

Análisis digital de terreno y metodología usada para el relevamiento de glaciares de escombros inactivos, activos y proto-Lobes, en la Subcuenca del Rio de las Salinas. Cordillera Frontal. Provincia de San Juan. Argentina.

Ana Paula Forte¹

¹ Universidad Nacional de San Juan. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
Instituto de Geología (INGEO).
Código Postal - 5400 - Rivadavia, San Juan - Argentina.
Anapau.forte@gmail.com

Abstract

The goal of this paper is to describe the methodology used in the survey of rock glaciers and mapping of the hydrographic system, from digital terrain analysis, of the Rio de las Salinas basin. This work is framed into the "Inventario de Glaciares de la Cuenca del Rio San Juan" Project, and it corresponds to an agreement between of the Government of San Juan and the Facultad de Ciencias, Exactas, Físicas y Naturales de la UNSJ. This work has been divided into three stages: firstly, we performed digital terrain analysis, which includes the choice and preprocessing of Digital Elevation Models (DEM), and the delineation of watersheds and the layout of the drainage network. Secondly, we studied the presence of rock glaciers and the compilation of the database, with the physical parameters and descriptions of each body. Finally, we performed the interpretation of results. Precision in mapping of the watershed of the different sub-basins and drainage network is limited by the resolution of the Digital Elevation Model, however the fifth and sixth basins order, have been fairly well mapped. The subwatershed study has an area of 323.32 km², of which 19.84% is occupied by 122 rock glaciers of different types (Cryogenic active, inactive and protalus, and probably some Glacigénicos). The protalus are the most abundant rock glacier type in this environment. Inactive rock glaciers are usually larger and occupy old glacial cirques. Nevertheless, are unidentified discovered glaciers or perennial snow patches.

Palabras claves: Digital Elevation Model, digital terrain analysis, Periglacial Geomorfology, rock glaciers's survey.

1. Introducción

La zona de estudio es la Subcuenca del Rio de Las Salinas, una de las afluentes del Rio De Las Lagunas o Salinas (Cuenca del Rio San Juan). Provincia de San Juan, Argentina. Al suroeste del departamento Calingasta (ver figura 1). La zona se emplaza en ambiente periglacial de montaña (Trombotto y Ahumada, 2005), donde se reconocen glaciares de escombros activos, inactivos, proto-lobes, y otras geoformas periglaciales, como lóbulos de soliflucción, laderas con reptación, suelos poligonales (representando ciclos de congelamiento y descongelamiento). Siendo una zona de gran importancia como reserva hídrica en la Alta Cordillera de Los Andes de San Juan. Las coordenadas geográficas de referencia son: 70°15' y 70° 33' de longitud y de latitud 31°2' hasta los 31° 22'. La zona está limitada al norte y al oeste con el límite internacional con la Republica de Chile, dicho límite coincide con las divisorias de aguas entre la Cuenca del Rio San Juan (Subcuenca del Rio Blanco) y la Cuenca del Limarí, en Chile. (Subcuenca del Rio Grande). Hacia el este, el área de mapeo queda delimitada por el Cordón de los Gauchos y al Sur con las divisorias de aguas de la Cuenca del Rio De Las Salinas. El Rio Salinas (Trazo más grueso en la figura 1), es un rio de sexto orden, que drena hacia el sureste hasta confluir en el Rio Blanco (Cuenca de quinto orden). Formando parte de la Cuenca del Rio San Juan. (Rio de Cuarto Orden).

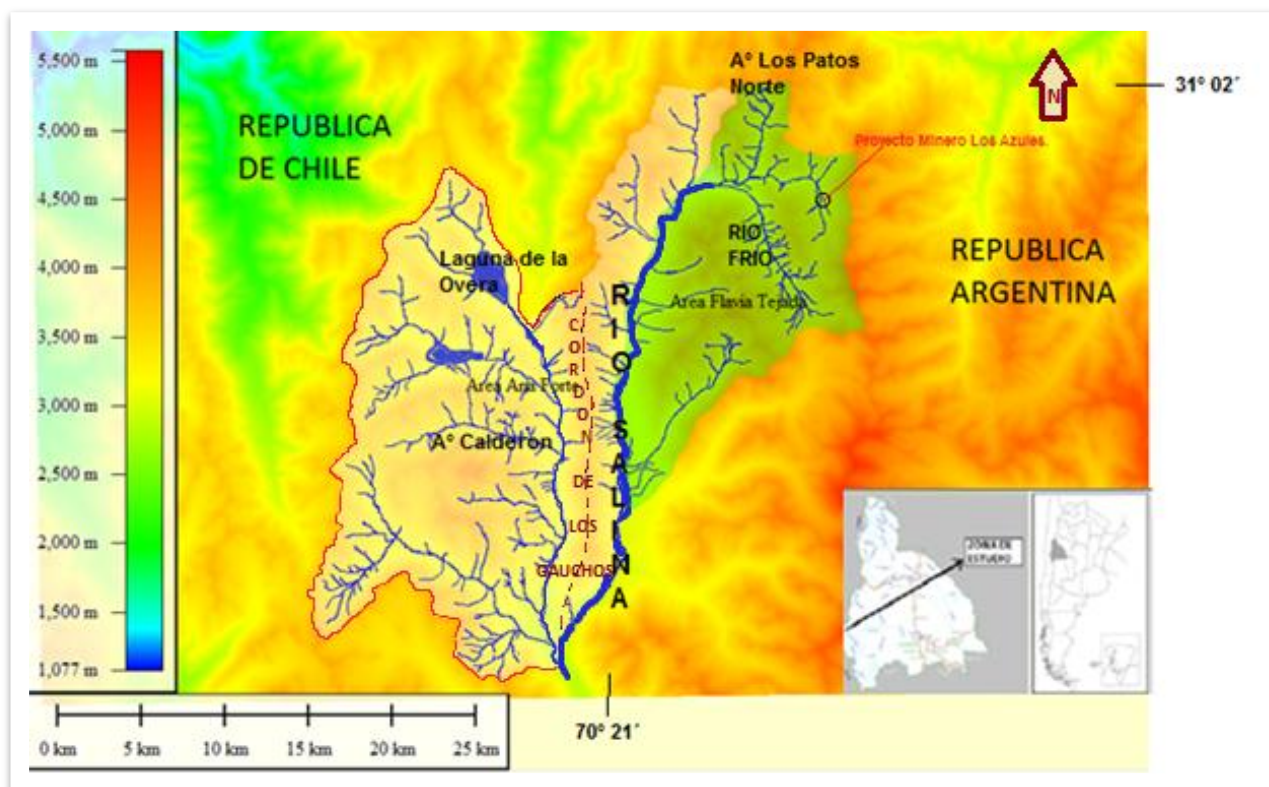


Figura 1: Área de estudio delimitada por líneas rojas solidas y punteadas. En la imagen se observa un Aster-DEM de la zona y la red de drenaje realizada en SAGA GIS. La divisoria de agua de la Subcuenca del Rio De Las Salinas, esta representada por el polígono de borde rojo, también obtenida de SAGA GIS.

La Subcuenca del Rio De Las Salinas, es alimentado principalmente por cuatro arroyos: A°. Quemado, A°. Calderón, A°. Laguna Chica y A°. Laguna Grande. Dicha Subcuenca tiene un área de 323,32 Km² y un perímetro de 583,06 Km. El punto de cierre de la cuenca tiene de coordenadas: 31°21'17.26"S y 70°23'20.63"O. En esta Subcuenca, se han relevado preliminarmente 122 glaciares de escombros, ocupando un 19,84% del total del área de la Subcuenca. La zona analizada se emplaza altitudinalmente entre 2932 y 4200 metros, sin embargo hay que considerar que la cordillera posee alturas mucho mas elevadas a estas latitudes.

2- Metodología de Trabajo.

2.1. Análisis Digital de Terreno.

En primera instancia se realizo la red hidrográfica y la delimitación de las Subcuencas, para luego enmarcar los distintos tipos de litoglaciares o glaciares de escombros en un sistema hídrico. Para ello se trabajo con Modelos Digitales de elevación que fueron procesados en el software libre SAGA GIS y visualizados en Global Mapper.

2.2.1 Selección y preprocesamiento del DEM

Basados en la experiencia y sugerencia de organismos, como GLIMS, el cual es un importante referente en materia de Inventario de Glaciares, se esta utilizando: SRTM y GDEM2, ambos globales y gratuitos. El Modelo Digital de Elevación (DEM) que mejor resultados ha dado es ASTER GDEM 2 (ASTER Global Digital Elevation Model versión 2), con una calidad de 30 metros de resolución espacial. Ante la posibilidad de que el DEM o MDE posea sumideros se realizo previamente un reprocesamiento del mismo. El relleno o fill de estos puntos sin datos se realizo con el programa SAGA GIS, utilizando el Modulos: *Terrain Analysis>>Preprocessing>> Fill Sinks*.

Por defecto, los DEM Gdem y Srtm, estan proyectados en coordenadas geográficas. El inventario de glaciares, por un convenio nacional, se ha establecido que se realice en coordenadas planas UTM, por lo tanto nuestro DEM deberá ser reproyectado para trabajar en cualquier proyecto SIG. Para ejecutar la reproyeccion se utiliza el módulo del programa SAGA GIS.: *Projection – Proj. 4>>Proj. 4 (Dialog, Grid)*. Este modulo, crea un nuevo sistema de grilla con un nuevo DEM reproyectado. El modulo requiere la especificación de los *Parámetros de la fuente* (Proyección original del DEM FILL: Lat/Long (Geodesic), y de el *Objetivo*: Definimos los parámetros del sistema de proyección: Universal Transverse Mercator (UTM) y Datum: WGS84.

2.1.2. Realización de la red de drenaje.

Otro de los objetivos del trabajo es la obtención de una red de drenaje y sus respectivas cuencas. Para ello es fundamental tener un buen DEM de la zona, con la resolución espacial adecuada. En nuestro caso tendremos 30 metros de resolución. Para elaborar la red hidrográfica debemos usar un DEM sin ruido ni agujeros, por lo tanto, se trabaja con el DEM filled reproyectado.

Para realizar la red de drenaje, a partir de SAGA GIS primero tendremos que generar una grilla de iniciación para los canales, calculando una jerarquía de los futuros canales de la red de drenaje (Strahler Order). Por lo tanto lo primero que se realiza es el *Strahler Order Grid* (Ordena los diferentes tributarios desde el más bajo hacia el más alto). Para esta tarea se uso el Modulo *Terrain Analysis>>Channels>>Strahler Order*.

Luego se genero la red de drenaje para mi sistema (Filled DEM), utilizando el modulo de SAGA *Terrain Analysis >> Channels>> Channel Network*. Se probó con distintos *Segment length*, resultando el de 200 el mas óptimo.

2.1.3. Realización de las cuencas hidrograficas.

Cumplidos los pasos precedentes se esta en condiciones de obtener las cuencas hidrográficas, desde el Sistema de Informacion Geográfica SAGA. Para ello, usamos el modulo *Watersheed basins (extended)*, donde debemos ingresar la grilla, el DEM y como drainage network el channel network que mejor resultado haya dado.

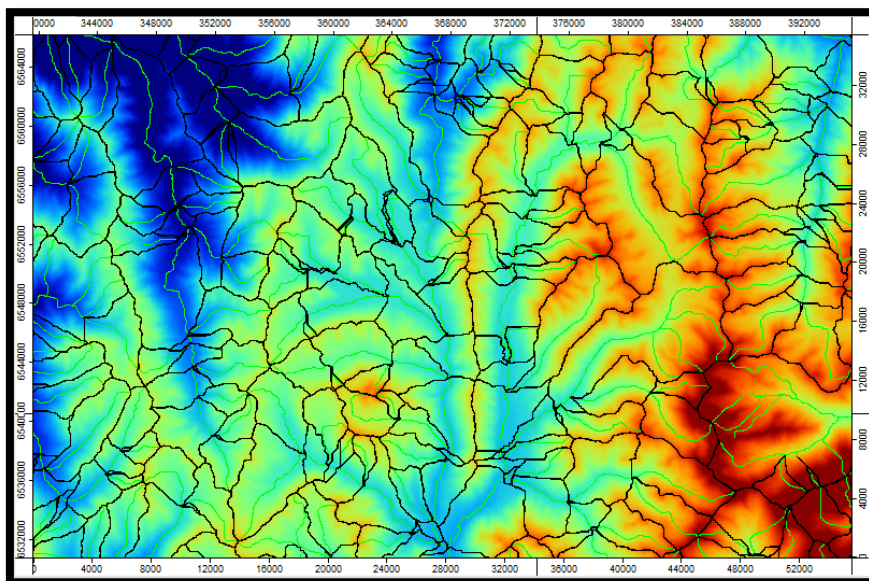


Figura 3: Subcuencas y Channel Network obtenido desde SAGA GIS, previa a la edición. El Channel Network se ha realizado para tramos mayores a 200 pixeles.

2.2 Relevamiento de Glaciares de Escombros o Litoglaciares.

2.2.1 Definiciones de los distintos tipos de Glaciares de Escombros Relevados.

Glaciar de Escombros o Litoglaciar: Mesoformas sedimentarias constituidas por rocas y detritos congelados, con hielo intersticial y lenticular, que se mueven lentamente, pendiente abajo con una velocidad entre 1 y 150 cm/año, (Trombotto y Ahumada, 2005). Están constituidos por una cobertura detrítica, que actúa como capa activa y un núcleo congelado o permafrost del litoglaciar (Permafrost esporádico).

De acuerdo a su génesis se clasifican en: Glacigénicos o Criogénicos.

- *Glaciares de escombros glacigénicos o Debris Rock Glacier:* Son litoglaciares que se originan a partir de glaciares descubiertos o blancos, con balances negativos. Suelen presentar facies de núcleos de hielo masivo o lenticular. Pueden ser considerados como el producto del soterramiento progresivo y subsiguiente deformación del núcleo de hielo del glaciar. Por lo tanto, para definir un glaciar de escombros glacigénico debe existir un glaciar descubierto (o sus restos) en las cabeceras del valle.
- *Glaciares de Escombros criogénicos, Glaciares de Escombros Verdaderos, Glaciares de Escombros primarios o Talus Rock Glacier:* Son formas, relativamente mas pequeñas, pero pueden alcanzar los fondos de valles y reptar como grandes lobulos, incluso algunos se pueden abrir como lenguas espatuladas. El detrito suele hacer de sostén primario, mientras que el hielo se dispone en forma intersticial. Sin embargo, en años con balance positivo, es posible que capas de nieve estacional queden enteramente incorporadas en el glaciar de rocas y terminen formando lentes de hielo masivo. Son características en estas geoformas, una depresión al pie de la pendiente y sus frentes muy sobresalientes y ascendentes. Estos tipos de glaciares de escombros suelen formar grupos y coalescer al pie de las laderas montañosas, o bien sobreponerse unos sobre otros, formando sistemas escalonados. Vale aclarar que son geoformas de ambiente periglacial.
- *Protalus, prótalus lobulados, Proto-Lobs, Protalus ramparts o embriones de glaciares de escombros criogénicos:* Son embriones de glaciares de escombros criogénicos, quedan muchas veces colgados del talud y no bajan hasta el nivel de base local. Son formas menores que pueden evolucionar a glaciares de escombros. Generalmente no poseen buenos diseños de movimiento.

De acuerdo a su funcionalidad se clasifican en:

- *Glaciares de escombros activos:* Todos aquellos litoglaciares que muestran signos de movimiento en su superficie. Además poseen frentes o narices con fuertes pendientes, mayor a 30° (Trombotto y Ahumada, 2005).
- *Glaciares de escombros inactivos:* Los macro-procesos criogénicos, intrínsecos al glaciar, están detenidos y el hielo es solo detectable por geofísica a grandes profundidades. La pendiente de los frentes de glaciares de escombros considerados inactivos denotaran ángulos menores a 30°. La reducción del hielo interno, suele quedar expresado por estructuras de colapsos, depresiones, señales de termokarst y la invasión de la vegetación.

2.2.2 Digitalización de los distintos tipos de Glaciares de Escombros.

Los glaciares de escombros han sido digitalizados manualmente, a partir de visualización de imágenes de alta resolución espacial y el apoyo de campo de algunas zonas aledañas. Para el inventario, hasta el momento, se han utilizado imágenes provenientes de tres satélites diferentes: LANDSAT, TERRA y CBERS 2B. Las Imágenes del sensor TM del satélite LANDSAT 5, presentan una resolución espacial de 30 m y se utilizaron como base para la georreferenciación, que se realizo con el Software gvSIG 1.11. Las Imágenes del sensor ASTER del satélite TERRA se empleó el producto del centro distribuidor de datos LP

DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) que corresponde a imágenes ASTER Level-1A orto-rectificadas, en formato GeoTIFF. La resolución espacial de estas imágenes es de 15 m en la parte del visible y el infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Estas fueron empleadas para ajustar los límites de las cuencas hídricas obtenidas a partir del MDE y para la delimitación de glaciares y geformas periglaciales. Se dispone de estas imágenes desde 1999 hasta la actualidad, pero a partir del mes de mayo del año 2008 el sensor ASTER presentó algunas anomalías debido a las cuales las bandas del infrarrojo medio (4, 5,6 y 7) están dañadas, por lo que tan solo se puede trabajar con las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano (bandas 1,2 y 3). Y las imágenes del sensor HRC (High-Resolution Panchromatic Camera), del satélite CBERS 2B (China Brasil Earth Resources Satellite). Tienen 2,7 m de resolución espacial y se pueden obtener desde la página del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil (<http://www.inpe.br>). Existe una serie de criterios intrínsecos a cada imagen individual que resultan importantes y fundamentales para seleccionar correctamente las imágenes idóneas para un inventario de glaciares, a saber: fecha de toma de la imagen, cobertura de nieve estacional o temporal, cobertura nubosa y “gains” de la imagen.

Para la digitalización y edición de capas vectoriales, se utilizó el programa Kosmo 2.01. En el cual se ha utilizado diversas herramientas: crear nuevos polígonos en algunos casos, y en otros generar polígonos adyacentes.

2.2.3. Realización de la Base de datos.

La obtención de la base de datos esta basada en indicaciones a nivel nacionales para formar parte de una compilación de cada inventario de glaciares realizado por cada grupo o nodo de trabajo en la Republica Argentina.

Entre los campos de la base de dato, se ha incluido información básica: provincia en que se está trabajando, el nombre de la cuenca a inventariar y Subcuencas principales. También para aquellos glaciares que tienen nombre propio, el mismo describe en el campo denominado como “Nombre común”.

Los códigos de identificación para cada litoglaciador son: ID GLIM: El código de identificación o ID de un glaciador se genera a partir de las coordenadas geográficas de un punto ubicado en el interior del mismo (ID de un centroide) expresado en longitud y latitud.

Por ejemplo el glaciador identificado con el ID igual a G696661W32309S corresponderá al glaciador que contiene un punto situado a 69.6661° de longitud W y 32.309° de latitud S.

Los parámetros de índole física han sido también medidos. Los cálculos de área de glaciares han sido realizados en KOSMO GIS. Para ello, se creó un nuevo campo denominado Área cuyos datos sean del tipo *Float* y trabajando con funciones matemáticas que pueden ser aplicadas para diversos atributos. Se ha manipulado de modo tal, que los resultados sean obtenidos en Km².

Para hacer el cálculo de altura máxima, media y mínima se utilizo el DEMFill y la extensión Sextante en el Sistema de Información Geográfica Kosmo. Herramientas para capas de polígonos y luego Estadística de grid en polígonos.

3- Resultados y Discusiones.

Como resultado del Análisis Digital de terreno se obtuvieron archivos del tipo Shape de Subcuencas y de Ríos. Luego Se realizo la edición vectorial de los archivos en el sistema de información geográfica Kosmo Gis. En general los resultados de SAGA han sido buenos, salvo algunos casos en que se han editado los polígonos (modificación de vértices, unión de polígonos, etc).

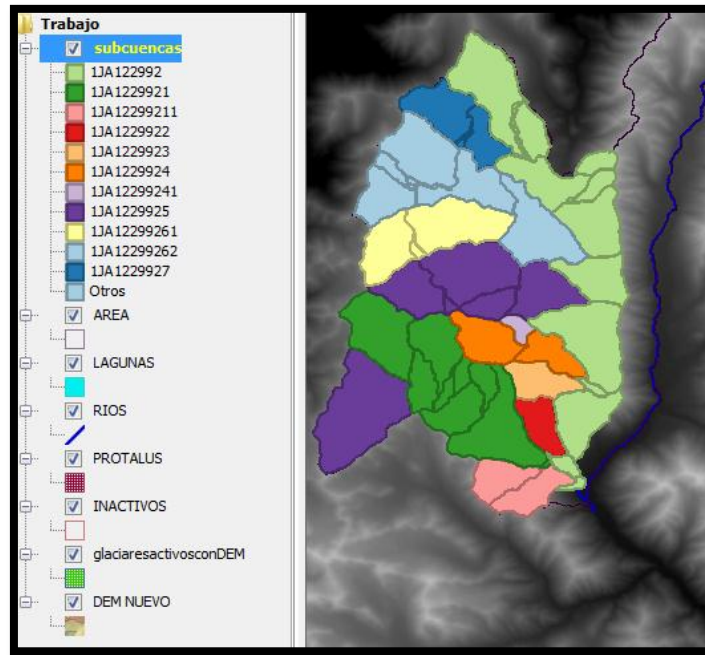


Figura 5: Edición y Codificación de Subcuencas en KOSMO GIS. Cada color representa las subcuencas que han sido codificadas.

Tabla 1. Características de La Subcuenca del Rio De Las Salinas.

Perímetro de Subcuenca De Las Salinas (Km)	583,06
Área Total Subcuenca (Km ²)	323,32
Área Total Ocupada por Litoglaciares(Km ²)	64,146
Área Total Ocupada por Litoglaciares (%)	19,84

Tabla 2. Características de La Subcuenca del Rio De Las Salinas.

Tipo de Glaciares	Cantidad	Área Total (Km ²)
Litoglaciares Activos.	33	13,592
Litoglaciares Inactivos	39	43,383
Protalus	50	7,171
TOTAL	122	64,146

Litoglaciares o Glaciares de escombros activos: han sido mapeados 33 cuerpos de estas características, criogénicos con áreas entre 0,895 Km² y 0,095 km². Los cuerpos que se ubican en las laderas sur son de mayor tamaño (Efecto latitudinal).

Litoglaciares o Glaciares de escombros inactivos En esta figura se pueden visualizar los 39 polígonos de glaciares de escombros inactivos sobre un modelo de elevación digital Aster-GDEM. En la Subcuenca del Rio De Las Salinas, este tipo de litoglaciares de mayor tamaño y en su mayoría han quedado como relictos de una antigua glaciación. Actualmente estas geofomas se encuentran en desequilibrio con el medio en donde están emplazadas. También se observa un mayor desarrollo de los cuerpos en la ladera Sur, por el efecto latitudinal. Muchos de estos cuerpos, parecen tener un origen glaciogénico. Y otros son claramente criogénicos. La superficie máxima de glaciar de escombros es de 7,507 y la mínima 0,055 Km².

Protalus: Se han detectado hasta el momento 50 Protalus, cuerpos de menor tamaño, criogénicos. Considerando el total de estos cuerpos y el porcentaje final de superficie que ocupan, son considerados una importante reserva hídrica. El área máxima es de 0,625 Km².

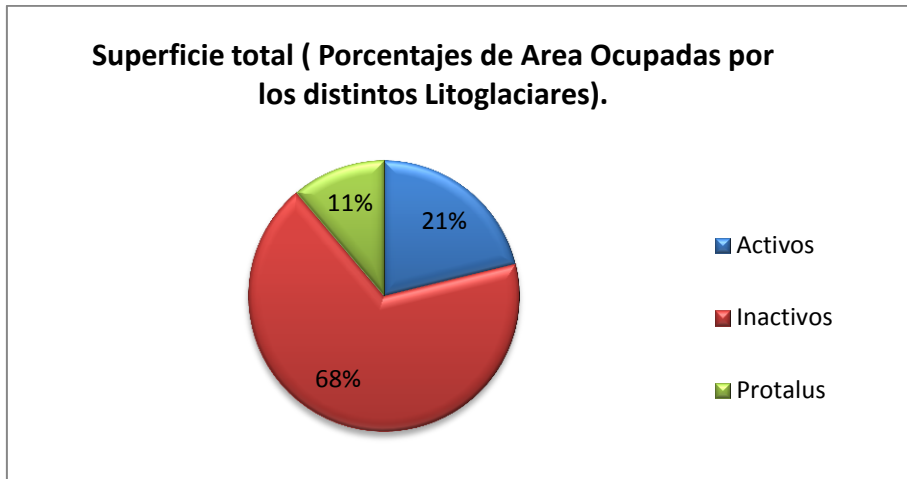


Figura 6: Grafico de Porcentajes de Superficie Ocupada por cada tipo de Litoglaciar.

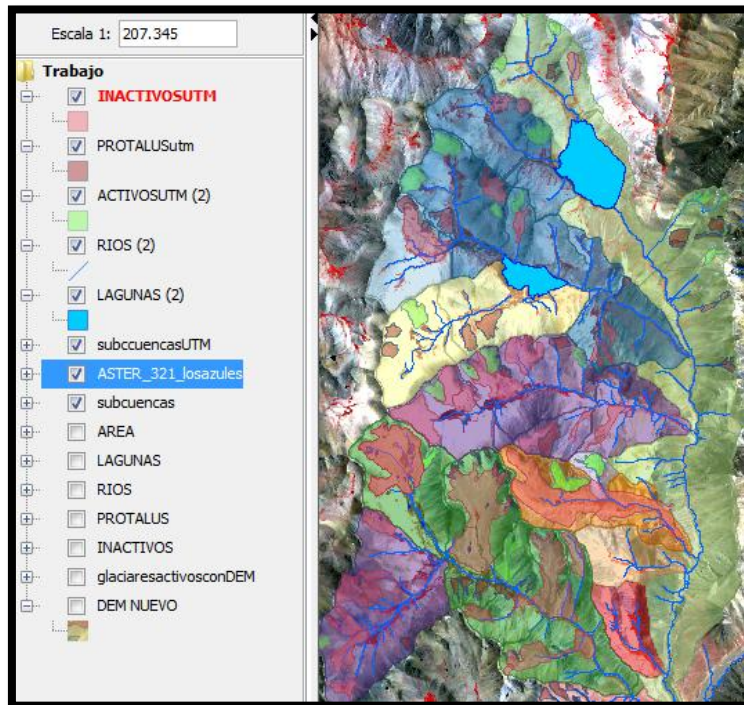


Figura 6: Visualización del proyecto GIS con imagen ASTER de base y capas de Subcuencas, Rios, Cuerpos de Agua y diferentes tipos de litoglaciares.

latitud	longitud	Area	GID =>	MED_DEM	VAR_DEM	MIN_DEM	MAX_DEM	MED_Pendien	VAR_Pendien	MIN_Pendien	MAX_Pendien
31.217373841035	-70.48082303763238	0,271	0	3.652,8527304745285	80,1,1610521953553	3.591,8828125	3.759,208984375	14,731888682531887	73,50688857620761	1,569211840629578	57,01137161254883
31.213875540211	-70.47225110221973	0,571	1	3.583,924579962651	3,354,296510986514	3,496,766835	3,764,71459960	16,830967837861795	113,5906692209194	9,936648437976837	36,816955644625
31.213405615811	-70.43498646909137	0,266	2	3.590,533115616764	2,872,6921141408...	3,478,32421875	3,679,04541015...	13,592941190104886	15,474474288778197	3,249913930892944	20,154972076416016
31.22454879357153	-70.4951340038585	0,414	3	3.548,538980256117	1,002,6609110366...	3,489,976806...	3,644,68408203...	10,622366847860258	47,91209657842928	0	32,8277033830078
31.25139400339578	-70.42944189200972	0,494	4	3.783,7164584700627	6,079,973269721493	3,652,470214...	4,137,77001953...	16,181869259943678	53,124070006388195	3,941982507705688	35,3090406998008
31.257047926262...	-70.44387484521391	0,895	5	3.793,9790849225037	14,858,8946887167	3,628,114990...	4,137,77001953...	21,92414006777441	65,39487505272866	6,087762355804443	42,04988098144531
31.316368078572...	-70.460441212314	0,095	6	3.744,0504910828636	1,281,7623884994...	3,666,186523...	3,813,53125	24,749452117956233	15,118171131979707	8,314345359802246	29,864694949951172
31.1570116599314	-70.4601141529325	0,338	7	3.533,8294617896	1,560,4870323240...	3,456,408891...	3,655,68284179...	11,9534111938743	83,66992157251187	0	31,1252939941406
31.160213712857...	-70.46891782160078	0,174	8	3.520,271341680936	1,339,8410216905...	3,468,061035...	3,595,548984375	16,15276544823494	51,867845843009	0,729617357254028	31,257762908935547
31.136482673095...	-70.48951887001262	0,745	9	3.458,8990036536907	3,245,7135924417...	3,372,797119...	3,626,63354492...	16,4549686805313	89,18157123536315	0,876219928264618	36,05073928833008
31.14874053898804	-70.5037400335615	0,697	10	3.646,7422772988507	6,258,588033810258	3,544,41132...	3,823,08666992...	19,031796351828795	76,48845397583227	0	34,33651351928711
31.177086884869...	-70.37910020839601	0,251	11	3.724,619059502324	7,937,147851936519	3,548,731933...	3,926,4443359375	20,651118969615503	45,14749498576509	9,117729187011719	37,957420349121094
31.152948722791...	-70.49076270578711	0,618	12	3.347,3295930144077	2,503,9018142968...	3,272,761474...	3,534,63818359...	14,392102651472216	95,57391315284295	0	39,974622651833994
31.15635705606...	-70.38299898915662	0,316	13	3.699,219059491398	10,306,9372238835	3,520,218505...	3,941,58325195...	25,017720901604854	18,710929700879205	11,669376372291016	32,921871185302794
31.095026856761...	-70.44370837553214	0,191	14	3.535,5974364211343	1,366,4796094410...	3,478,000488...	3,632,25561523...	15,670642795404458	39,97031171037338	6,384785175323486	38,02202819213867
31.087921812021...	-70.45640036953337	0,245	15	3.507,9640658895196	1,776,025364909321	3,452,634765...	3,614,61181640...	15,14618244508455	55,9797192404532	3,387225389480591	30,197771072387695
31.107617585565...	-70.466516079531581	0,225	16	3.465,6624046353227	775,8263929374516	3,417,311035...	3,526,58447265...	13,761822604100196	41,347788725030088	2,808111190795898	27,08037567138672

Figura 4: Base de datos, incluidos los campos de altura máxima, mínima, media y la varianza en metros. Y de Pendiente máxima, mínima, varianza y media en grados. Para ello, se uso como base una imagen Raster de Pendiente y el Modelo Digital de Elevación ASTER GDEM.

4. Conclusiones

El Modelo Digital de Elevación (DEM) que mejor resultado ha dado es ASTER GDEM 2 (ASTER Global Digital Elevation Model versión 2), disponible desde octubre de 2011. Esta elección se basa en su calidad: 30 metros de resolución espacial. Las divisorias de cuencas, al igual que la red de drenaje está limitada a la calidad del DEM, sin embargo las cuencas hasta séptimo orden han sido perfectamente identificadas.

Los glaciares inactivos poseen las mayores extensiones. Cabe aclarar que entre estos cuerpos, podría haber cuerpos de glaciares de escombros fósiles no determinados aun. Los protalus con un 11% de superficie, deberían reconsiderarse su importancia como reserva hídrica.

5. Agradecimientos

Muchas Gracias a la Dra. Marcela A. Cioccale, por los conocimientos brindados en el Curso de Análisis Digital de Terreno. Al grupo de IANIGLA, por el taller de Inventario de Glaciares, que ha sido fundamental para la realización de este trabajo. Al Dr. Silvio Peralta, por las sugerencias y correcciones realizadas. Al INGENIO (Instituto de Geología) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la U.N.S.J. por darme la posibilidad de participar de este Simposio.

6. Referencia bibliográfica

Castro, Mariano; Delgado, Silvia; Ferri Hidalgo, Lidia; Zalazar, Laura; Falaschi, Daniel; Lenzano, Gabriela; Masiokas, Mariano; Pitte, Pierre y Ruiz, Lucas. Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial. **IANIGLA – CONICET**. Enero 2012.

Corte, A. 1987. **Geocriología. El Frio en la Tierra**. Ediciones Culturales de la Provincia de Mendoza. En prensa, Mendoza. 398 P.

Rau Frank, Fabian Mauz, Steffen Vogt, Siri Jodha, Singh Khalsa y Bruce Raup. GLIMS Regional Center 'Antarctic Peninsula'. **Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual**. Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory.

Trombotto D.; Ahumada, A. L., 2005. **Los Fenómenos Periglaciares. Identificación, determinación y aplicación**. Tucuman. Argentina. Instituto Miguel Lillo. 131 P.