Esto condujo a la interoperabilidad de la cámara con dispositivos de posicionamiento global GPS, lo cual se consolidó gracias al protocolo NMEA -0183, con el que cuenta la cámara digital (Nikon D1H, 2001). De esta manera se construyó un conector RS232, bajo las especificaciones y patrones técnicos que reposan en el manual de usuario de la cámara Nikon D1H, como el del GPS; garantizando la obtención de coordenadas del punto principal de las fotografías, lo cual será utilizado para el postproceso y generación de los mosaicos aerofotográficos.

La precisión de las coordenadas está sujeta a un sistema de corrección diferencial satelital denominado WASS, el cual es de libre distribución y permite de manera económica obtener precisiones de hasta 0.30 m en el centro de las fotos (Mausel, 1996).

4. Evaluación del sistema de captura

Una vez implementado el dispositivo mecánico se procedió a instalarlo en el helicóptero, con un perfecto acople; posteriormente, se adaptó el sistema cámara Nikon GPS y unidad de almacenamiento, considerando la estática generada por los diversos componentes electrónicos en funcionamiento y en permanente fricción con las partículas de aire a velocidades cercanas a los 150 Km/h, para proceder a realizar una prueba de calibración del dispositivo de captura y verificar la calidad de las fotografías obtenidas.

Para satisfacción de la investigación, las primeras fotografías del área urbana de Tumaco se ajustaron apropiadamente a los resultados esperados, por lo cual la fase de calibración resultó económica en términos de tiempo y recursos.

5. Diseño del plan de vuelo

Por el limitante de la nubosidad que predomina en el litoral Pacífico colombiano (cobertura del 80% y techo aproximado de 600 m), mencionado en detalle a lo largo de este documento, se diseñó un plan de vuelo a escala 1:10000 del área de interés (borde costero); donde se calcularon: la distancia focal, la base en el aire⁵, el tiempo de ejecución en

función de la altura de vuelo (para el caso denominado techo de nube), la escala deseada de la foto y la velocidad de la aeronave, manteniendo un traslape transversal entre fotos de un 60%, con el fin asegurar la realización del mosaico y evaluar la posibilidad de producir marcas fiduciales sintéticas en las fotos, para poder generar modelos digitales de elevación, a partir del principio de estereoscopia (Meisener, 1986).

Esta información se le presentó en forma detallada al piloto, de manera previa al sobrevuelo, entregándole las coordenadas geográficas de inicio y fin de la línea de vuelo, facilitando la comunicación del piloto con el operario de captura y asegurando el éxito de la operación.

5. Preparación de la información para la generación de mosaicos

Los mosaicos o panorámicas creadas con las fotografías aéreas se utilizan para procesos cartográficos, por esta razón es necesario corregir las distorsiones propias del sistema de captura. La distorsión radial de la lente de la cámara se corrigió con la utilización de un algoritmo basado en la toma de una fotografía ideal, controlando la distancia focal y la perpendicularidad de la cámara sobre un objetivo denominado malla de corrección (Mogollón, 2003), el cual es un documento de 90 x 70 cm, con una grilla espaciada cada 10 cm, la cual se realizó con un programa de dibujo asistido por computador CAD (Fig. 8).

La fotografía de la Figura 8 se introdujo en el programa CAD, con el fin de obtener la posición real (grilla) y la posición distorsionada (fotografía de la grilla), para, de esta manera, medir los diferenciales en los ejes X y Y, y calcular el componente del diferencial radial (r) (Tabla 1). Se tomaron las medidas de (r) teniendo en cuenta que la distorsión radial de la lente es mayor en los extremos de las fotografías.

Con esta información se realizó un ajuste por mínimos cuadrados, aplicando el método correlativo, con el fin de obtener los coeficientes del K^1 al K^7 . Este procedimiento es necesario porque se desconoce el registro de calibración de la cámara y para la ejecución de un producto cartográfico exigente el software de procesamiento digital⁶

solicita esta información para darle mayor rigor al producto (Imagine Orthobase, 1998) (Figura 9). Posteriormente se generó un archivo .dat necesario para la orientación exterior e interna de la cámara con la siguiente información:

- Coordenadas planas del punto principal de cada aerofotografía, para ello fue necesario hacer uso del software CALGEO (Figura 10), dado que los metadatos de las aerofotografías almacenadas ofrecen las coordenadas del punto principal en latitud y longitud, y el software de procesamiento exige que el punto principal de cada imagen sea almacenado en coordenadas planas (Imagine Orthobase, 1998). En cuanto a la altura es importante aclarar que el GPS captura la elevación elipsooidal del Elipsoide WGS 84, por lo cual es necesario calcular la altura ortométrica con ayuda del software NIMA, generado por el departamento de cartografía de los Estados Unidos. Se calculó previamente la ondulación geoidal de cada punto y se obtuvo la altura aproximada sobre el nivel medio del mar.

- Distancia focal de la cámara Nikon D1H en el momento de la captura de la información.
- Tamaño del píxel en milímetros en dirección X y Y.
- Puntos de fotocontrol (tres por cada modelo estereoscópico).
- Parámetros de calibración de la cámara (coeficientes K^1 al K^7), de acuerdo a los parámetros investigados previamente en el CCCP.

7. Generación del mosaico

La generación del producto final no radica en la simple unión de las fotografías, se debe generar un producto ortorectificado. Para ello es indispensable un modelo digital de elevación MDE y, adicionalmente, contar con la información necesaria para ejecutar las ecuaciones de colinearidad (orientación interior y exterior) (Wolf, 1983).

Aprovechando el traslape transversal del 60% de las fotos y el principio de estereoscopia, es posible determinar las cotas con la utilización de una estación fotogramétrica (Snook, 1987), sin embargo, el CCCP no cuenta con esta tecnología. Para solucionar esta dificultad, se tomaron en cuenta las características de la mayor parte del relieve del sur del litoral Pacífico colombiano (relieve plano),

reemplazando el modelo de elevación digital (MDE) con un promedio de altura (King & Vlcek, 1990), consecuentemente el producto no se ortorectificó en su totalidad, pero sí alcanza la categoría de pseudo-ortorectificado (Figura 11).

RESULTADOS

El producto final tangible es la generación de un bloque aerofotográfico, a escala 1: 10000, del área costera de Tumaco, con su respectiva orientación interior, exterior y proceso de aerotriangulación; generando así un producto de resolución espacial de 1x1m, georreferenciado de manera diferencial al elipsoide WGS 84, Proyección Transversa de Mercator, origen de coordenadas Oeste-Oeste Colombia (Figura 12).

Otro resultado, igualmente, importante es la validación y calibración de la metodología existente en el CCCP para la obtención de información geoespacial utilizando la cámara no métrica Nikon D1H; demostrando que con recursos propios, orientados con el ingenio de su grupo de especialistas, se pueden desarrollar soluciones económicas y útiles para las labores de la DIMAR y fácilmente extrapolables a otras entidades nacionales.

DISCUSIÓN

Desde el punto de vista cartográfico los resultados son valiosos. La exactitud posicional del producto no es comparable con una ortofoto, generada con cámaras métricas, sin embargo, se adopta una fuente de información pseudo-ortorectificada de referencia económica, comparada con los medios convencionales y de apoyo para la actualización del Sistema de Información Geográfico, SIG, del CCCP, minimizando el inconveniente de la carencia de información espacial del litoral Pacífico.

Existen críticas sobre la generación de productos a través de sensores remotos corregidos diferencialmente. Algunos teóricos aseguran que sin la información angular (ω , π , λ) proporcionada por un medidor de movimiento inercial (IMS), una basta cantidad de puntos de fotocontrol y un MDE, los procesos diferenciales no tienen validez (Society of Photographic Scientist

and Engineers, 1973); sin embargo, la metodología desarrollada por el CCCP demuestra que para la obtención de un producto diferencial que permita extraer información cartográfica para los procesos de caracterización costera, estas afirmaciones no aplican en todo su rigor, puesto que cumple las exigencias propuestas para tal fin.

Básicamente, el proceso matemático que está detrás de la generación de los productos diferenciales con fotografías aéreas se basa en el planteamiento de ecuaciones de colinearidad. Resolver estas ecuaciones es posible con la aplicación de series de Taylor y generación de diferentes combinaciones lineales, fundamentadas en la información que se tiene (distorsión radial, coordenadas geográficas del punto principal, tamaño del píxel y altura de vuelo), para de esta manera adoptar un modelo diferencial que sea aplicable a las fotografías capturadas (Mogollón, 2003).

Esto es exactamente lo que desarrolló el CCCP en su metodología, demostrando que sin marcas fiduciales y sin IMS es posible realizar una combinación lineal que permita generar un modelo fotogramétrico digital para alcanzar un producto cartográfico en color verdadero o falso color, de tercer orden, totalmente digital, tal como lo demuestra la Tabla 2 resultado de la aplicación del Indicador Expositivo.

CONCLUSIONES

- La creación de productos fotogramétricos, útiles para la vectorización de la información geográfica de referencia, de no muy alta precisión, para alimentar un SIG como el del CCCP, no requiere ser abordada únicamente con la utilización de costosas cámaras métricas. La tecnología actual impulsa a las cámaras digitales (sensores CCD) y videograbadoras, como instrumentos fácilmente adaptables a los procesos cartográficos (King & Vlcek, 1990), los cuales aumentarán su exactitud posicional, si se complementa con un IMS, un proceso de control diferencial y un completo MDE de la zona de interés.
- La utilización de las cámaras no métricas como la NIKON D1H tienen como ventaja, además de la economía en la elaboración de cartografía, la erradicación del escáner fotogramétrico y la

obtención de información en un amplio rango espectral (0.4 a 0.9 micrones), que antiguamente era una propiedad exclusiva de las imágenes de satélite. Consecuentemente, la posibilidad de generar un tratamiento digital similar al de las imágenes de satélite es una realidad con este producto y una adecuada composición a color, basada en principios estadísticos como: el factor de índice óptimo y los niveles de correlación de cada rango espectral; aplicables para discriminar elementos costeros de interés, como los cambios morfodinámicos de la línea de costa, abriendo la posibilidad de generar cartografía, aplicando los algoritmos de clasificación supervisada (máxima probabilidad), propios del procesamiento digital de imágenes.

- El desarrollo de productos elaborados a partir de equipo básico en el CCCP, la DIMAR y la Armada Nacional, demuestra las capacidades de inventiva e ingenio para la solución de problemas de tipo administrativo o militar con recursos limitados, que propenden por el desarrollo y la seguridad nacional.

- Con respecto a otras fuentes de información espacial, la metodología de la cámara Nikon D1H propuesta tiene las siguientes ventajas: i) Posibilidad de tomar fotos por debajo del techo de las nubes, ii) Adaptación rápida del dispositivo de captura en otras plataforma aéreas de similares características, en caso de alguna calamidad, iii) Tecnología simple y fiable, iv) Rápida disponibilidad de los resultados y v) Costos de implementación bajos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores se permiten aclarar que en la implementación del dispositivo mecánico, así como en la obtención de las fotografías aéreas sobre la zona costera de San Andrés de Tumaco, intervino un importante número de técnicos, marineros e ingenieros que laboran en la División Zona Costera del CCCP.

De la misma manera se aclara que para el sobrevuelo fue necesario el concurso de los pilotos y helicópteros de las Fuerzas Militares y de la Policía Nacional, pertenecientes a la Brigada Contra el Narcotráfico, sin los cuales este mosaico y desarrollo de la metodología no sería una realidad.

Agradecemos, igualmente, la colaboración del Capitán de Fragata Jorge Alberto Gaviria Jaramillo, por su colaboración en el desarrollo de este artículo.

Para todos ello un especial agradecimiento, pues este también es su trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Faig, W. 1975. 'Calibration of Close Range Photogrammetric System: Mathematical Formulation'. Photogramm. Eng. Remote Sens. Vol. 41, Pp. 1479-1486.

Imagine Orthobase. 1998. User Guide Erdas Atlanta Georgia.

James, T. 1977. The Theory of the Photographic process. Edition 4. Ed. MacMillan, New York.

King, D. & J. Vlcek. 1990. Development of Multispectral Video System and Its application in forestry, Canadian Journal of remote sensing, Vol. 16, N° 1, Pp. 15-22.

Mausel, P. 1996. Airborne Videography: Current Status and Future Perspectives, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 58, N° 8, Pp. 1221-1226.

Mc Lachlan, N. 1951. Teory of Vibration Dover, New York.

Meisener, D. 1986. Fundamental of Airborne Video Remote Sensing, Remote Sensing of Environment. Vol. 19, N° 1, Pp. 63-79.

Mogollón, A. 2003. Obtención de los Parámetros Internos de las Fotografías Digitales No Métricas Obtenidas Utilizando el Sensor CCD Cámara Nikon D1H. Centro Control Contaminación del Pacífico. Editorial DIMAR. Boletín Científico CCCP. N° 10, Pp. 77-84.

Nikon D1H. 2001. User Manual. Tokyo Japan.

Snook, P. 1987. Comparison Between Digital and Manual Interpretation of High Altitude Aerial Photographs. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 53, N° 5, Pp. 531-534.

Society of Photographic Scientist and Engineers. 1973. Handbook of Photographic Science and Engineering, Wiley, New York.

Wolf, P. 1983. Elements of Photogrammetry. Edition 2. Ed. McGrawHill, New York.

CITAS

¹ La exactitud posicional de la panorámica se estableció utilizando el indicador estadístico EXPOSI, el cual se representa matemáticamente con la siguiente igualdad = $\pm \{ \text{Error medio de la posición} + (1.645 * \text{desviación estándar de la posición}) \}$, con un intervalo de confianza del 95%.

²The positional accuracy of the panoramic view was established by using the statistic indicator EXPOSI, mathematically represented by $\pm \{ \text{mean position error} + (1.645 * \text{position standard deviation}) \}$, with a confidence interval of 95%.

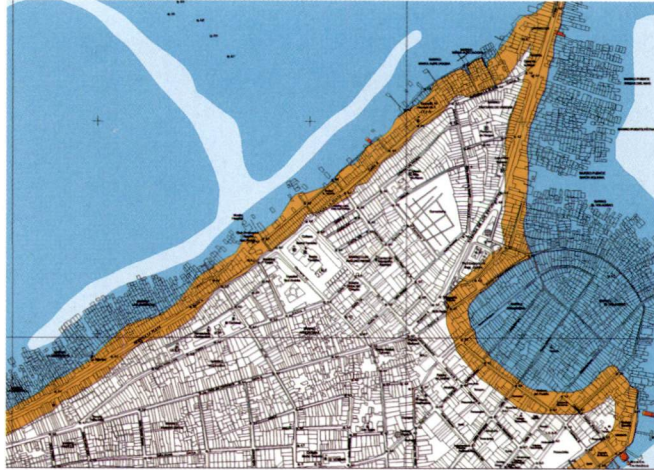
³Físicamente, el concepto de momento se conoce como la tendencia de la fuerza a hacer girar un cuerpo rígido alrededor de un pivote.

⁴Dentro de la jerga del procesamiento digital el ruido se conoce como la deficiencia radiométrica de la imagen digital, se mejora con algoritmos embebidos en softwares especializados.

⁵La base en el aire es el concepto técnico que define la distancia de separación del punto principal entre fotos aéreas adyacentes.

⁶El software en el que se diseñó el producto final no es la única herramienta disponible, existe software libre, como GRASS o POSTGRESGIS, que ofrecen buenos resultados.

FIGURAS Y TABLAS



Esquina superior izquierda: $01^{\circ} 48' 28.44$ N, $78^{\circ} 46' 30.015$ W
Esquina inferior izquierda: $01^{\circ} 48' 20.05$ N, $78^{\circ} 46' 29.998$ W
Esquina superior derecha: $01^{\circ} 48' 54.67$ N, $78^{\circ} 45' 50.626$ W
Esquina inferior derecha: $01^{\circ} 48' 21.44$ N, $78^{\circ} 45' 43.347$ W

Figura 1. Área geográfica donde se realizó el experimento de captura de geoinformación con la cámara NIKON D1H. Borde costero noroccidental del municipio de San Andrés de Tumaco.



Figura 2. Análisis fotográfico de la plataforma aérea disponible para el proyecto, helicóptero Huey. Brazo de soporte del sistema de captura de información.

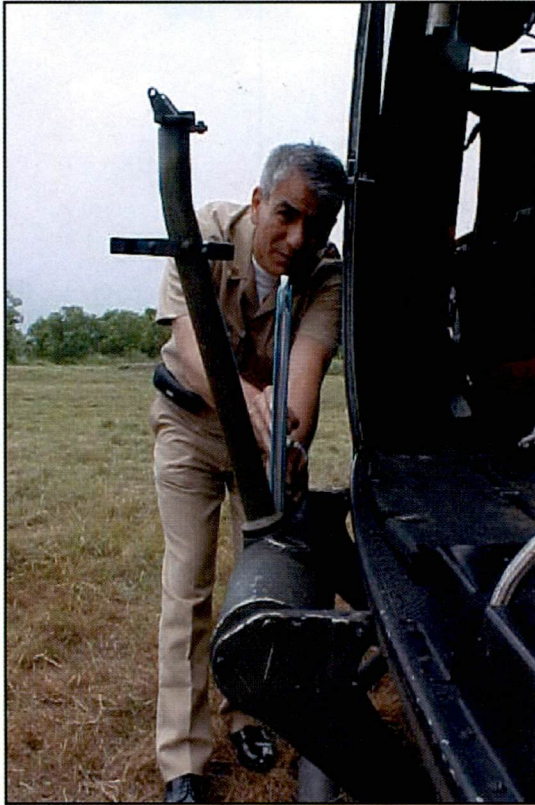


Figura 3. Fotografías de perfil y planta del brazo donde se ubica el dispositivo bélico del helicóptero Huey, el cual se utilizó como soporte de instalación del sistema de captura de las fotografías aéreas.



Figura 3a. Ángulo de inclinación de la base metálica que soporta el dispositivo de captura de la cámara Nikon D1H.

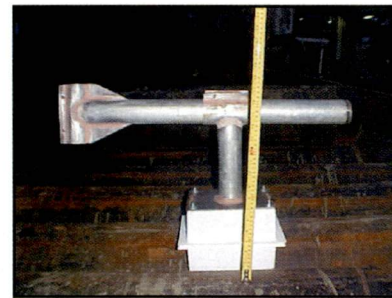


Figura 3b. Implementación del dispositivo mecánico que soporta la cámara Nikon D1H para la toma de datos espaciales.

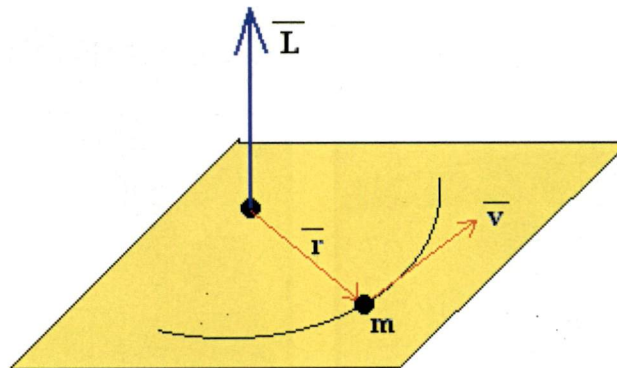


Figura 4. Representa el momento angular de una partícula como el producto vectorial del vector posición r por el vector momento lineal mv . $L=r*mv$.



Figura 6. Instalación de la tarjeta IEE1394 en el PC portátil, para aumentar la capacidad de almacenamiento y control de las fotografías aéreas.



Figura 7. Sistema de captura instalado y controlado desde la plataforma aérea.

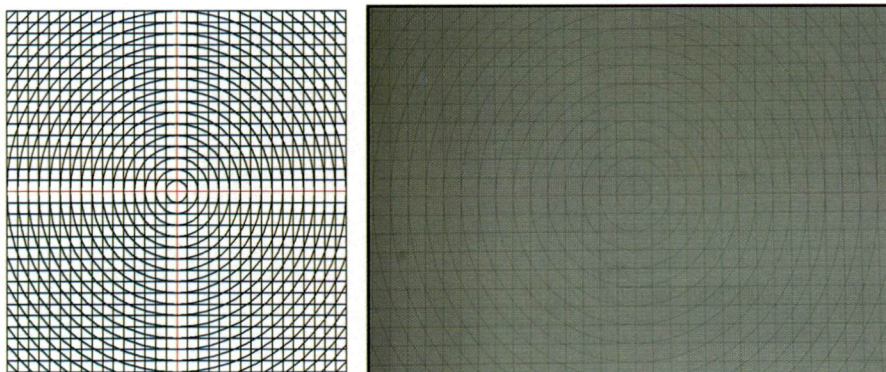


Figura 8. Grilla de corrección diferencial generada en el programa CAD y fotografía capturada con las condiciones ideales para realizar la corrección de la distorsión radial del lente de la cámara Nikon.

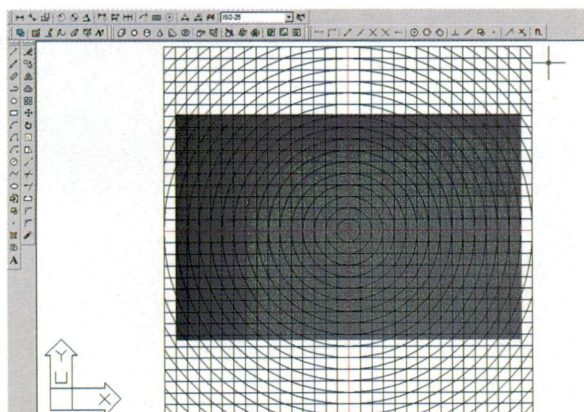


Figura 8a. Grilla de corrección y fotografía capturadas con las condiciones ideales (con la misma distancia focal utilizada en el sobrevuelo), escaladas en un software CAD.

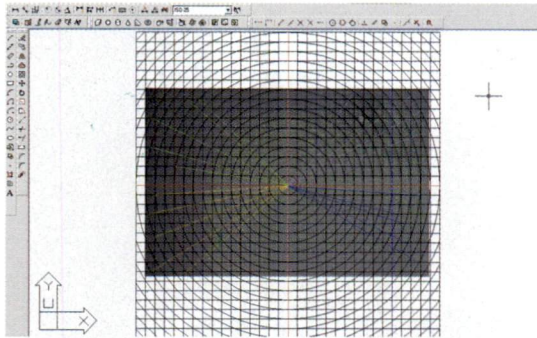


Figura 8b. Trazado y medición de los vectores de la distorsión radial de la fotografía (R). Se evaluaron cinco puntos por cada cuadrante (vectores en colores diferentes por cada cuadrante), enfatizando en los extremos de las fotografías donde la distorsión radial aumenta.

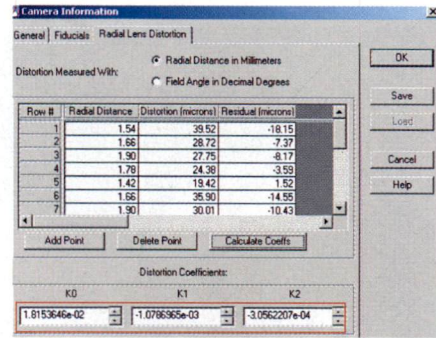


Figura 9. Módulo del software Erdas Imagen denominado Orthobase, donde se almacenó la información de la Tabla 1 y se calculan los coeficientes K0 al K2.

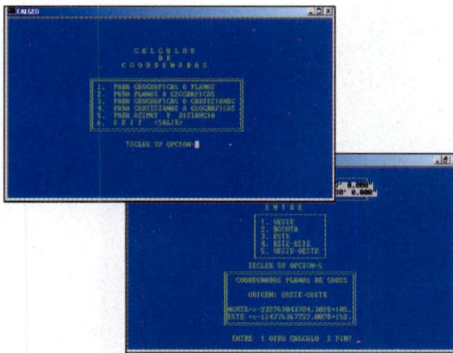


Figura 10. Módulo del software CALGEO que convierte las coordenadas geográficas capturadas con el GPS en coordenadas planas referidas al origen Oeste-Oeste Colombia.

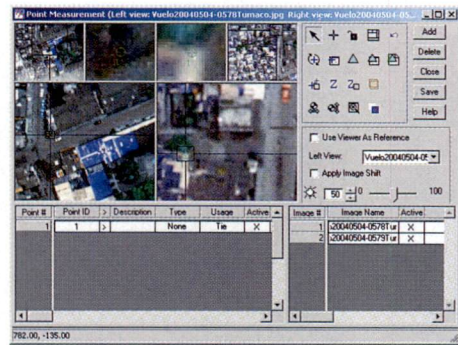


Figura 11. Módulo del software Erdas con el cual se pseudo-ortorectificó el mosaico.

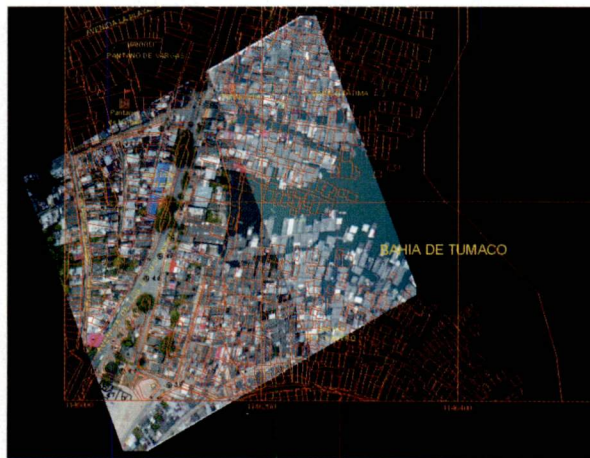


Figura 12. Producto final: mosaico georreferenciado con el cual se iniciará el proceso de actualización cartográfica.

Tabla 1 Distancia radial y distorsión del lente de la cámara Nikon D1H calculados a partir del componente vectorial en dirección x y y utilizando la distancia focal con la que fueron capturadas las fotografías aéreas (85 mm).

CUADRANTE N° 1		Componente X (mm)	Componente Y (mm)
Distancia Radial 1 (mm)	1.5405	0.028	0.0279
Distorsión radial (mm)	39.5273323		
Distancia Radial (mm)	1.659	0.0049	0.0283
Distorsión radial (mm)	28.7210724		
Distancia Radial (mm)	1.896	0.0068	0.0269
Distorsión radial (mm)	27.7461709		
Distancia Radial (mm)	1.7775	0.0075	0.0232
Distorsión radial (mm)	24.3821656		
Distancia Radial (mm)	1.422	0.0082	0.0176
Distorsión radial (mm)	24.3821656		
CUADRANTE N° 2		Componente X (mm)	Componente Y (mm)
Distancia Radial 1 (mm)	1.896	0.0349	0.0047
Distorsión radial (mm)	35.2150536		
Distancia Radial (mm)	1.659	0.331	0.0139
Distorsión radial (mm)	35.9001393		
Distancia Radial (mm)	1.896	0.03	0.0023
Distorsión radial (mm)	30.0880375		
Distancia Radial (mm)	1.7775	0.026	0.0094
Distorsión radial (mm)	27.6470613		
Distancia Radial (mm)	1.422	0.0266	0.013
Distorsión radial (mm)	29.606756		

CUADRANTE N° 3		Componente X (mm)	Componente Y (mm)
Distancia Radial 1 (mm)	1.659	0.0091	0.0171
Distorsión radial (mm)	19.3705963		
Distancia Radial (mm)	1.7775	0.0087	0.0152
Distorsión radial (mm)	17.5137089		
Distancia Radial (mm)	1.7775	0.0076	0.0142
Distorsión radial (mm)	16.1058995		
Distancia Radial (mm)	2.0145	0.0001	0.0178
Distorsión radial (mm)	17.8002809		
Distancia Radial (mm)	1.659	0.004	0.0115
Distorsión radial (mm)	12.1757957		
CUADRANTE N° 4		Componente X (mm)	Componente Y (mm)
Distancia Radial 1 (mm)	1.659	0.02	0.0118
Distorsión radial (mm)	11.9682914		
Distancia Radial (mm)	1.422	0.0118	0.0122
Distorsión radial (mm)	12.25		
Distancia Radial (mm)	1.5405	0.0073	0.014
Distorsión radial (mm)	7.45251635		
Distancia Radial (mm)	1.659	0.0036	0.015
Distorsión radial (mm)	15.4259522		
Distancia Radial (mm)	1.896	0.0002	0.015
Distorsión radial (mm)	0.12328828		

Tabla 2. Resultado cuantitativo de la exactitud posicional del mosaico utilizando el Indicador EXPOSI.

EXACTITUD POSICIONAL MOSAICO NIKON D1H						
				Elipsoide: WGS 84		
				Proyección : Transversa De Mercator		
				Origen : 77° 04' 51,30" W , 04° 35 '56,57" N		
Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	A=Error Posicional	Error Medio	B = (A - Error medio)_
691772.50	1146779.75	691773.45	1146779.85	0.955	2.868	3.659
691956.00	1146669.75	691958.36	1146668.15	2.851	2.868	0.000
691799.00	1146701.50	691795.23	1146703.12	4.103	2.868	1.526
691874.00	1146623,75	691874.56	1146628.54	4.823	2.868	3.821
691899.75	1146533.00	691899.48	1146535.25	2.266	2.868	0.362
691914.75	1146466.25	691914.12	1146468.37	2.212	2.868	0.431
Número de puntos (n)	6					
Suma (A)	17.210					
Error medio	2.868					
Suma(B)	9.80					
Ö = Desviacion Estandar	1.278					
Constante Gaussiana	1.98					
Indicador = Exactitud Posicional Para Un Nivel De Confianza Del 95%	5.399			Interpretación del indicador obtenido: Para cualquier punto en la foto existe una probabilidad del 95% de obtener un error inferior o igual a 5.399 metros y por consiguiente, la probabilidad de obtener un error mayor de 5.399 metros es de solo un 5%.		
Escala del mapa	1: 5000					
Exactitud Cartografica Estandar En (mm)	±0.5(mm) de la escala de publicación					
E = Exactitud Posicional	2.5(m)					
ERROR POSICIONAL={ [Norte (Foto) - Norte (GPS)] ² + [Este (Foto) - Este (GPS)] ² } ^{1/2}						
ERROR MEDIO= Sum { (Error Posicional) / n						
DESVIACION ESTANDAR DEL ERROR MEDIO = { sum (Error Posicional - Error Medio) ² /n } ^{1/2}						
INDICADOR = ± { Error medio + (1.278* Ö) }						