

Multi-temporal photogrammetric analysis to monitoring the river Las Minas, Punta Arenas, Chile

R. Koschitzki^a, E. Schwalbe^a, M. Kröhnert^a, C. Cárdenas^b, H-G. Maas^a

Abstract - This paper presents a multi-temporal photogrammetric model of analysis to monitoring of the Rio de Las Minas basin, located near to Punta Arenas city in southern Chile, this basin is constantly in danger, for landslide risks that can block and dam the river, and as a result probably catastrophic flood. To prevent such landslide-triggered hazards, the paper focuses on photogrammetric landslide detection and analysis using multi-temporal aerial images to reliably detect major geomorphological changes. As example, with datasets from 2014 and 2015 of the river Las Minas, two points clouds were generated to analyze landslides by means of the height differences between both clouds, which allowed establishing an autonomous model to detect landslides through the use of UAV's. Finally, recommendations are presented about the data acquisition system, its georeferencing and the monitoring plan by mean of UAV's.

Index Terms - UAV, monitoring, flooding, photogrammetry, SfM

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta un modelo fotogramétrico para el monitoreo en áreas inaccesibles, donde deslizamientos de terreno podrían temporalmente bloquear el curso de agua en ríos, causando severas inundaciones que ponen en peligro tanto vidas humanas como también bienes materiales significativos. Un interesante ejemplo es el peligro que presenta el sector de la cuenca alta del río de Las Minas ubicada en el sur Austral de Chile. En los últimos 70 años, 5 deslizamientos mayores de terrenos han sido registrados, sin embargo, el último de ellos (durante el 2012) causó una inundación catastrófica en la zona central de la ciudad de Punta Arenas, Chile como muestra la Fig. 1.

La inaccesibilidad del área, la estrechez del valle, y la densa cobertura boscosa, sumado a la inestabilidad geomorfológica de las laderas del río, impiden la instalación de algún sistema de monitoreo local, tal como sensores ópticos o acústicos. Sin embargo, por ello la estrategia de observación de las laderas del río, se basará en un método de observación óptico utilizando un vehículo aéreo no tripulado, (UAV). El uso de plataformas aéreas es fundamental para mapear a gran escala [2] como así también para la construcción de modelos

tridimensionales, que normalmente está representada a partir de la tradicional imagen aérea o imágenes satelitales entre otras ([3] y [4]), sin embargo para obtener resultados óptimos, la topografía superficial de la zona de estudio debe ser lo más regular posible, presentando problemas en lugares donde la topografía es abrupta, como por ejemplo sobre valles con grandes pendientes, en cuyos lugares los sensores capturan información que posteriormente resultan en imágenes distorsionada [5], y por otro lado la resolución que estos métodos pueden lograr, todavía puede ser incrementada. Para capturar grandes coberturas mediante sensores remotos, sobre terrenos abruptos, alto nivel de detalles y mayor exactitud es posible utilizar un UAV. El reconocimiento aéreo permite realizar monitoreos medioambientales en donde los sensores remotos capturan la información con una resolución espacial y temporal que no siempre permite mapear con detalles, como también el caso del reconocimiento terrestre, el que puede ser realizado por diferentes instrumentos como, por ejemplo; cámaras digitales, GPS's, laser scanner, entre otros, sin embargo, la información obtenida es muy acotada [6].



Figura 1. Inundación del sector central, ciudad de Punta Arenas, 12 marzo de 2012 (Imagen cortesía oficial Mansilla, piloto Unidad Aero-Policial).

La ventaja de la plataforma aérea, junto con tener la capacidad de cubrir mayores áreas tiene la habilidad de seguir una ruta autónoma de vuelo predefinida y la capacidad de llevar consigo múltiples sensores. Por ejemplo, el montaje de sensores de imágenes sobre el UAV permite el mapeo, observación y monitoreo de los cambios medioambientales. Para la detección de cambios, tales como en los deslizamientos de terreno, es necesario comparar datos en espacio – temporal. La representación de superficies en tres dimensiones (nube de puntos 3D) puede ser procesada desde una secuencia de imágenes por medio de algoritmos de estructuras de movimiento (Structure-from-motion, SfM) [7].

Robert Koschitzki, Ellen Schwalbe, Melanie Kröhnert, Hans-Gerd Maas, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität Dresden, Germany, (robert.koschitzki, ellen.schwalbe, melanie.kroehnert, hans-gerd.maas)@tu-dresden.de

Carlos Cárdenas, Universidad de Magallanes, Chile, carlos.cardenas@umag.cl

Corresponding author: Robert Koschitzki

La reconstrucción es generada a través de las características detectadas desde la imagen, superponiendo fotografías de la superficie capturada, desde diferentes puntos de vista (View-points). Una comprensiva revisión de la funcionalidad básica del algoritmo SfM y aplicándola sobre los antecedentes medioambientales esta dado por [7]. Los desplazamientos de cada deslizamiento de terreno como también las mediciones de cambios de volumen pueden ser obtenidas por medio de las imágenes capturadas por los UAV sobre terrenos por lo general planos, como ya han sido investigados anteriormente por [8], [9] y [10].

En el presente caso donde la topografía y estrechez del río, la geometría de la imagen y la distribución de los puntos de control (Ground Control Point, GCP) son el mayor desafío para lograr una nube de puntos con mayor precisión. Así, el siguiente estudio principalmente se concentra en estos temas, con el objetivo de crear un modelo autónomo que permita establecer un sistema de monitoreo de detección de cambios de volúmenes, para prevenir los eventos en la zona de estudio, que puedan gatillar inundaciones, principalmente por deslizamientos de terreno.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El siguiente capítulo presenta la ubicación geográfica del río de Las Minas, en las zona sur Austral de Chile y describe además el modelo de adquisición de datos aéreos a partir de dos campañas de terreno realizadas.

A. Área de estudio

El área de estudio esta localizada en la zona sur Austral de Chile e involucra la cuenca del río de Las Minas y su paso a través de la ciudad de Punta Arenas (Fig.2).



Fig. 2. Área de estudio: Río de Las Minas (Geoeye-1: 26-02-2010).

Esta ciudad costera se encuentra a orillas del Estrecho de Magallanes y se ve amenazada por drásticos eventos de inundaciones causados debido a deslizamientos de tierras ocasionales de la cuenca alta del río de Las Minas que atraviesa dicha ciudad de occidente a oriente, bloqueando temporalmente el río. Existen registros del año 1941 al 2012 (5 marzo 1941, 6 abril 1945, 28 septiembre 1967, 9 mayo 1990 y

el ultimo acontecido el 12 de marzo 2012 ([11] y [12]). El potencial riesgo ha sido investigado por [13]. La referencia [14] dividió el área de peligro en 3-4 kilómetros de largo por posibles deslizamientos de tierra de 12 zonas críticas que contienen hasta 600.000 toneladas de rocas y sedimentos. Estas zonas de peligro se encuentran en la rivera noroeste del río, aproximadamente a 10 km de distancia desde el centro de la ciudad. Las laderas en las zonas críticas son muy empinadas e inestables, Los principales deslizamientos de tierra que potencialmente podrían bloquear el río son altamente probables y por ello la seguridad geológica e hidrológica de la creciente ciudad de Punta Arenas se encuentra en peligro.

B. Mediciones aéreas

La cámara fue elegida en base a su robustez, la capacidad de adquisición automática de la secuencia de imágenes, y su potencial idoneidad para ser utilizada sobre UAV (bajo peso, gran ancho de apertura).

Durante el 2014 (17 marzo) y el 2015 (9 noviembre) se realizaron dos campañas aéreas de imágenes del valle del río utilizando una cámara GoPro 3 Black instalada sobre un helicóptero (ver TABLA I).

TABLA I
ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA UTILIZADA PARA ADQUIRIR LAS IMÁGENES

Ajustes	Camera (GoPro 3)
Longitud focal [mm]	2.7
Tamaño del Pixel [μm]	1.55
Resolución [px]	4000 x 3000
Altitud de vuelo sobre el terreno [m]	150-450
Superposición de Imagen [%]	> 75

La cámara fue elegida en base a su robustez, la capacidad de adquisición automática de la secuencia de imágenes, y su potencial idoneidad para ser utilizada sobre UAV (bajo peso, gran ancho de apertura). El valle fue grabado en dos líneas de vuelo. Cada una de ellas fue realizada de sur a norte y el vuelo de retorno a través del curso del río. De este modo la altitud en la segunda línea de vuelo fue de 250 metros más alto que la primera (ver Fig. 5). Considerando una altitud de vuelo promedio de 400 metros y la especificación técnica del sensor, una resolución terrestre de 23 cm puede ser alcanzada. El intervalo de disparo fue ajustado cada 2 segundos para garantizar una superposición suficiente, entre secuencias de imágenes.

III. PROCESAMIENTO DE DATOS

Este capítulo está enfocado en el método de análisis de la información aérea capturada durante el 2014 y 2015. Primero, se han calculado y georreferenciado en forma precisa las representaciones tridimensionales del valle del río por cada

evento. Segundo, se ha aplicado el algoritmo iterativo del punto más cercano o Iterative Closest Point (ICP) [15] sección por sección, para mejorar el alineamiento mutuo de las nubes de puntos. Finalmente, las nubes de puntos de ambos registros fueron comparados para identificar áreas con cambios de volumen.

A. Calibración de la cámara

La idea inicial para estimar los parámetros de la orientación interior de la cámara simultáneamente (auto calibración) con los parámetros de orientación exterior de las imágenes y las coordenadas de la nube de puntos tuvo que ser desechada.

TABLA II
RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA

Orientación Interior [mm]	
c	$2.7543e-00 \pm 2.58e-04$
x_0	$-1.5083e-02 \pm 1.10e-04$
y_0	$4.7566e-02 \pm 1.14e-04$
Distorsión [mm]	
A1	$-4.4047e-03 \pm 4.09e-05$
A2	$1.7462e-03 \pm 9.48e-06$
A3	$7.0005e-05 \pm 7.07e-07$
B1	$-8.8861e-05 \pm 3.21e-06$
B2	$3.0304e-06 \pm 3.80e-06$
C1	$5.9287e-05 \pm 1.29e-05$
C2	$1.0362e-04 \pm 1.24e-05$



Fig. 3. Habitación cúbica para calibración del lente Ojo de Pez [18].

La deficiente geometría de la imagen y la fuerte distorsión radial de la cámara indica un inadecuado resultado de la calibración y así el error sistemático de la nube de puntos se propaga. Para estimar los parámetros internos de la cámara con alta precisión durante la auto calibración y así evitar el error sistemático, [16]. se sugiere una geometría de imagen convergente. Para imágenes de ejes paralelos, los parámetros internos de la cámara deberían ser calculados previamente a través de una calibración independiente a la cámara [17].

Una calibración manual de la cámara para una posterior reconstrucción fotogramétrica, mejora el resultado

significativamente. Una habitación especial de calibración con 150 puntos de control fue utilizada para determinar la orientación interior de la cámara (ver figura 3). Mejores resultados fueron logrados aplicando un modelo equidistante de proyección Ojo de Pez para la cámara [17]. La tabla II muestra un resumen de los parámetros calibrados obtenidos (Desviación estándar de unidad de peso $\sigma_0 = 0.12$ pixel).

B. Generación de la nube de puntos 3D

Para la reconstrucción 3D del valle, el SfM software Agisoft Photoscan fue utilizado. Aproximadamente 400 imágenes fueron procesadas para cada adquisición. La estabilidad del proceso de reconstrucción, efecto de distorsión y la compensación de puntos principales fueron removidos desde cada imagen por medio de la herramienta de re-muestreo Distorsión-Corrección antes del procesamiento

TABLA III
DETALLES DE LA RECONSTRUCCIÓN 3D

	2014	2015
Tie points	25,175	20,354
Promedio resolución terrestre [cm/px]	21.6	22.8
Area cubierta [sq km]	≈ 11.3	≈ 13.0

Para la reconstrucción, los parámetros internos de orientación de la cámara fueron fijados durante el ajuste del haz para asegurar la misma configuración de la cámara en ambas adquisiciones. La TABLA III muestra detalles de la reconstrucción por cada periodo de tiempo.



Fig. 4. GCP Natural (inferior); imágenes aéreas 2014 (superior izq.) y 2015 (superior der.) destacando el GCP.



Fig. 5. Nube de puntos Georreferenciación (2015), trayecto del vuelo (código de colores de la altura sobre el terreno), y GCPs (referencias naranjas).

C. Georreferenciación

Para la georreferenciación y la escala propuesta, puntos naturales fueron establecidos en terreno (rocas, etc.), de modo de ser visibles en ambas secuencias de las imágenes aéreas capturadas, tanto el 2014 como el 2015. Los puntos que fueron medidos con una exactitud de decímetros, utilizando un Sistema Diferencial de Posicionamiento Global, dGPS (ver Fig. 4). Debido a las limitaciones de accesibilidad, la distribución de los puntos de control varía sobre el valle del río.

En ambas campañas la cámara fue georreferenciada en forma aproximada con un GPS manual durante los vuelos en helicóptero (ver Fig. 5). Con el objetivo de lograr un registro óptimo de la nube de puntos en relación a la otra, cada punto de control, GCPs fue medido por largo tiempo durante el proceso de ajustes, por ello el error medio alcanzado fue de 17 cm para cada GCPs.

D. Comparación de la nube de puntos 3D

La precisión de la detección de los cambios topográficos en la nube de puntos 3D principalmente depende de la calidad de cada reconstrucción individual y de la calidad de sus registros. Un efecto típico de propagación de error es llamado “dome” en dirección de vuelo.

Este efecto es una consecuencia de una inadecuada geometría imaginaria (línea angosta) y superficies no homogéneas o con insuficiente distribución de punto de control. Sin embargo, la nube de puntos de diferentes adquisiciones es al menos aproximadamente alineados, incluso en regiones con bajas cobertura de GCP.

Con respecto a la detección de cambio de volumen, un co-registro aproximado de la nube de puntos es más importante que aproximar su georreferenciación absoluta. Por lo tanto, para dividir la nube de puntos de ambas adquisiciones en la sección y para co-registrar cada par de secciones individuales es una opción compensar a gran escala deformaciones y mejorar el alineamiento. La división de la línea conocida de dos nubes de puntos de diferentes adquisiciones es ilustrada en

la Fig. 6 y puede ser interpretada con un corte transversal. El co-registro resultante de la sección correspondiente de dos adquisiciones vía el algoritmo ICP, minimiza la distancia entre las dos nubes. Considerando solo los parámetros de rotación y traslación (no escalados), el método mejora el alineamiento de una nube de puntos con respecto a la otra. En el caso del alineamiento en la base de todos los puntos de ambas secciones, el resultado del co-registro puede ser inexacto, debido a la potencial influencia de cambios de región. Un objetivo basado en el alineamiento repetitivo vía ICP y la exclusión sucesiva de regiones con fuertes cambios desde el cálculo ICP, podría mejorar el alineamiento de ambas nubes de puntos.

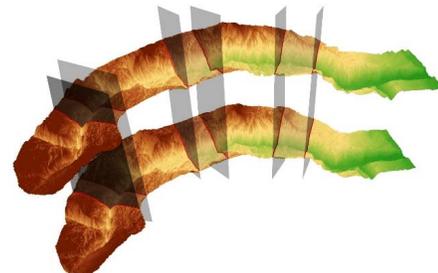


Fig. 6. Visualización de las seccionales sobre el modelo superficial del 2014 (superior) y 2015 (inferior), minimiza el impacto de la potencial deformación (para propósitos de visualización un ajuste vertical fue aplicado sobre el modelo).

Después del co-registro de la sección de ambas nubes de puntos adquiridas, la distancia vertical de nube a nube entre ambos ajustes de datos puede ser calculada. Ellos representan diferencias de altitud que indica cambio de volumen (e.g. causado por deslizamiento de terreno). La Fig. 7 ilustra un ejemplo para la compensación de potencial de deformación de la nube de puntos por medio de la aproximación de ICP. Después dividiendo el ajuste de datos de georreferenciación del 2014 y 2015 en secciones iguales de forma cruzada hacia la dirección de flujo del río, la diferencia vertical de nube a nube de las dos secciones fue calculadas.

La Fig. 7 muestra el resultado de un registro basado en GCPs solo (izquierdo) y el resultado basado en una combinación GCP y registros ICP como se describe (derecha).

La diferencia positiva de altitud (color naranja) indica una acumulación de masa entre el 2014 al 2015, mientras una negativa diferencia de altitud (color azul) indica erosión. En el caso del registro GCP, se producen errores sistemáticos en la parte superior y margen inferior de la sección de la nube de puntos. La diferencia de altitud calculada falsamente indica pérdida de masa en la región cercana a los márgenes inferiores del gráfico, Sin embargo, estas áreas están localizadas bastante lejos del río y no son afectados por el cambio de volumen. (e.g. causado por deslizamiento de terreno). La Fig. 7 ilustra un ejemplo para la compensación de potencial de deformación de la nube de puntos por medio de la aproximación de ICP. Después dividiendo el ajuste de datos de georreferenciación del 2014 y 2015 en secciones iguales de forma cruzada hacia la dirección de flujo del río, la diferencia vertical de nube a nube de las dos secciones fue calculadas.

La Fig. 7 muestra el resultado de un registro basado en GCPs solo (izquierdo) y el resultado basado en una combinación GCP y registros ICP como se describe (derecha).

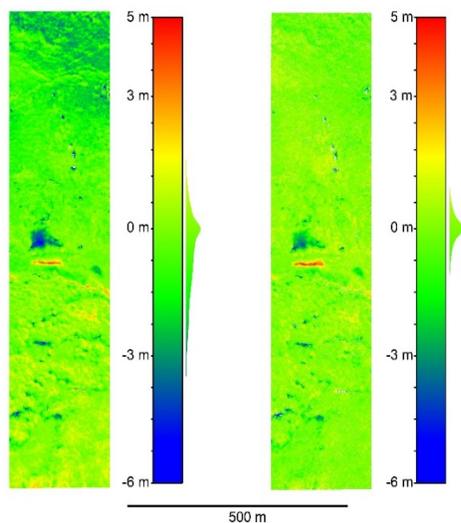


Fig. 7. Diferencia vertical de nube a nube entre 2014 y 2015: solo georreferenciada por GCPs (izquierda); adicionalmente registrada por ICP (derecha).

La diferencia positiva de altitud (color naranja) indica una acumulación de masa entre el 2014 al 2015, mientras una negativa diferencia de altitud (color azul) indica erosión. En el caso del registro GCP, se producen errores sistemáticos en la parte superior y margen inferior de la sección de la nube de puntos. La diferencia de altitud calculada falsamente indica pérdida de masa en la región cercana a los márgenes inferiores del gráfico. Sin embargo, estas áreas están localizadas bastante lejos del río y no son afectados por el cambio de volumen. El efecto puede ser explicado por la distorsión global de ambas secciones de nubes de puntos que resulta de la distribución escasa e irregular de GCPs dentro de la franja de vuelo. Después del co-registro adicional de ambas secciones de nubes

de puntos a través de ICP la gráfica de diferencia de altura resultante (Fig.7, derecha) muestra diferencias de altitud cercanas a cero en las áreas previamente afectadas.

IV. RESULTADOS

Usando una sección de nube de puntos representativa, se discute el potencial de los procesos de medición aplicados y los métodos para el procesamiento de datos para detectar cambio de volumen en el valle del río de Las Minas, además, se presenta el Modelo de un sistema de monitoreo autónomo para detectar deslizamientos medianos de terreno que podrían bloquear el río.

V. DISCUSIÓN

A. Estudio del Caso

Imágenes aéreas desde un vuelo durante el 2014 y el 2015 fueron utilizadas para generar una nube de puntos 3D georreferenciada del valle del río de Las Minas por cada adquisición. Cada nube de puntos fue dividida en secciones más pequeñas que se analizaron individualmente. Se escogió una sección que contenía un evento de deslizamiento de terreno y los resultados de su análisis serán presentados a continuación.



Fig. 8. Detalles de las imágenes aéreas de la misma área tomada el 2014 (Superior) y 2015 (inferior).

La Fig. 8 muestra las imágenes de la cámara GoPro asociadas al 2014 y 2015 de esta sección. Sobre una longitud de aproximadamente 70 metros. parte de la pendiente (aproximadamente 2800 m²) se deslizaron hacia el río. Ambas

imágenes ilustran las dificultades de la detección de cambio de volumen visual debido a las fluctuaciones estacionales de la cubierta de plantas y las diferentes condiciones de luz.

Por el contrario, la ilustración codificada por colores de las diferencias de altura entre ambas nubes de puntos corregistradas (ver Fig. 9) permite reconocer visualmente las áreas con erosión y acumulación. En el presente caso, la altura de la acumulación de masa en el lecho del río causada por el deslizamiento, asciende a 5,5 m.

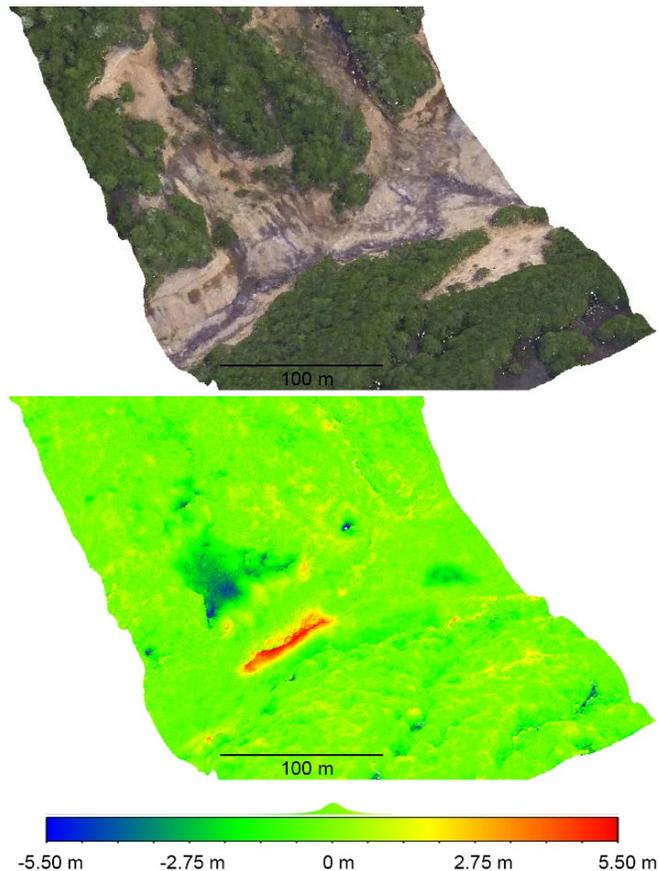


Fig. 9. Nube de puntos en colores de una pequeña sección del valle del río generado desde imágenes aéreas el 2015 (superior) y codificación de colores de diferencia vertical entre las nubes de puntos desde el 2014 y 2015 (inferior).

Similar a este ejemplo, otros deslizamientos de terreno, de tamaño mediano podrían detectarse a lo largo del río. La mayoría de ellos se generaron dentro de las zonas críticas definidas por [14]. Los resultados demuestran el potencial del método para detectar deslizamientos de terreno, con la dimensión de unos pocos metros en terreno accidentado, utilizando un sensor de bajo costo. Al aumentar la resolución del terreno, el nivel de detalle de las nubes de puntos podría aumentar e incluso se podrían detectar cambios de volumen mucho más pequeños. Sin embargo, con la finalidad de detectar deslizamientos de terreno que podrían afectar el normal cauce del río y generar situaciones peligrosas, es suficiente detectar diferencias verticales con el tamaño de unos pocos metros.

B. Concepto del monitoreo

De acuerdo con un método de prospección autónoma para la detección de deslizamientos de terreno desde imágenes obtenidas mediante un UAV y refiriéndonos a las experiencias de las campañas de campo, el concepto de monitoreo se puede resumir de la siguiente manera:

1) Hardware

Un UAV de alto rendimiento establece la base del sistema de monitoreo. En relación a la gran extensión del área de peligro y las posibles condiciones climáticas adversas, el UAV debe proporcionar un amplio rango de operación y baja resistencia al viento. Los UAV de ala fija pueden cumplir estos requisitos en lugar de helicópteros. Sin embargo, las condiciones climáticas deben ser consideradas en la planificación del vuelo ([14]).

Para la navegación autónoma a lo largo de una ruta de vuelo determinada, el UAV debe estar equipado con instrumentos de navegación (GPS, INS y barómetro). Las soluciones convencionales permiten el control y un posicionamiento con precisión métrica, sistemas de alta precisión incluso con precisión de decímetros o centímetros ([20], [21] y [22]).

Durante las campañas de campo, se usó una cámara ligera y de bajo costo unida a un helicóptero para registrar las imágenes. El procesamiento de las imágenes ha demostrado las dificultades causadas, por ejemplo, por el ángulo de apertura extrema y la óptica de baja calidad con fuertes efectos de distorsión, pero ha demostrado el posible análisis incluso con un sensor de bajo costo. Con respecto a un sistema basado en UAV con baja altitud de vuelo y rango limitado, los requisitos para el sistema de grabación de imágenes son una cámara de bajo peso y ópticas de gran angular. La combinación de dos o tres cámaras orientadas lateralmente podría mejorar el ángulo de adquisición en términos de pendientes pronunciadas a bajas altitudes de vuelo y la resolución del suelo.

Como un sistema sensor alternativo para generar información 3D del terreno, los escáneres láser podrían ser interesantes en el futuro. Los sistemas actuales de bajo peso (<1 kg) ofrecen rangos máximos de hasta 200 m y son adecuados para instalarse en un UAV. La ventaja de dicho sistema es la generación de información sobre el terreno en tiempo real y la información adicional mediante el uso de técnicas de registro de eco de impulsos múltiples ([6]). Sin embargo, los escáneres láser como dispositivos de adquisición de datos secuenciales requieren soluciones GNSS / IMU de alta precisión para una georreferenciación precisa, lo que aumenta el costo del sistema.

2) Georreferenciación

Para escalar y orientar las nubes de puntos obtenidas el 2014 y el 2015, se midieron y usaron puntos naturales definidos sobre el valle del río como puntos de control terrestre. Este método requiere la identificación de los GCP en las imágenes. En un concepto de monitoreo autónomo, los puntos señalizados permanentes deben instalarse y medirse. La detección autónoma de estos puntos en las imágenes orientadas podría realizarse mediante rutinas coincidentes.

Alternativamente, un método directo de georreferenciación utilizando la orientación del sistema de navegación UAV podría ser una aproximación adecuada. En este caso, la instalación de GCP no es necesaria, pero podría proporcionar información de precisión utilizando algunos puntos señalizados como puntos de control.

3) Planificación de vuelo

Para una supervisión efectiva del área de riesgo, es necesario realizar un vuelo periódico, la generación de una nube de puntos 3D y su comparación con el conjunto de datos anteriores permite detectar cambios de volúmenes importantes. Los deslizamientos ocurren principalmente después de fuertes lluvias y pueden asociarse con una cierta época del año. Por lo tanto, el intervalo entre las observaciones se puede reducir en invierno y se deben ajustar tanto después de la caída de la lluvia como después del deshielo de la nieve. Además, las condiciones climáticas influyen en el cronograma.

4) Procesamiento

El procesamiento de imágenes después de cada vuelo de observación comienza con la generación y georreferenciación de una nube de puntos tridimensional desde las imágenes aéreas a través de SfM. El paso de generación del modelo de superficie debe ser seguido por un procedimiento de detección y eliminación de valores atípicos. Antes de comparar nubes de puntos temporales consecutivas, ambas nubes deben segmentarse en secciones pequeñas predefinidas a lo largo de la ruta de vuelo. Una tras otra, las secciones asociadas espacialmente necesitan ser co-registradas al minimizar su distancia usando ICP o técnicas similares. El cálculo de la diferencia vertical punto a punto entre ambas secciones resalta las regiones con fuertes cambios locales. Excluir estas áreas dentro de la próxima iteración de co-registro puede mejorar la alineación. Los cambios verticales entre ambas épocas se detectan automáticamente en las diferencias de altitud recalculadas. El análisis de las regiones potencialmente modificadas con respecto al tamaño, forma, ubicación, etc., debería permitir una clasificación en deslizamientos de tierra, otros cambios de volumen, como árboles en crecimiento o talados, o valores atípicos.

V. CONCLUSIONES

Se generaron dos nubes de puntos 3D del sector estudiado, desde donde se escogió una sección para analizar deslizamientos de terreno. Se establecieron dos procedimientos para el análisis de imágenes, en el primero se analizó directamente las dos imágenes aéreas RGB del sector y el segundo análisis consistió establecer las diferencias de altura entre ambas nubes, el cual permite generar una ilustración codificada por colores, en donde este último procedimiento permite reconocer visualmente las áreas con erosión y acumulación.

Como concepto de monitoreo autónomo para detección de deslizamientos de terreno se estableció la necesidad de contar con UAV que permita un amplio rango de operación y baja

resistencia al viento, el cual debe estar equipado con GPS, INS y barómetro. Ahora para un sistema basado en un UAV de baja altitud de vuelo y rango limitado, los requisitos del sistema de captura son una cámara de bajo peso y ópticas de gran angular, destacando la posibilidad de sumar cámaras orientadas lateralmente lo cual podría mejorar el ángulo de adquisición en términos de altitud de captura versus resolución del suelo.

En cuanto a la georreferenciación se establece la necesidad para un sistema de monitoreo autónomo, instalar una red de puntos GCP señalizados y permanentes para ser medidos, sin embargo como método directo de georreferenciación podría utilizarse el sistema de navegación del UAV, siempre y cuando la aproximación de este sea adecuada.

En relación a la planificación del vuelo para una supervisión adecuada del área de riesgo y una efectiva generación de las nubes de puntos 3D y su posterior comparación para establecer cambios de volumen, se debe tener en cuenta las épocas del año (invierno, verano) ajustándose posteriormente a las caídas de agua como también posterior a los deshielos.

Una vez generada la nube de puntos, es posible obtener el modelo superficial del área de estudio, el cual debe ser filtrado con el objetivo de eliminar valores atípicos para posteriormente co-registrar sección tras sección de la ruta completa para minimizar su distancia. Luego el cálculo de la diferencia vertical punto a punto en ambas épocas se detectan en forma automática permitiendo no solo obtener diferencias de volumen si no también árboles en crecimiento o talados.

En general teniendo en cuenta la topografía del Río de Las Minas que fluye o través de su cuenca y que genera un riesgo potencial de inundaciones, que podrían ser provocadas por deslizamientos de terreno, el documento presenta un concepto de monitoreo remoto de bajo costo para observar áreas de peligro por deslizamiento, utilizando nubes de puntos multitemporales, derivadas desde imágenes aéreas. El enfoque aborda el problema de la deformación de la nube de puntos en el caso de una inconveniente distribución de punto de control en el terreno, al dividir las nubes de puntos en secciones delgadas y alinearlas utilizando técnicas ICP el problema es solucionado. Por lo tanto, los cambios de volumen de tamaños medios son detectables incluso con sensores de bajo costo y sobre terrenos accidentados. En cuanto a la accesibilidad restrictiva y la gran área de peligro, un modelo basado en imágenes aéreas proporciona una estrategia de monitoreo eficiente.

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT - Chile) y el Ministerio Federal de Educación e Investigación (BMBF - Alemania), así como el financiamiento del programa de apoyo "Support the Best" (StB) de la Technische Universität Dresden. Además, expresamos nuestro agradecimiento a la Corporación Nacional Forestal (CONAF - Chile) por su apoyo y a la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI - Chile) por la gestión de los esfuerzos logísticos (vuelos).

REFERENCIAS

- [1] Primer Simposio Internacional de Geociencia y Teledetección GRSS-IEEE “Una Mirada al Estado del Arte de la Geociencia y la Teledetección en Chile y el Mundo.” Junio 15 & 16, 2017, Chile.
- [2] Nagai M., Chen T., Shibasaki R., Kumagai H., Ahmed A., 2009. UAV-Borne 3-D Mapping System by Multisensor Integration. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, N°3, pp. 701- 708.
- [3] J.L. Schönberger, F. Fraundorfer, and J-M Frahm, “Structure-from – motion for mav image sequence analysis with photogrammetric applications” *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, vol. XL-3. Pp. 305-312, 2014
- [4] K.E. Joyce, S. E. Belliss, S. V. Samsonov, S. J. McNeill, and P. J. Glassey, “A review of the status os satellite remote sensing and imagen processing techniques for mapping natural hazards and disasters”, *Progress in Physical Geography*, 33(2). pp 183-207.
- [5] Lillesand T., Kiefer R., Chipman J., “Remote Sensing and Image Interpretation” sixth edition , John Wiley & Son, Inc. 2008.
- [6] Handbook of Aiborne laser scanner, Assoc. Precise Survey Appl. Technol., Tokyo, Japan, 2004.
- [7] Smith, M. W., Carrivick, J. L., Quincey, D. J., 2015. Structure from motion photogrammetry in physical geography. In: *Progress in Physical Geography*, doi 10.1177/ 0309133315615805
- [8] Niethammer, U., Rothmund, S., Schaderer, U., Zeman, J., Joswig, M., 2011. Open source image-processing tools for low cost UAV-based landslide investigations In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 38-1/C22, pp. 1682-1777
- [9] Lucieer, A., de Jong, S. M., Turner, D., 2014. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography, In: *Progress in Physical Geography*, vol. 28(1), pp. 97-116.
- [10] Turner, D., Lucieer, A., De Jong, S. M., 2015. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). In: *Remote Sensing*, vol. 7, pp. 1736-1757.
- [11] Onemi. “Temporales siglo XX”, agosto 2001. Repositorio digital de la Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI), <http://repositoriodigitalonemi.cl/web/handle/2012/301> fecha: 24/04/2018
- [12] Onemi, “Informe Técnico Consolidado, desborde de río Las Minas, Punta Arenas-Región de Magallanes, 4 diciembre de 2012, Chile.
- [13] Matsuura, S., Olavarria, M., Koto, S., Villarroel, H., Valenzuela, M., Risk investigation on sediment-related disasters in Punta Arenas, Maggellan Region, Chile, In: *Journal of the Japan Landslide Society*, vol. 40 (2003-2004) (5), pp. 424-433.
- [14] Harambour, F., Mutschke, E., Harambour. S., Sobarzo, R., Passeron, C., 2008. Mejoramiento Integral y Prevención de Riesgo Aluvional Río Las Minas. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- [15] Shaoyi Du, Nanning Zheng, Shihui Ying, Jianyi Liu, 2010. Affine iterative closest point algorithm for point set registration, *Pattern Recognition Letters*, Volume 31, Issue 9, Pages 791-799.
- [16] James, M. R., Robson, S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 39(10): 1413-1420.
- [17] Eltner, A., Schneider, D., 2015. Analysis of different methods for 3D reconstruction of natural surfaces from parallel-axes UAV images. In: *Photogrammetric Record*, vol. 30(151), pp. 279-299.
- [18] Schneider, D., Schwalbe, E., Maas, H.-G., 2009. Validation of geometric models for fisheye lenses. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64(3), pp. 259-266.
- [19] Mader, D., Blaskow. R., Westfeld, P., Maas, H.-G., 2015. UAV-based acquisition of 3D point cloud – A comparison of a low-cost laser scanner and SfM-tools, In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40-3/W3, pp. 335-341.
- [20] Pfeifer, N., Glira, P., Briese, C., 2012. Direct georeferencing with on board navigation components of light weight UAV platforms. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 39-B7, pp. 487-492.
- [21] Eling, C., Klingbeil, L., Kuhlmann, H., 2015. Real-Time Single-Frequency GPS/MEMS-IMU Attitude Determination of Lightweight UAVs. In: *Sensors*, vol. 15(10), pp. 26212-26235.
- [22] Schacht-Rodríguez, R., Ortiz-Torres, García-Beltrán, C.-D., Astorga-Zaragoza, C.-M., Ponsart, J.-C., Pérez Estrada, A.-J. 2018. Design and development of a UAV Experimental Platform. In: *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 16 pp. 1320-1327.



Robert Koschitzki received his Dipl.-Wirt.-Ing. from TU Dresden, Germany, in 2009. In 2010 he joined the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing at TU Dresden as a Research Assistant. His research interests include the development of photogrammetric algorithms for environmental monitoring tasks focusing on glacial lake outburst floods (GLOF).



Ellen Schwalbe received her Ph.D. degree at TU Dresden, Germany, in 2013 for the development of methods for the determination of high-resolution spatio-temporal motion vector fields of glaciers from image sequences and multi-temporal laser scans. She is currently working as a Postdoc at TU Dresden, with research interests the development of photogrammetric methods for environmental monitoring.



Melanie Kröhnert received her M.Sc. degree in Geoinformation Technologies from TU Dresden, Germany, in 2013. She joined the Department of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Dresden, as a PhD student in 2015.



Carlos Cárdenas received his Ph.D. degree in Radar for geophysics applications from Technische Universität Hamburg – Harburg, (TUHH) Hamburg, Germany, in 2007. His research interests include satellites and local Remote Sensing applications with emphasis on glaciology, monitoring on Natural Disasters. He is currently research from GAIA – Antarctica Research Center from Universidad de Magallanes (UMAG), Chile.



Hans-Gerd Maas Received his Ph.D. in Photogrammetry from ETH Zurich, Switzerland, in 1992. Since he is 2000 Professor of Photogrammetry and head of the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing at TU Dresden, Germany. From 2004-2008 he was President of ISPRS Commission V, from 2009-2012 Dean of the Faculty of Forest-, Geo-and Hydro sciences at TU Dresden.