

# MONITOREO DE ÁREAS DE RIESGO EN LOS ANDES CENTRALES, A TRAVÉS DEL USO DE SIG Y DATOS SATELITALES

(Monitoring of risk areas in the central Andes using SIG and satellites data)

Jorge Arigony-Neto<sup>\*-\*\*,</sup> Rafael R. Ribeiro<sup>\*\*</sup>, María Cecilia Dávila García<sup>\*\*</sup>,  
Jefferson Cardia Simões<sup>\*\*</sup>, Edson Ramírez<sup>\*\*\*</sup>

\*Universidade Federal do Rio Grande, Instituto de Ciências Humanas Rio Grande - RS - Brasil; jorgearigony@furg.br;

\*\*Núcleo de Pesquisa Antárticas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, rrr.3@pop.com.br;

\*\*\*Universidad Mayor de San Andrés, Instituto de Hidráulica e Hidrología, La Paz, Bolivia, eramirez@accelerate.com

(Recibido el 17 de julio de 2009 y aceptado el 24 de agosto de 2009)

## Resumen:

Algunas áreas de los Andes centrales son afectadas históricamente por riesgos naturales que ocurren en los ambientes de glaciares. Ya que los glaciares son muy sensibles a los cambios de temperatura, esperamos una intensificación de los procesos de glaciación, como respuesta al calentamiento de la atmósfera detectado en los Andes, que posiblemente reduzca los intervalos de desastres y riesgos relacionados con la glaciación. En este contexto, el presente estudio busca probar el potencial de la base de datos CBERS-2B, para ser usada en la identificación de áreas de riesgos en los Andes. Para ello, rutinas semiautomáticas para procesamiento de imágenes e integración con modelos digitales de elevación (DEM) fueron implementadas en un Sistema de Información Geográfica (GIS). Los datos/información CBERS-2B CCD (20 metros de resolución espacial) y HRS (2,5 metros de resolución) son usados para la clasificación del hielo, la nieve, las aguas, rocas y sombras, mientras que un DEM de 15 metros derivado de imágenes ASTER fue usado para la generación de información de pendiente y de aspecto, y delimitación automática de las áreas de influencia. Así, al usar los productos de la clasificación de imágenes y los datos generados por el DEM, un algoritmo clasificatorio fue construido con reglas definidas para seleccionar áreas debajo de los glaciares, con potencial para depósitos de detritos. Para avalar el método desarrollado, se hizo una comparación con el área de riesgo delimitada en la montaña Jacha Pakuni (en el rango/ámbito de la montaña Tres Cruces, en Bolivia) y el área afectada por un riesgo de glaciación ocurrido en 2007 en la mina Pakuni. El área afectada por el fluido de escombros fue totalmente incluida dentro de la zona de riesgo delimitada por la aproximación aquí desarrollada, lo que mostró el potencial del método.

**Palabras clave:** CBERS 2B, áreas de riesgo, desastres naturales, peligros naturales.

## Abstract:

Several areas in the central Andes are historically affected by natural hazards occurring in glacial environments. As glaciers are very sensitive to temperature changes, we expect an intensification of glacier processes as response to the atmospheric warming detected in the Andes, possibly reducing the intervals of glacier-related disasters and hazards. In this context, the present study aims to test the potential of CBERS-2B data to be used for the identification of risk areas in the Andes. For that, semi-automatic routines for image processing and integration with a digital elevation models (DEM) were implemented in a Geographical Information Systems (GIS). CBERS-2B CCD (20-meters spatial resolution) and HRS (2,5-meters resolution) data are used for classification of ice, snow, waters, rocks and shadows, while a 15-meters DEM derived from ASTER imagery was used for the generation of slope and aspect information, and automatic delimitation of the catchment areas. Then, using the products of image classification and the data generated from the DEM, a tree classification algorithm was built with rules defined to select smooth areas just downward the glaciers. In order to validate the developed method, a comparison was done with the risk area delimited in the Jacha Pakuni Mountain (Tree Cruces mountain range, Bolivia) and the area affected by a glacier hazard occurred in 2007 at Pakuni mine. Hereby, the area affected by the debris flow was totally included within the risk zone delimited by the developed approach, showing the good potential of the method.

**Key words:** CBERS 2B, areas of risk, natural disasters, natural dangers

## 1. INTRODUCCIÓN

**D**urante el siglo XX acontecieron modificaciones importantes en el medio ambiente natural, como resultado del desenvolvimiento económico de la humanidad. Se estima que el planeta sufrió un aumento en su temperatura en orden de  $0,6 \pm 0,1^\circ \text{C}$  durante este periodo. Para el grupo de trabajo I del Panel Intergubernamental para Cambios Climáticos (*Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC*), la mayor parte de este aumento ocurre debido a la intensificación de las concentraciones de los gases responsables por el efecto invernadero, provenientes de actividades antrópicas (IPCC, 2007). El estudio de esas modificaciones en los ecosistemas, en consecuencia de las alteraciones climáticas, es extremadamente importante, pues puede ejercer presiones sociales y económicas sobre

la humanidad, cuyo desenvolvimiento se basa en la explotación de recursos naturales.

Desastres naturales a partir de ambientes glaciares, normalmente afectan a las poblaciones que viven en altas montañas. Podemos recordar recientemente (2007) el desprendimiento de un glaciar, que fue registrado en la mina Pakuni, localizada en la Provincia de Inquisivi, del departamento de La Paz (Bolivia), en el que el movimiento de sedimentos se dislocó del cerro Jacha Pakuni y dejó un saldo de 16 casas enterradas, sin contar la destrucción de máquinas y grandes pérdidas materiales (Ramírez, comunicación personal).

El calentamiento global es considerado un importante componente del riesgo de desastres naturales, pues los ambientes glaciares son muy sensibles al calentamiento

atmosférico y responden rápidamente al mismo. Donde hay una rápida reducción de los glaciares, pueden ser encontradas áreas empinadas expuestas con potencial para el flujo de material no sólido. Debido a la grande dificultad logística para monitorear potenciales áreas de peligro en regiones montañosas, la utilización de satélites es una excelente herramienta para identificar y acompañar esos cambios (Huggel, et al., 2004).

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

La cordillera Tres Cruces (67° 22' - 67° 32' W y 16° 47'-16° 09' S) tiene aproximadamente 35 km de longitud y 10 km de ancho (Ver figura 1). Se localiza a cerca de 150 km de la ciudad de La Paz, tiene su inicio al sudeste del río La Paz, extendiéndose hasta la ciudad de Ventillaque. En 1975, su superficie glaciar fue estimada en 39 km<sup>2</sup> (Willians *et al.*, 1988), contando con 156 heleros. También son encontradas diversas lagunas, siendo las más extensas: Huallatani, Laramkkota, Octa Kkota y Chatamarca. Sus cuatro pequeñas usinas hidroeléctricas se distribuyen a lo largo del río Minguillas, donde su nacimiento se forma por el derretimiento glaciar. En una escala continental, contribuye para la creciente de la cuenca amazónica. Diversos picos tienen más de 5.000 m, siendo el más elevado el Jachancunollo, que tiene una altitud de 5.900 m, seguido por el Gigante Grande, con 5.807 m. La actividad de minería de casserita es bastante intensa en las minas de Pakuni, Malachuma y Argentina.

## 3. DATOS DIGITALES

### 3.1 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

El sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) fue lanzado en 2000, a

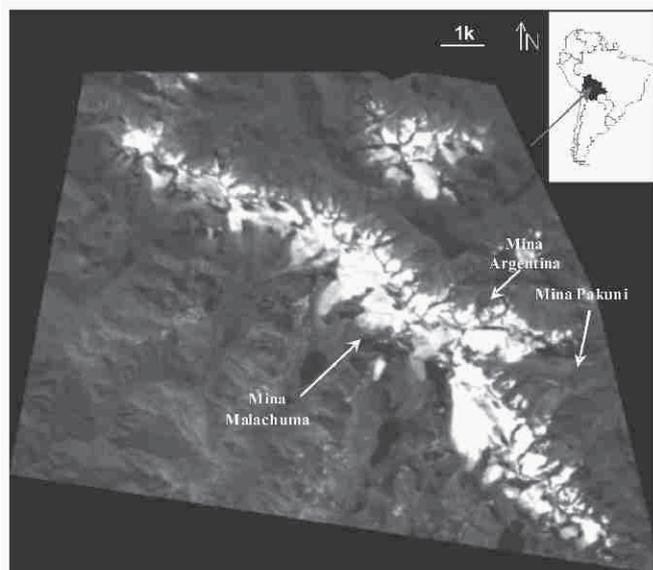


Figura 1. Localización de la Cordillera Tres Cruces (flecha roja) y las principales minas de la región. Satélite CBERS-2B CCD banda 3, adquirida el 28 de mayo de 2008.

bordo del satélite Terra, llevando 3 instrumentos: una cámara visible e infrarrojo próximo (*Visible- Near InfraRed*), con 4 bandas multispectrales (3 en el nadir y 1 en la trasera-back nadir); una cámara infrarrojo media 37 (*Short-Wave InfraRed*), con 6 bandas y 30 metros de resolución, y una cámara infrarrojo termal (*Thermal InfraRed*), con 5 bandas y 90 metros de resolución. En este estudio fue utilizada una imagen del sensor, obtenida el 29 de mayo de 2004.

### 3.2 China- Brazil Earth-Resources Satellite

El CBERS-2B, lanzado en septiembre de 2007, es muy similar a sus predecesores CBERS 1 y 2. Entre tanto, este presenta algunas modificaciones, como la substitución de la cámara *Infrared Multispectral Scanner* (IRMSS) por una *High Resolution Cámara* (HRC). Esta cámara (HRC) opera en las bandas de lo visible y de lo infrarrojo próximo, generando imágenes con 27 x 27 km, con 2,5 m de resolución. Para este estudio fueron utilizadas dos imágenes de este satélite, obtenidas en mayo de 2008, siendo una de ellas del sensor *Charge Coupled Device* (CCD) y otra del HRC.

## 4. METODOLOGÍA

La figura 2 presenta el organigrama con las etapas del procesamiento y análisis de los productos obtenidos.

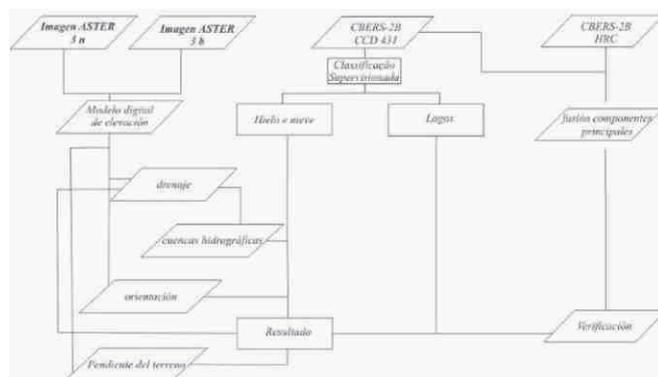


Figura 2. Organigrama del estudio.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 3 muestra los resultados obtenidos, siguiendo el organigrama del estudio. En primer lugar, se obtuvo el Modelo Digital de Elevación (MDE) del área de estudio (ver figura 3.1) utilizando el programa ERDAS™ 8.7. Para la obtención del MDE fueron utilizadas las bandas 3n (nadir) y 3b (trasera) conjuntamente con el nivel 1b del sensor ASTER. Importa señalar que este procedimiento se asemeja al georreferenciamiento, con la principal diferencia de que en el MDE se atribuye una cota (Z) para cada punto de control identificado, además de los valores para X y Y en ambas imágenes.

Durante el desarrollo del estudio fueron identificados doce puntos de control en el terreno (*Ground Control Points - GCP*) y tres puntos de control (*Check Points-CP*) entre las imágenes, para lo que fue necesario utilizar la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 19S y el *World Geodetic System 1984 (WGS84)*. Los valores referentes a los puntos de control fueron extraídos del mapa topográfico realizado por Jordan en 1975 (Jordan, 1991). A partir de estas informaciones fueron generados, de forma automática, sesenta puntos de amarre (*tie points*) entre las dos imágenes.

Posteriormente, y en combinación con los GCP, fue generada una imagen epipolar por rotación y muestreo de bandas, que permitió obtener un MDE absoluto con 15 metros de resolución. La diferencia entre el MDE/ASTER y los CP fue de  $\pm 9\text{m}$ . A partir del MDT fue posible extraer diversos datos (capas) relativos a las características topográficas del sector como: drenaje (Ver figura 3.2), orientación (Ver figura 3.5) y pendiente del terreno (Ver figura 3.4). A través de la capa de drenaje fue posible obtener informaciones relacionadas a las cuencas hidrográficas (Ver figura 3.3), lo que facilitó la identificación de once cuencas diferentes.

Las grandes variaciones de la topografía y la radiación ocasionan, normalmente, características espectrales heterogéneas en la cobertura de nieve de las regiones montañosas. Además, el contraste de iluminación de esas áreas, asociado a las frecuentes nubes y deposición superficial de nieve, puede dificultar la identificación de los límites de las masas de hielo. Delimitar con exactitud las extremidades de un glaciar es una tarea difícil, ya que la lengua de los glaciares puede estar cubierta por fragmentos rocosos, lo que torna su respuesta espectral similar al entorno. Por lo tanto, para extraer las formas de nieve y hielo fue necesario utilizar una imagen del satélite CBERS 2B CCD de composición 4,3,2 (RGB) (Ver figura 3.6). Una vez realizada esta composición a colores, las extremidades de los glaciares (Ver figura 3,8) y de los lagos fueron identificadas y clasificadas a través del método de la máxima verosimilitud. Sin embargo, las áreas de los lagos acabaron mezclándose con las áreas de sombra, lo que tornó más aconsejable su vectorización de forma manual (Ver figura 3.7).

En la etapa siguiente fueron cruzados los datos de las cuencas hidrográficas y de las áreas de nieve y hielo (Ver figura 3.9). Para sobreponer los planos de información generados en este estudio, fue utilizado el *software IDRISI™ Andes*. En esta etapa, se observó que el comportamiento de las masas de hielo no era homogéneo, lo que significa que los glaciares no poseían la misma distribución espacial en la cordillera. Para observar mejor esta situación, sobrepusimos los datos de nieve y hielo sobre el mapa de orientación (Ver figura 3.10) logrando, de esta manera, observar que los controles climáticos son

claramente identificados al comparar la extensión del frente de los glaciares de orientación este-norte con los glaciares de orientación oeste-sur. Este fenómeno puede estar relacionado con la diferente exposición solar de las vertientes. Durante la mañana, las nubes pueden ser encontradas en altitudes bajas, exponiendo así los glaciares de orientación este-norte a la radiación directa del sol. Ya en el período de la tarde, la nebulosidad alcanza su posición más elevada en la troposfera, absorbiendo gran parte de la radiación y dejando las vertientes de orientación oeste-sur más abrigadas (Jordan, 1985). Debido a que las extensiones son muy pequeñas, decidimos excluir de nuestro análisis estos sectores.

Continuando con el estudio, realizamos un *overlay* de los datos de los glaciares con la cuenca hidrográfica (ya excluido el sector norte-este) y la capa de orientación. Posteriormente, adicionamos la capa de la pendiente (en este estudio fueron consideradas solamente áreas entre  $0^\circ$  y  $24^\circ$  de pendiente en las que, efectivamente, podría acumularse un deslizamiento de rocas). Por último, agregamos la capa de drenaje (con un *buffer* de 30 m) a la capa anterior. Se optó por este procedimiento debido a que la capa original "drenaje" no era representativa de las condiciones reales en el terreno, pues era muy "estrecha" (Ver figura 3.12).

Para la verificación de la metodología desarrollada fue realizado un procedimiento que recibe el nombre de fusión. El objetivo de esta técnica es realzar la resolución espacial de una imagen multiespectral. Se utiliza una imagen de alta resolución (en este caso, una imagen HRC con 2,5 m) para ampliar la resolución espacial de una imagen multiespectral de baja resolución (CCD con 20 m). Se optó por el método de los "Componentes Principales", toda que éste mantiene las características radiométricas de las escenas. En esta etapa, también la capa obtenida en los procedimientos anteriores fue sobrepuesta a estas informaciones.

La imagen "fusionada" permitió identificar el área de la cordillera Tres Cruces en la que ocurrió un evento de aluvión (mina Pakuni), donde un sector interno del glaciar se desprendió, y arrastró -a lo largo de su curso- rocas y material no consolidado (Ver figura 3.16, 3.18 y 3.19). En la figura 3.17 (Ver) fue posible evaluar, de forma satisfactoria, la utilización de la metodología desarrollada para la identificación de áreas de riesgo en la cordillera Tres Cruces.

## 6. CONCLUSIÓN

La combinación de datos de sensoramiento remoto con el geoprocésamiento presentó un resultado satisfactorio en la detección de flujos de sedimentos en el área de la cordillera Tres Cruces, pudiendo también ser empleada esta técnica para la planificación y uso del suelo.

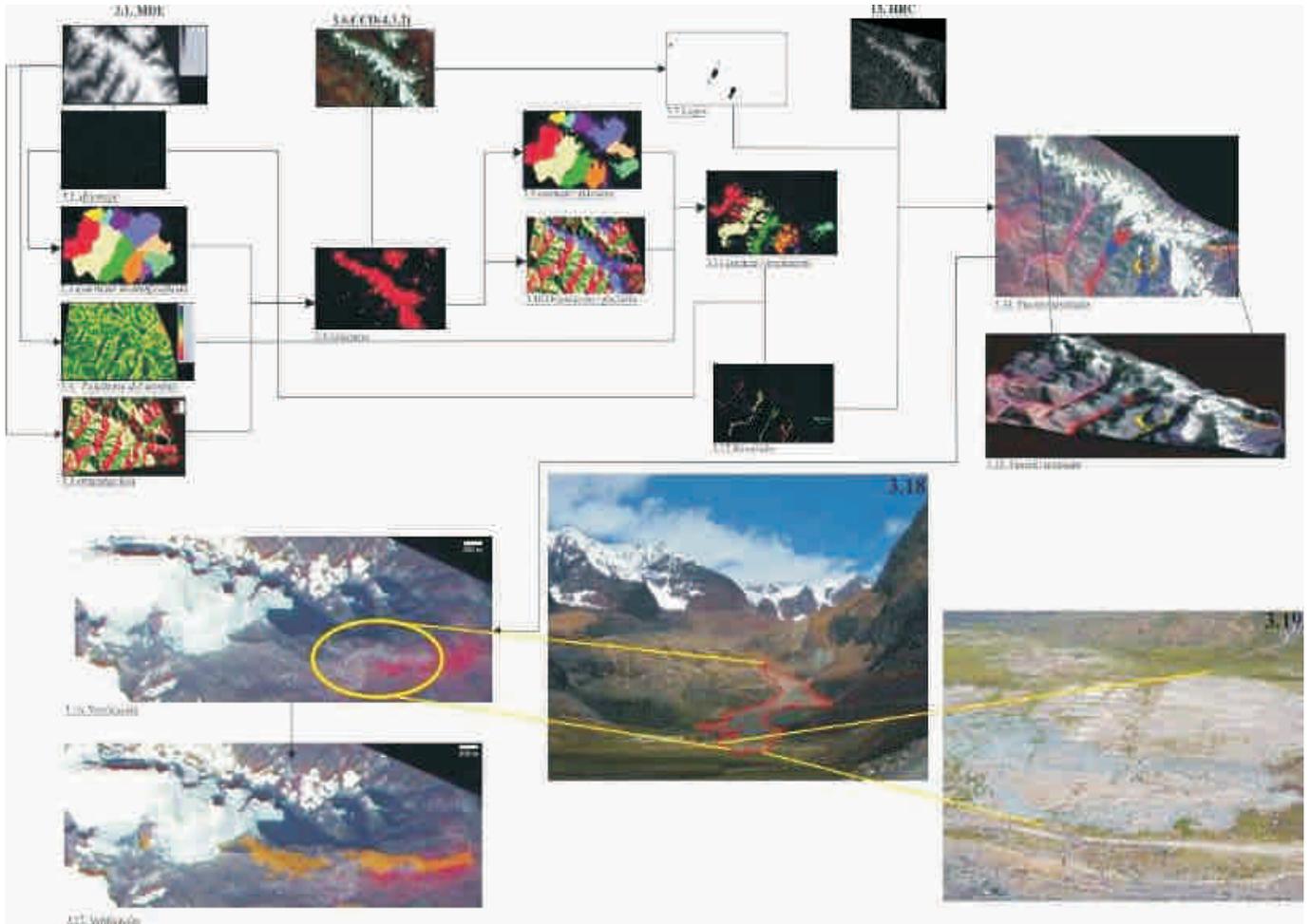


Figura 3. Resultados obtenidos

## 7. REFERENCIAS

- Huggel, C.; Kääb, A.; Salzmann, N. (2004). GIS-based modeling of glacial hazards and their interactions using Landsat-TM and IKONOS imagery. *Norwegian Journal of Geography*, n. 58, p.61-73.
- IPCC. Climate Change (2007): Climate change impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers - Brussels - April, n. 23, 2007.
- Jordan, E. Recente (1985). glacier distribution and present climate in the central Andes of South America: *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glzialgeologie*, n. 21, p. 213-224.
- Jordan, E. Die (1991). Gletscher der bolivianischen Anden. Eine photogrammetrisch - kartographische bestandsaufnahme der gletscher boliviens als grundlage fur klimatische deutungen und potential fur die wirtschaftliche nutzung. Franz Steiner Verlag. Tese (doutorado). Stuttgart, p. 365.
- Williams, R. S., Jr.; Ferrigno, J. Satellite (1998). Image atlas of glaciers of the world: U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-I (Glaciers of South America), p. 206.