

Informe Técnico

LAGUNA SALKANTAYCOCHA



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe Técnico N°A01

Cusco 10 de Julio del 2020

Oficina Desconcentrada Macro Región Sur
Instituto Nacional de Investigación en Glaciares
y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM
Ministerio del Ambiente

Contenido

Resumen	3
1. Introducción	4
2. Antecedentes	4
3. Aspectos Generales	4
3.1. Ubicación	4
3.2. Objetivos	5
4. Aspectos Físicos y Climáticos	5
4.1. Meteorología	5
4.2. Geología	5
4.3. Geomorfología	7
5. Peligros de origen glaciar	8
5.1. Situación de la laguna Salkantaycocha	8
5.2. Situación de la pared rocosa	9
6. Modelamiento y análisis de la cadena de procesos	9
7. Conclusiones	11
8. Recomendaciones	12

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Resumen

El retroceso continuo de los glaciares ha dejado la formación de lagunas almacenadas en depósitos relativamente estables sobre roca labrada y también en contenedores inestables como son las morrenas. Dichos lagos pueden drenarse repentinamente, liberando una gran cantidad de agua que puede resultar en cadenas de procesos complejas y potencialmente catastróficas aguas abajo.

En los Andes del Perú se han registrado una serie de eventos de tipo aluvión o más conocido en el ámbito internacional como sucesos GLOF, en las últimas décadas con consecuencias en algunos casos devastadoras (Carey, 2010; Portocarrero, 2014).

La cordillera Vilcabamba ha sido escenario de diversos eventos desastrosos con origen en la cabecera de las cuencas, en los glaciares particularmente, como son los hechos registrados en las cuencas de los ríos Sacsara y Aobamba, solo en el año 1998 se registraron cuatro eventos consecutivos de remoción en masa, siendo el evento del 27 de febrero de 1998 el que destruyó la mayor parte del poblado de Santa Teresa así como las instalaciones de la central hidroeléctrica Machu Picchu (Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2007; Frey et al. 2016).

El suceso del 23 de febrero del 2020, que dejó como resultado la pérdida de vidas humanas y daños físicos en las poblaciones ubicadas cerca del cauce principal a lo largo del río Santa Teresa, a raíz de los datos analizados se cataloga como una avalancha de roca, dado la predominancia de este material sobre el hielo que también formó parte del gran volumen desprendido de la cara sur oeste del nevado Salkantay.

La laguna Salkantaycocha, en la actualidad, evidencia un proceso de cambios abruptos en superficie, producto de la avalancha esta laguna se ha visto considerablemente afectada, dado que el vaso ha sido ocupado por los escombros del mismo, también por importante cantidad de material proveniente de los deslizamientos en los taludes internos. En consecuencia, el volumen de agua que esta laguna albergó antes del evento ha sido expulsada en cantidades significativas durante el evento con el oleaje que sobrepasó el borde libre del dique frontal (9000 m³/s en su pico máximo aproximadamente), y posterior a ello mediante las filtraciones activadas en la base de la morrena frontal.

Este informe técnico es complementario a los informes de inspección emitidos con anterioridad, en el que se precisan datos, además se reajustan hipótesis y estimaciones hechas antes, gracias a la información obtenida en el transcurso de los días hasta la emisión del mismo.

1. Introducción

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montañas - INAIGEM, tiene la misión de fomentar y expandir la investigación científica y tecnológica en ámbitos de glaciares y ecosistemas de montaña, para el beneficio de la población, adoptando medidas de adaptación y mitigación en el contexto de riesgos producidos por el cambio climático.

El INAIGEM como institución encargada de establecer la política pública en glaciares y ecosistemas de montaña; a través de la Oficina Desconcentrada Macro Región Sur ODMRS y en coordinación con la Dirección de Investigación de Glaciares, realizan estudios de gestión del riesgo de desastres asociados a glaciares con la finalidad de identificar peligros, analizar vulnerabilidades, evaluar los riesgos y recomendar medidas de prevención y reducción del riesgo en los ámbitos de las cuencas y subcuencas de origen glaciar.

A efectos del trágico evento ocurrido el 23 de febrero del 2020, el INAIGEM inicia acciones de respuesta rápida en la evaluación y diagnóstico del peligro en el sector de la laguna Salkantaycocha.

En consecuencia, el presente informe técnico contiene una serie de datos procesados y analizados que ayudarán al entendimiento del fenómeno ocurrido y que además brinda conclusiones y recomendaciones que orientarán a la correcta toma de decisiones y por ende a la gestión del riesgo.

2. Antecedentes

El domingo 23 de febrero del 2020 aproximadamente a las 2:42 p.m. se produce el desprendimiento de un bloque de roca desde la cara sur - oeste del nevado Salkantay, el primer sector afectado fue Wayraqmachay aproximadamente a las 2:45 p.m.

El 25 de febrero un especialista del INAIGEM se constituye a la laguna Salkantaycocha emitiendo un primer informe de los sucesos.

Del 28 de febrero al 02 de marzo, un segundo equipo de especialistas del INAIGEM y el SERNANP se traslada al sector con la finalidad realizar el mapeo y reconocimiento de zonas de peligro, emitiendo un segundo informe.

El 08 de julio personal del INAIGEM realiza una visita de inspección a la laguna Salkantaycocha, obteniendo evidencias que figuran en el presente informe.

3. Aspectos Generales

3.1. Ubicación

Políticamente se ubica en el distrito de Santa Teresa, provincia de La Convención del departamento de Cusco, ver **Figura 1**.

Hidrográficamente se ubica en la cabecera de la cuenca del río Santa Teresa, también denominada cuenca Salkantay, perteneciente a la cuenca Urubamba de la vertiente del Atlántico.

Geográficamente sus coordenadas UTM / WGS84 son: Este - 763,307 y Norte - 8,523,695

3.2. Objetivos

- Determinar el nivel de peligrosidad de la laguna Salkantaycocha.
- Evaluar la situación de la laguna Salkantaycocha.
- Determinar el potencial de peligros existentes en la zona alta del nevado Salkantay.
- Analizar la cadena de procesos del evento y sus características.

4. Aspectos Físicos y Climáticos

4.1. Meteorología

Según datos observados de la estación meteorológica Soraypampa, estación más cercana administrada por el SENAMHI, situada en inmediaciones de la zona de estudio ver **Figura 1**. Observamos que el evento del 23 de febrero ocurrió en un contexto singular respecto a las condiciones meteorológicas en la zona tal como se explica a continuación.

Los registros diarios desde el 01/07/2015 hasta el 31/05/2020, obtenidos de datos horarios, nos muestran que el evento ocurrió en la última etapa de las precipitaciones correspondientes a la estación húmeda. Las precipitaciones de la estación se caracterizaron por presentar eventos de relativa intensidad en comparación al de los últimos cuatro años, respecto a los registros de temperatura indican que el evento de Salkantaycocha coincide con los días más calientes de la estación en relación a la temperatura promedio (ver **Figura 2 a**).

Haciendo un análisis a los registros correspondientes solo al periodo del 01/09/2019 al 31/05/2020, observamos que los días que precedieron al evento las precipitaciones se presentaron en días consecutivos, aunque con menor intensidad en relación a los registrados en los meses de noviembre y diciembre, sin embargo, con mayor frecuencia. Respecto a la temperatura se observa con claridad el sucesivo incremento en promedio diario, alcanzando visiblemente sus niveles máximos en los días que precedieron al evento (ver **Figura 2 b**).

4.2. Geología

Geología Local: el entorno de la laguna Salkantaycocha está compuesta en su mayoría de rocas ígneas pertenecientes al intrusivo de Machupichu, de edad Pérmico-Triásica, de tipo monzomonzogranito; así mismo se tienen rocas metamórficas precámbricas del Complejo Iscabamba de tipo micaesquistos intercalados con gneis; estas unidades han sido cubiertas posteriormente por depósitos cuaternarios de origen glacial, que conforman los depósitos cuaternarios que forman parte de las morrenas y que encierran a la laguna Salkantaycocha.

Unidades Geológicas: comprende formaciones geológicas que datan desde el Precámbrico hasta los tiempos recientes. El basamento rocoso del área de estudio está conformado principalmente por rocas intrusivas del Pérmico-Triásico, también se tiene rocas metamórficas Precámbricas, aflorando en la margen izquierda de la laguna Salkantaycocha y a lo largo de la quebrada Huamantay, siendo la unidad geológica más antigua encontrada en la zona de estudio. Finalmente se tiene depósitos cuaternarios en su mayoría de origen glaciar.

Como resultado de la evaluación geológica local se ha identificado siete unidades geológicas, de los cuales cinco son unidades geológicas cuaternarias y dos unidades geológicas regionales; estas unidades se muestran en la **Figura 3**: Mapa de Unidades Geológicas a escala 1:10 000.

Intrusivo de Machupichu (PsTi-ma/gr): Comprende por rocas ígneas tipo monzogranito **Figura 4.1**, que se encuentran conformando el macizo rocoso de la margen derecha de la laguna Salkantaycocha y a su vez albergan al nevado Salkantay. En este afloramiento es donde se generó el desprendimiento masivo de bloques rocosos de composición granítica el cual ocasionó una avalancha mixta de roca y hielo; parte de este proceso geodinámico cayó sobre la laguna Salkantaycocha ocasionando el desborde violento de esta laguna proglaciar generando un aluvión hacia la parte baja de la quebrada.

Complejo Iscabamba (Pe-i/mi): Compuesto por rocas metamórficas tipo micaesquisto intercalados con gneis, que afloran en la margen izquierda de la laguna Salkantaycocha, en el evento suscitado en la laguna Salkantaycocha no hubo intervención directa de esta unidad geológica (Ver **Figura 4.2**).

Depósitos cuaternarios: La mayoría de estos depósitos son de origen glaciar y se encuentran conformando el fondo de valle glaciar y laderas en la quebrada Huamantay, parte de los glaciares cubiertos a manera de detritos y las morrenas que encierran la laguna Salkantaycocha.

Depósitos glaciáricos (Q-gl): Corresponden a los depósitos acumulados directamente por la acción geodinámica de avance y retroceso glaciar del nevado Salkantay. Se caracterizan por presentar acumulaciones de material detrítico que encierran la laguna Salkantaycocha y material indiferenciado (tills), ubicados en diferentes partes de los taludes internos de la quebrada Huamantay. Estos depósitos están compuestos por arcillas, grava y bloques angulosos a subangulosos, envueltos en una matriz arenosa y limoarcillosa, poco compactos. La mayor cantidad de material inconsolidado arrastrado por el aluvión de Salkantaycocha son de este tipo de material que componen las morrenas que encierran a la laguna proglaciar y son los más abundantes en cuanto a depósitos cuaternarios de origen glaciar en el área de estudio. (Ver **Figura 5**).

Depósitos Fluvioglaciares (Q-fg): Estos depósitos se encuentran en la parte baja de los nevados Salkantay y Huamantay, producto de la fusión del hielo glaciar sumados con material detrítico inconsolidado, hacen que este material se comporte como una masa fluidificada y discorra pendiente abajo. (Ver **Figura 6**).

Depósitos Coluviales (Q-co): Este tipo de depósitos se pudo observar en los taludes internos de las morrenas laterales, producto del material disgregado que se generó a consecuencia del aluvión de Salkantaycocha, puesto que las olas originadas por el material detrítico que cayó sobre la mencionada laguna, socavaron las partes bajas e internas de los taludes morrénicos y dejándolos inestables y con un ángulo de reposo superior a los 55°. Estos

depósitos están conformados por material grueso, de naturaleza homogénea y heterométricos, mezclados con materiales finos como arena y limos. (Ver **Figura 7**).

Depósitos Aluvionales (Q-alv): Se observaron en la saliente de la laguna Salkantaycocha, talud interno y externo de la morrena frontal, producto del desembalse violento de la mencionada laguna, estos depósitos arrastraron y erosionaron a los depósitos pre-existentes y ahora forman parte del cauce o lecho del río Huamantay. Estos depósitos están constituidos por una mezcla heterogénea de bolones (bloques erráticos), gravas y arenas, redondeadas a subredondeadas, así como limos y arcillas originados por el aluvión de la laguna Salkantaycocha. Este tipo de material detrítico es el que afecto de manera significativa los poblados de Wayraqmachay. Chaullay, La Playa, Sahuayco y Santa Teres, ubicados en las márgenes del río Huamantay (Ver **Figura 8**).

Geología Estructural: En el área de estudio, el intrusivo de Machupichu está afectado por fallas regionales y locales donde predominan un sistema de fallas de orientación NO-SE y E-O y N-S (Según Cárdenas et -al, 1999).

El origen del conjunto de bloques de rocas desprendido del nevado Salkantay predomina un sistema de fallas de orientación NNE- SSW; el colapso de roca fue por una falla tipo cuña, controlado por dos principales discontinuidades de buzamientos opuestos, que al desprenderse originaron planos de falla, los cuales se evidencian en la **Figura 9** (P1 y P2).

4.3. Geomorfología

Glaciar: Por su naturaleza, este glaciar esta asociados a una geodinámica activa de avalanchas o aludes, derrumbes, caída de rocas y detritos. La acumulación en el nevado Salkantay se da por las precipitaciones sólidas de nieve, granizo y escarcha durante el periodo lluvioso. Así mismo en la parte baja del nevado Salkantay se tiene un glaciar cubierto por escombros de roca y suelo, con un área aproximada de 1.15 Km², encerrado por dos potentes morrenas de fondo y drena sus aguas al río Blanco.

Unidades Geomorfológicas: son el resultado de procesos agradacionales y degradacionales de origen glaciar, comprendidos para los primeros: abanico aluvional, abanico o cono de detritos, cono de detritos por desprendimiento de rocas y hielo, talud de detritos, cono fluvio-glaciar, por superficies de abrasión y superficies de sobre-excavación), peri-glaciares.

Geoformas Agradacionales:

Morrenas: Estas geoformas las encontramos encerrando la laguna Salkantaycocha, tanto en sus partes laterales como frontal, también se tienen morrenas albergando al glaciar cubierto que drena sus aguas a la quebrada del río Blanco (Ver **Figura 10 y 11**). Estas geoformas se originan por la dinámica del glaciar en las laderas de las montañas y en el fondo del valle glaciar y principalmente está constituidos por bloques de roca, detritos y sedimentos heterogéneos. Esta geoforma es la que más interacción ha tenido con el aluvión de la laguna Salkantaycocha, puesto que la morrena frontal de la mencionada laguna se comporta como dique natural y es por donde rebaso el agua y arrastro parte del material detrítico del talud interno y externo que componen a la morrena frontal de la laguna.

Abanico aluvional: Esta geoforma originada por el fenómeno geodinámico del aluvión de Salkantaycocha, está caracterizado en principio por erosionar el talud interno y externo de la morrena frontal y arrastrar material inconsolidado para depositarlo aguas abajo, en el GLOF de Salkantaycocha no originó una brecha en su morrena frontal, pero con el aumento del flujo de salida de la laguna, la erosión aumentó y todo el material anudados con el agua de la laguna (aluvión), rebasaron la morrena frontal de la mencionada laguna, socavando y profundizando el cauce del río Huamanaty aguas abajo. (Ver **Figura 11**)

Abanico o cono de detritos: Estas geoformas están formando parte del talud interno de las morrenas de la laguna Salkantaycocha, generadas por las caídas o derrumbes, debido a que el oleaje originado por la propagación de olas erosionó la parte baja e interna de los taludes dejándolos completamente inestables. (Ver **Figura 12**).

Cono de deyección de material detrítico: Esta geoforma originada por el desprendimiento y caídas de rocas heterométricas y hielo del nevado Salkantay (avalancha mixta); son fenómenos netamente gravitatorios que pueden no haber tenido un desencadenamiento producido por el agua, este caso se postula que haya sido producto probablemente por un evento geológico - Estructural (Falla geológica); caracterizados por ser geoformas altamente inestables y peligrosas, debido al poco tiempo de formación y por el tamaño de los bloques de roca presentes sobre su superficie (Ver **Figura 13**).

Geoformas Degradacionales

Superficies de abrasión: Estas geoformas lo encontramos en la parte alta de la zona lateral derecha de la laguna Salkantaycocha, formando parte del macizo rocoso que alberga al nevado Salkantay, estas geoformas degradacionales son el producto de la acción de desgaste o pulido realizado por el paso del hielo sobre la base del macizo rocoso (Ver **Figura 14**).

Superficies de sobre excavación: Este tipo de geoformas los encontramos en la parte baja del nevado Salkantay y están más alejadas de la laguna Salkantaycocha, caracterizadas ser una geoforma degradacional y por presentar una topografía abrupta, a manera de dentellas generadas por la gelifración glacial (Ver **Figura 15**).

5. Peligros de origen glaciar

5.1. Situación de la laguna Salkantaycocha

Es una laguna de origen glaciar situada a 4,500 m s.n.m.; ocupa una cubeta que dejó el glaciar durante su retroceso, sus características superficiales cambiaron según se muestran en la **Tabla 1** (Ver **Figura 16**).

Tabla 1. Cambio espacio temporal de las características en la laguna Salkantaycocha.

	17 Septiembre 2014	25 febrero 2020	25 mayo 2020
Largo (m)	506	609	451
Ancho (m)	211	264	213
Área (m²)	79,308	118,954	68,870

La situación de la laguna Salkantaycocha se describe en el informe de inspección emitido por el INAIGEM en fecha 10 de marzo 2020, en el cual se muestran fotografías con el espejo de

agua en su máximo nivel (Ver **Figura 17**), una inspección reciente realizada el 08 de julio de 2020 nos muestra un vaso lagunar significativamente colmatado (Ver **Figura 18**), lo que evidencia la cantidad de escombros y sedimentos que ingresaron el día que se produjo la avalancha, también los deslizamientos sucesivos en los taludes internos del vaso, de ello también deducimos que las filtraciones evacuaron el excedente de agua acumulada sobre el nivel normal del espejo de agua (Ver **Figura 19**).

La altura del borde libre en el dique frontal tuvo cambios significativos después del evento (ver **Figura 19**), esta altura incrementó considerablemente según la **Figura 18** debido al descenso del nivel de la laguna por debajo de su valor normal, esto nos sugiere que los conductos en el interior del dique frontal incrementaron su capacidad de descarga.

5.2. Situación de la pared rocosa

La pared sur – oeste del nevado Salkantay, lugar donde se originó el desprendimiento de roca en el evento del 23 de febrero (ver **Figura 20**), en la actualidad muestra el plano de falla de forma clara, esto nos permite delimitar el contorno del volumen de roca desprendido (ver **Figura 20a**), no se observan bloques de roca acumulados en la base o el trayecto del flujo que pueda representar peligro, sin embargo, se observan bloques de roca colgantes en la cumbre sobre la proyección del mismo plano de falla que dio origen a la avalancha (ver **Figura 20b**) aparentemente se trataría de un volumen menor del desprendido, pero por la altura en la que se encuentra, una eventual avalancha produciría la energía suficiente para que el impacto de los fragmentos de rocas alcance y sobrepase el límite del sendero de trekking en el abra Salkantay.

6. Modelamiento y análisis de la cadena de procesos

En este ítem se explica los valores obtenidos acorde al modelamiento generado en la cadena de procesos desde la avalancha, el oleaje, el desborde y el aluvi3n. Para ello se utilizaron herramientas de modelaci3n numérica como el RAMMS y r.avaflow, este último de código libre.

La avalancha con origen en la cara sur – oeste del nevado Salkantay (ver **Figura 20**), produjo el desprendimiento de un bloque por rotura en cuña, el volumen del bloque desprendido se asumió en funci3n de escenarios creados para someter al modelo mediante el software RAMMS para el cual se crearon los siguientes escenarios: Escenario 1= 0.4 Mm³, escenario 2= 0.65 Mm³ y escenario 3= 0.8 Mm³ que fueron ajustados y contrastados con la huella observada después del evento.

Respecto a los datos de entrada se consideró un modelo de elevaci3n digital DEM de Alos Palsar y TanDEMx ambos con 12.5 m de resoluci3n, el volumen total de avalancha se considera 90% de roca y 10% de hielo, la roca es de tipo granito con una densidad de 2,700 kg/m³. El volumen de agua en la laguna se considera 2 Mm³.

Según estas consideraciones la simulaci3n de la avalancha nos arroja valores aceptables para los escenarios de 0.65 Mm³ y 0.8 Mm³ según se muestra en la **Figura 21**.

Para los efectos de la cadena de procesos desde el origen se realizó la simulación con el software r.avaflow el cual nos muestra una aproximación aceptable acorde a la huella observada después del evento, se establecen puntos de control para la observación del flujo en la laguna (C) y en la quebrada aguas abajo (H) al mismo tiempo que se delimita la zona con mayor probabilidad de erosión que se ubica en el talud externo del dique frontal (Ver **Figura 22**).

La extensión mapeada se ve como una estimación muy conservadora, en la **Figura 23** se muestra la evolución de la altura del agua y los sólidos, además del área de impacto de la cadena del proceso, describiendo así las etapas principales del evento. Al considerar la distribución de material sólido al final de la simulación, se revela que la mayor parte del volumen de deslizamiento inicial finalmente se deposita en el área de Laguna Salkantaycocha después de la desviación en la morrena lateral S, quedando muy pocos depósitos en otro lugar.

La **Figura 24**, nos muestra las alturas de flujo simuladas, fracciones sólidos y de agua, y áreas de impacto. Se debe tener en cuenta que se deposita muy poco material en la porción SE del área de impacto o zona de morrena con glaciares cubiertos que va con dirección a Soraypampa. La mayor parte del material de avalancha de roca/hielo atraviesa y termina en la Laguna Salkantaycocha, donde se dispara una onda de impacto ($t = 50$ s) que sobrepasa el dique ($t = 70$ s) y erosiona parcialmente ($t = 90$ s) la presa de la morrena en el talud exterior. Como consecuencia del proceso antes explicado tenemos un flujo hiperconcentrado que se traslada aguas abajo. Este resultado es consistente con la versión de un poblador de Wayraqmachay quien según su versión desde que escuchó el ruido de la avalancha hasta que llegó a su zona pasó 3 minutos aproximadamente.

La **Figura 25** muestra el hidrograma simulado en la ubicación indicada con H en la **Figura 22**. Este hidrograma sugiere un flujo hiperconcentrado que aumenta rápidamente hasta una descarga máxima aguda de $2,800 \text{ m}^3/\text{s}$ de sólido y $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua, que se alcanza después de $t = 140$ s. En este momento, las alturas de flujo alcanzan 1.75 m (sólido) y 3.75 m (agua). Después del pico, la descarga se reduce rápidamente sin mostrar un segundo o tercer pico. Estos pudieron suceder dentro del vaso lagunar debilitando así los taludes interiores, arrastrando sedimentos hacia el fondo desde la zona posterior.

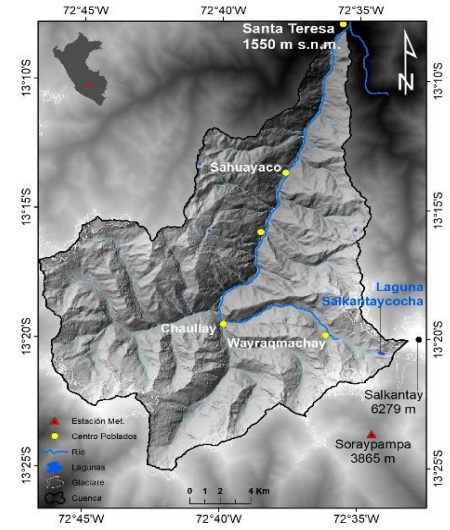
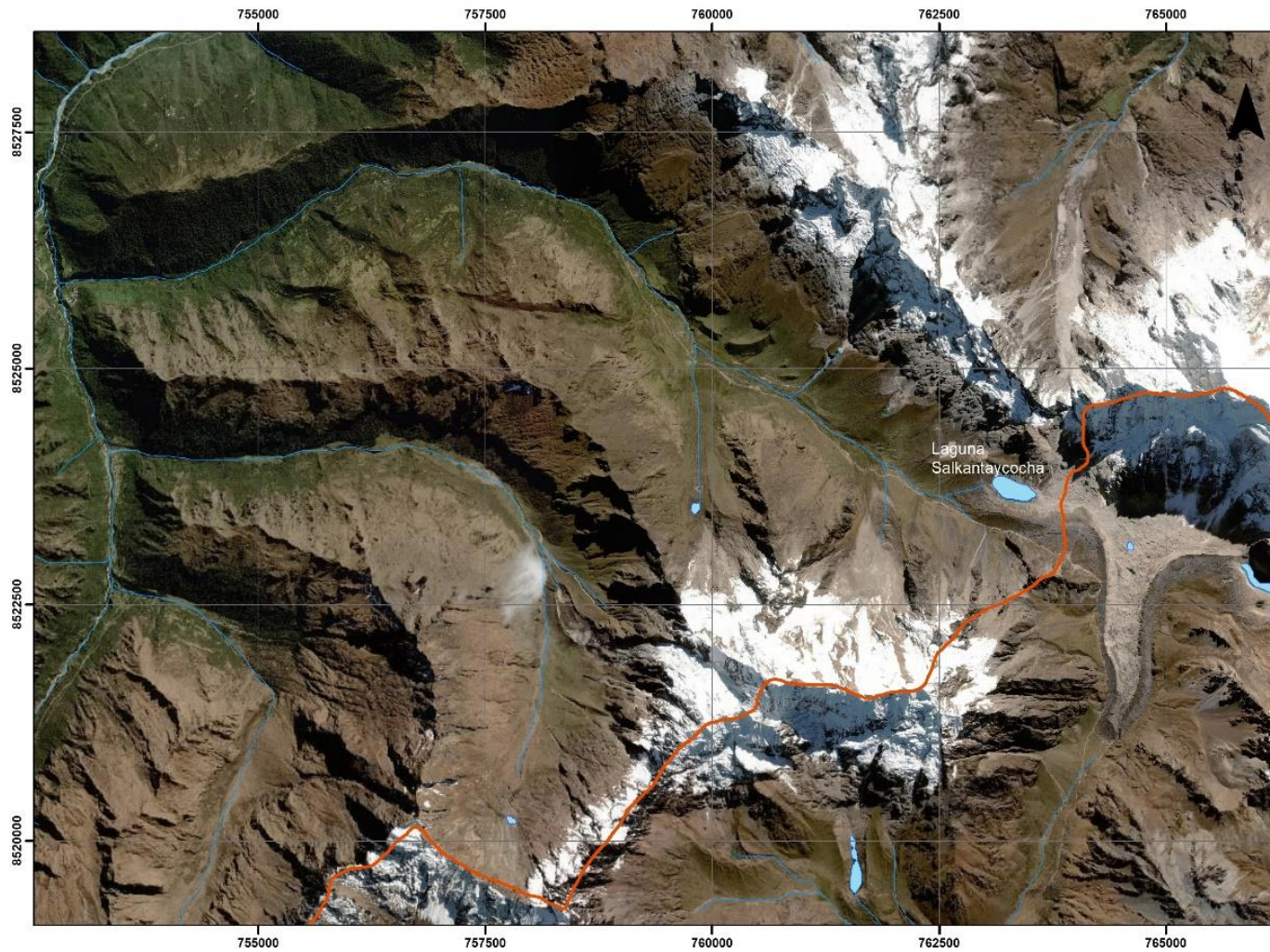
Los primeros resultados obtenidos del modelamiento de la cadena de procesos del aluvión nos indica una aproximación aceptable respecto a la huella observada en la **Figura 26**, sin embargo, los últimos registros fotográficos (ver **Figura 18**) se muestra a la laguna con el vaso colmatado casi en su totalidad, lo cual nos indicaría la subestimación en los valores obtenidos, por lo tanto, conocido este último dato en la laguna se volverá a la modelación hasta acercarnos a una representación cercana a la realidad.

7. Conclusiones

- La situación de la laguna Salkantaycocha acorde a la última inspección ocular realizada el 08 de julio del 2020, es de una laguna colmatada producto de la acumulación de escombros y sedimentos de la avalancha y de los deslizamientos en los taludes interiores del vaso morrénico, bajo esta consideración y de mantener la misma condición física, esta laguna representa peligro bajo por desborde y aluvión consecuentemente.
- El nivel de espejo de la laguna Salkantaycocha muestra un descenso constante y existe la probabilidad de que en un futuro ya no almacene un volumen de agua similar al que tenía antes del evento del 23 de febrero, debido presumiblemente al incremento en la capacidad de descarga de las filtraciones existentes en el dique frontal, aspecto que se deberá confirmar con estudios detallados de geotecnia y geofísica.
- En referencia a la pared de roca del Salkantay se observan bloques de roca colgantes en la cumbre sobre la proyección del mismo plano de falla que dio origen a la avalancha, un eventual desprendimiento de roca desde esa altura (aproximadamente sobre 5,600 m s.n.m.) produciría la energía suficiente para que el impacto de los fragmentos de rocas alcance y sobrepase el límite del sendero de trekking en el abra Salkantay.
- En relación al evento del 23 de febrero se realizó el análisis de los datos meteorológicos de la estación Soraypampa (SENAMHI) en las variables de precipitación y temperatura, los cuales muestran que el evento sucedió en los días más calientes de la estación y al finalizar la temporada de lluvia, esto como un dato que no implica necesariamente una variable condicionante.
- La modelación del proceso en cadena nos ofrece resultados cuantitativos como son: el volumen de avalancha estuvo constituida por roca en un 90% y hielo en un 10%, con una cifra conservadora de 800 mil metros cúbicos, el mismo que al impactar en la laguna generó un caudal pico cercano a 9000 m³/s con 6000 m³/s de agua y 3000 m³/s de sólidos. Además, otro valor a tomar en cuenta es el tiempo que toma este tipo de eventos, para este caso se evaluó desde el origen de la avalancha hasta el poblado de Wayraqmachay obteniendo como resultado 180 segundos, dato que coincide con la versión de los pobladores.

8. Recomendaciones

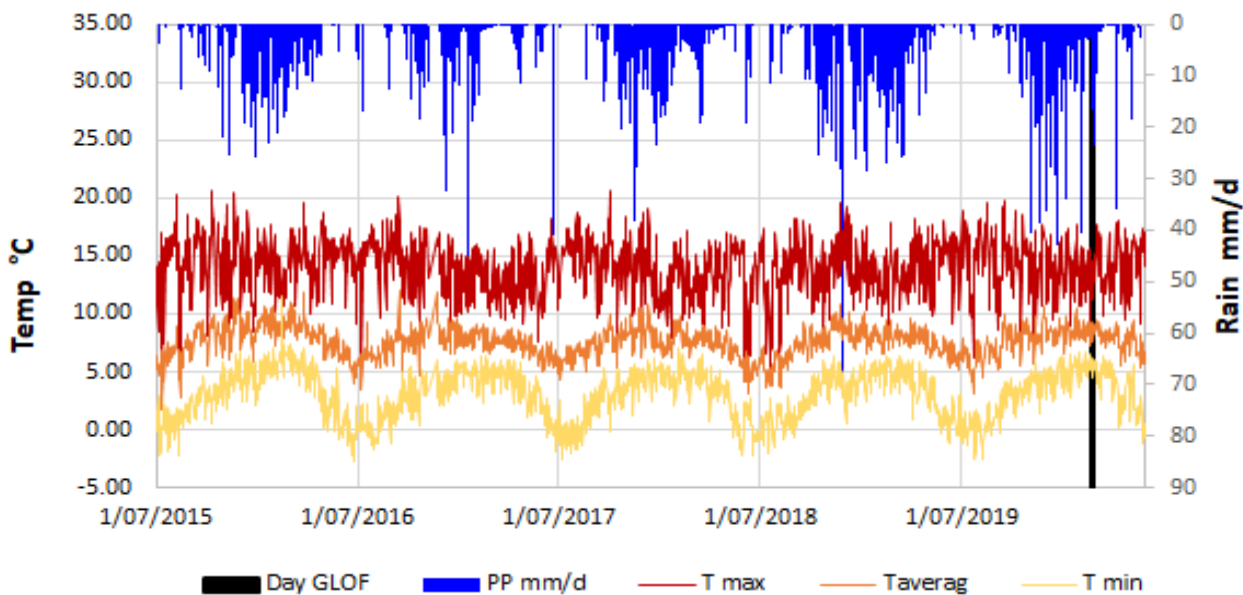
- Realizar el estudio topográfico en el vaso de la laguna Salkantaycocha.
- Realizar estudios geotécnicos a detalle, con la finalidad de determinar la estabilidad del vaso de la laguna.
- Realizar el estudio de geofísica en el dique frontal.
- Monitorear los puntos de afloramiento de agua en la zona baja del dique frontal producto de las filtraciones de la laguna.
- Monitorear el comportamiento de los niveles de la laguna Salkantaycocha.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.
- Instalar una estación meteorológica en una zona próximas a los 5000 m s.n.m. con la finalidad de monitorear la temperatura superficial y los efectos que estos pueden causar.
- Realizar el estudio de evaluación de riesgos por movimiento en masa en la cuenca Salkantay.



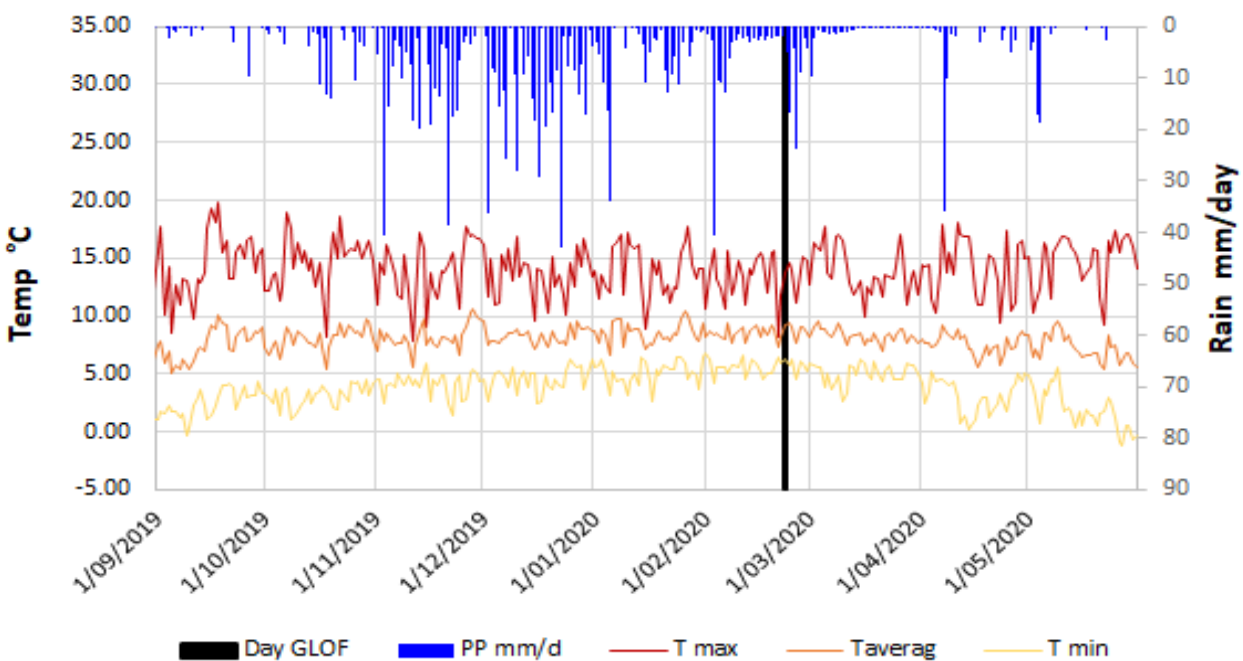
INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 1
 Ubicación de la laguna Salkantaycocha



a) Periodo de registro diario del 1/07/2015 al 31/05/2020



b) Periodo de registro diario del 1/09/2019 al 31/05/2020

* Datos de la estación Soraypampa (SENAMHI)

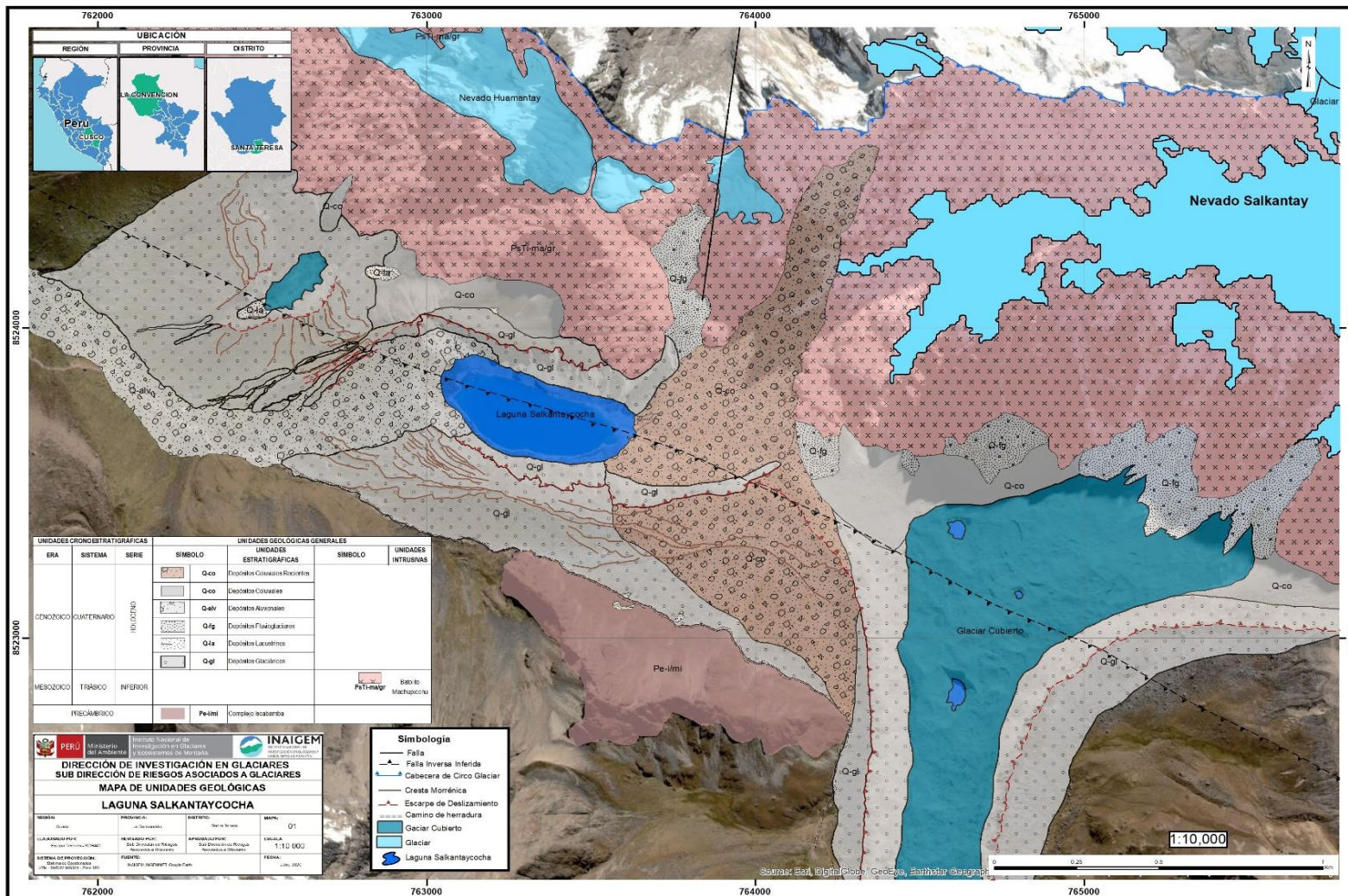
* Gráficos elaboración propia



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 2
Registros Meteorológicos



Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha
Figura 3

Mapa de Unidades Geológicas en el entorno de la laguna Salkantaycocha

* Elaboración propia



INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA



4.1. Muestra de roca representativa del intrusivo de Machupichu de tipo Monzogranito



4.2. Muestra de roca metamórfica representativa del complejo Iscabamba, (a) roca metamórfica tipo gneis y (b) roca metamórfica tipo micaesquisto

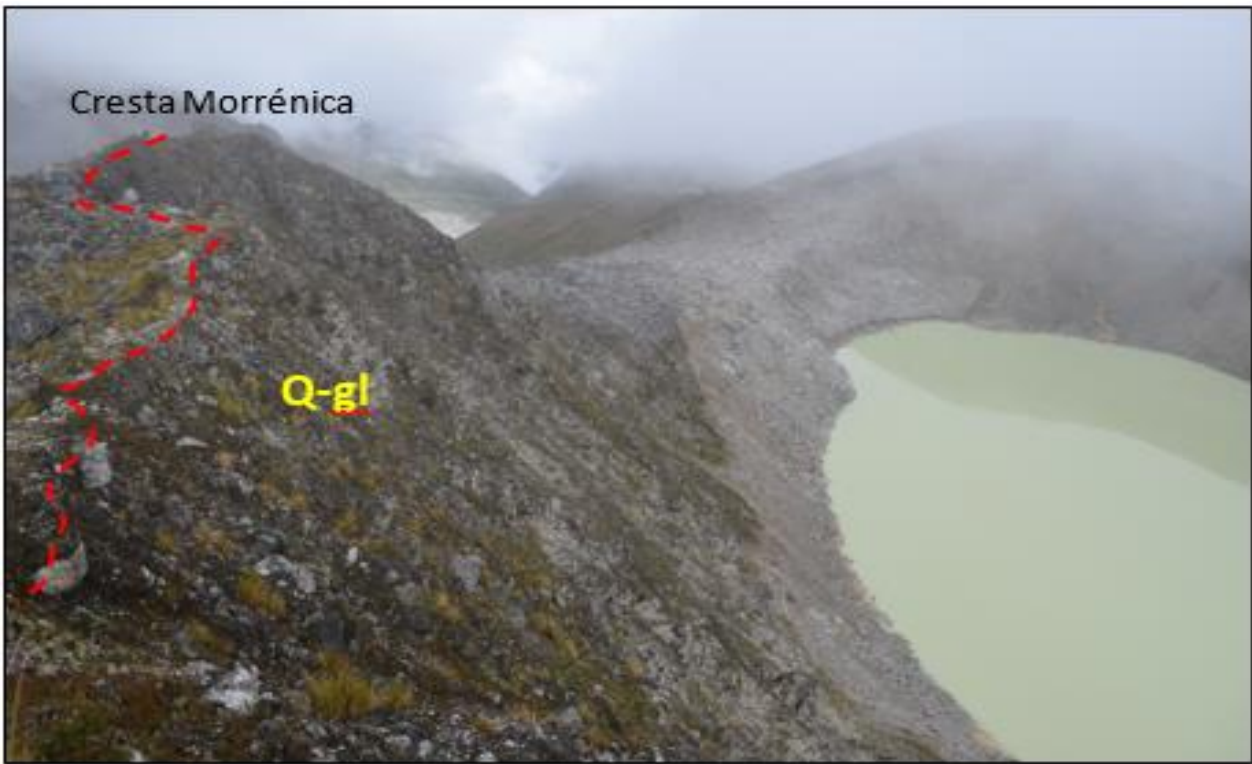
* *Elaboración propia*



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 4
Geología



5. Depósitos glaciáricos que componen las morrenas que encierran a Salkantaycocha



6. Depósitos fluvioglaciares ubicados en la parte baja del nevado Salkantay

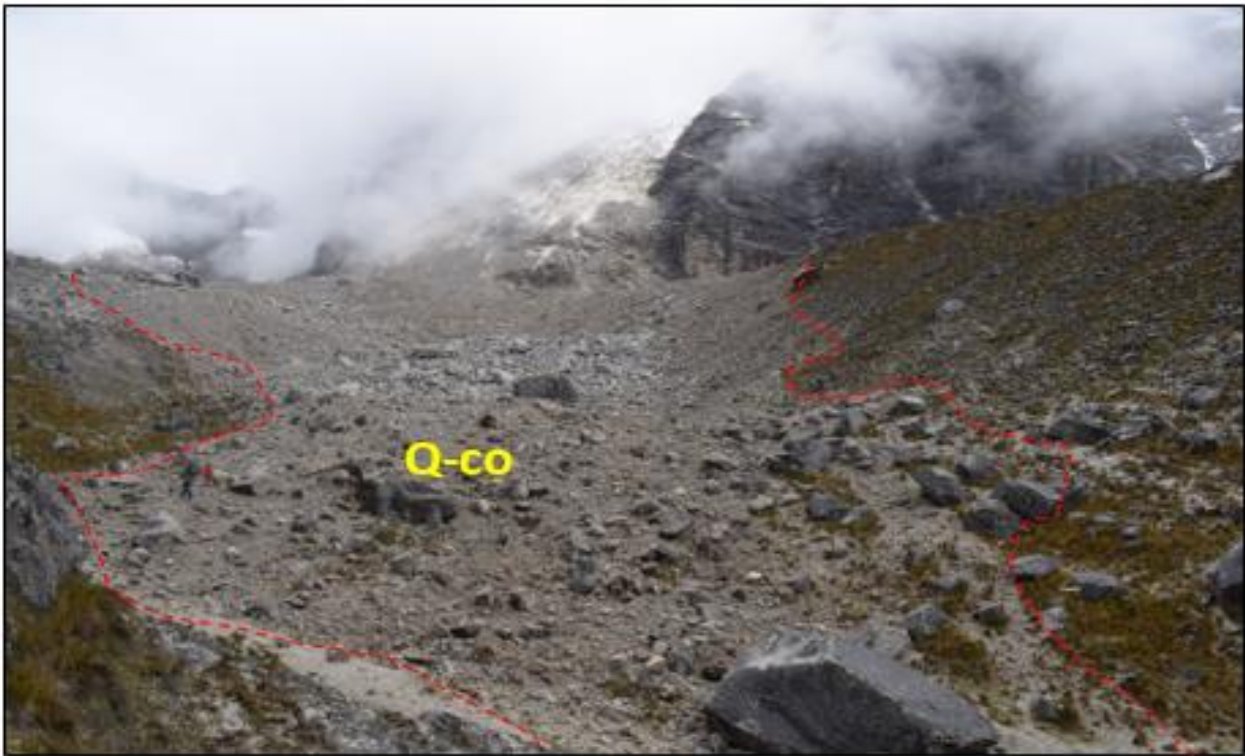
* *Elaboración propia*



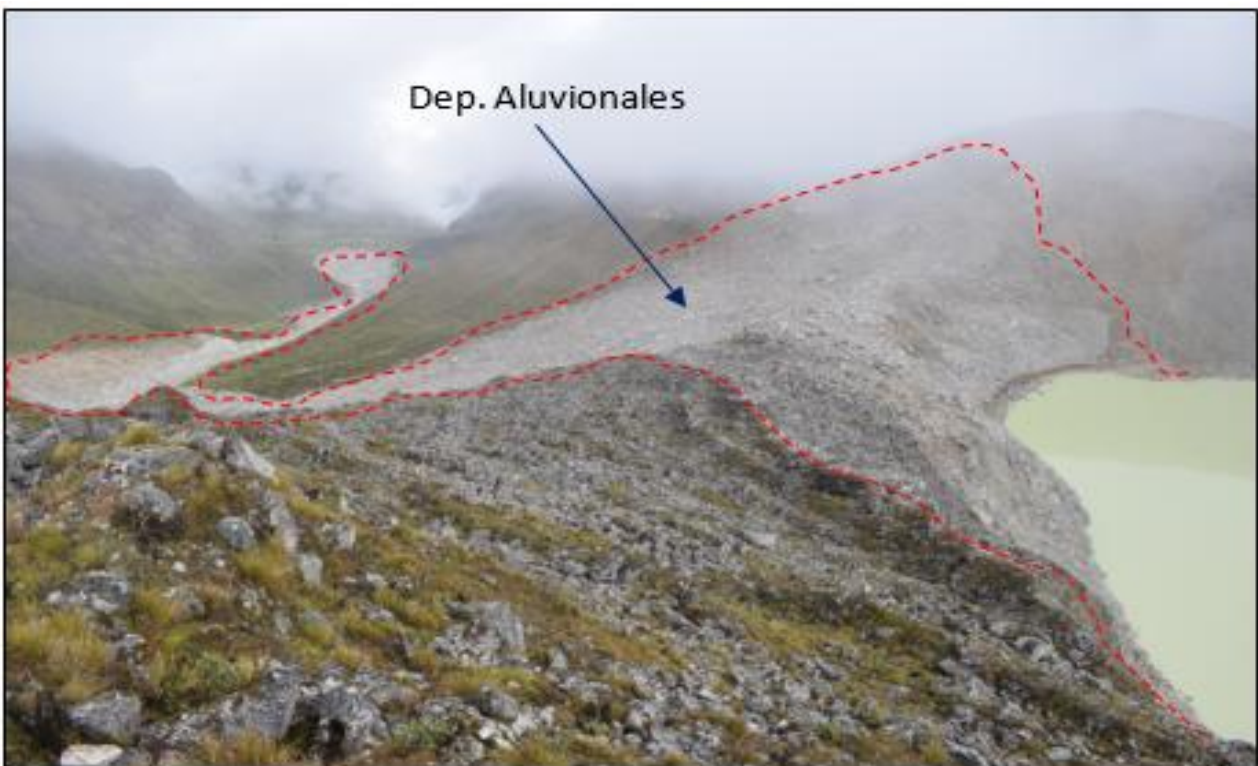
INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figuras 5 y 6
Geología



7. Depósitos coluviales heterométricos que cayeron hacia la quebrada del río Blanco



8. Parte frontal de la laguna Salkantaycocha, donde se muestran depósitos aluvionales

* *Elaboración propia*



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figuras 7 y 8
Geología



9. Bloque de roca desprendida, planos originados por una falla tipo cuña

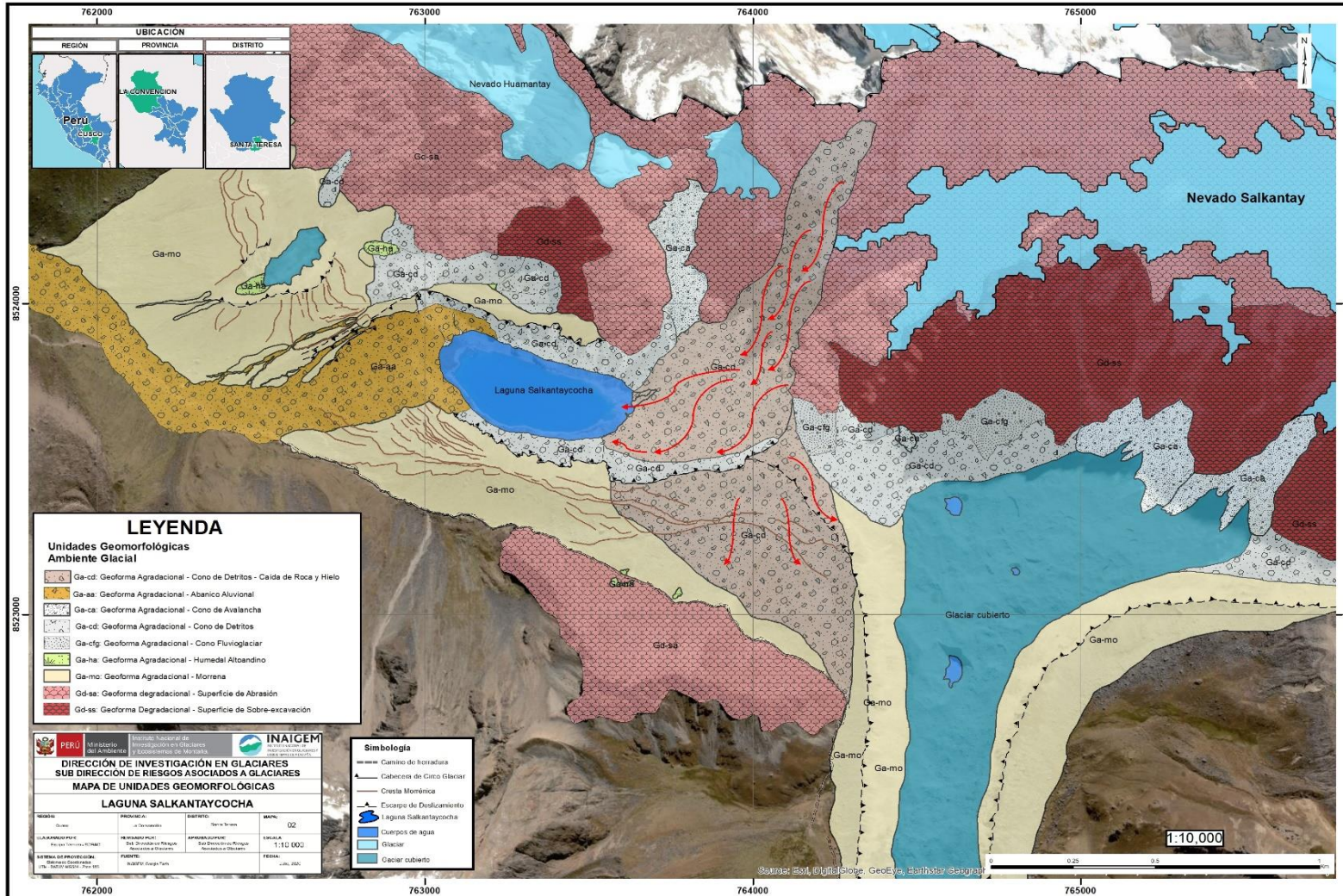
* *Elaboración propia*



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 9
Geología



Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha
Figura 10

Mapa de Unidades Geomorfológicas en el entorno de la laguna Salkantaycocha

* Elaboración propia



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA



(a) Morrena frontal antes del GLOF. (b) Morrena frontal después del GLOF de la laguna Salkantaycocha.

* Foto izquierda Úbeda, J. Derecha Jara, H.

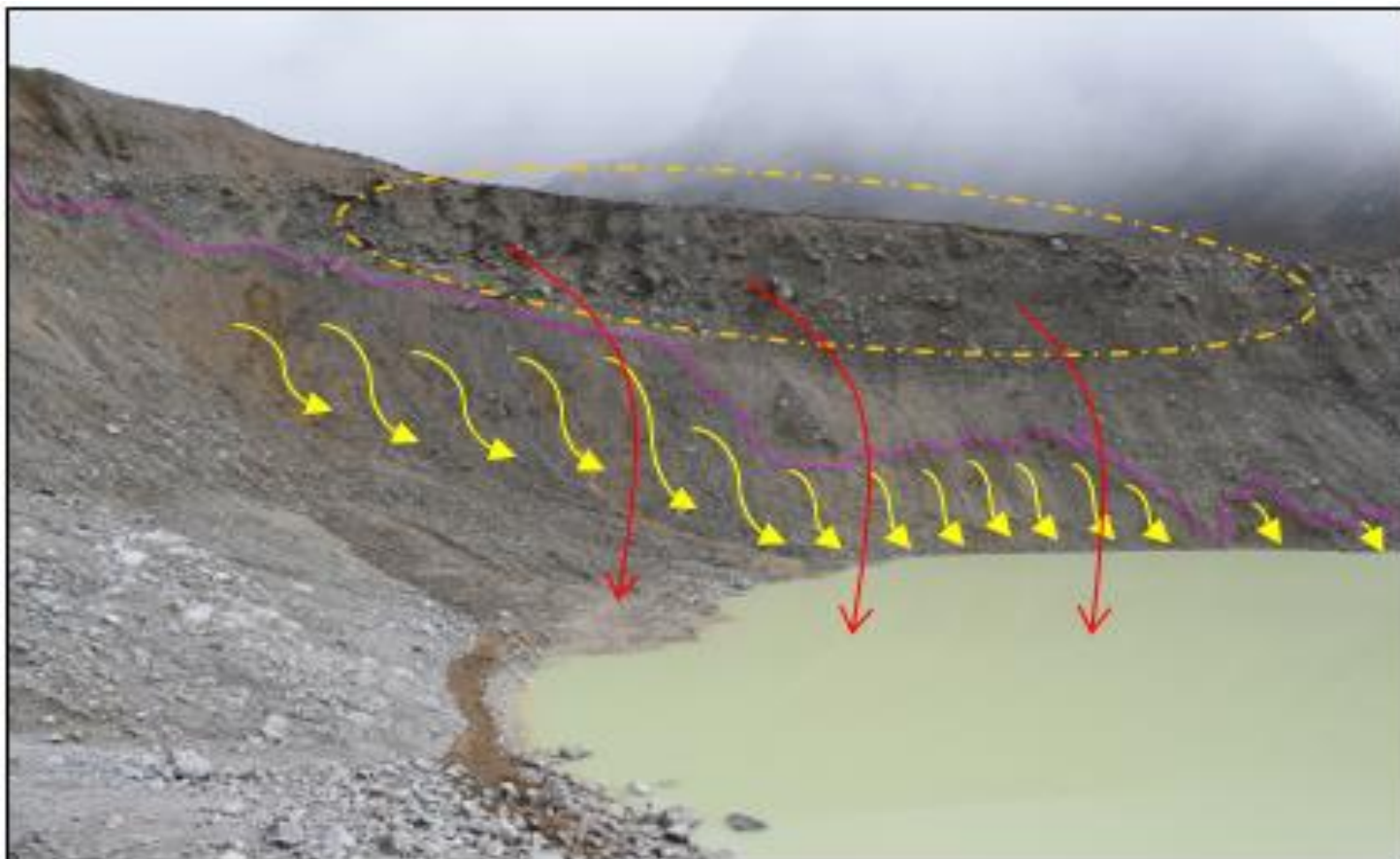


INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 11

Geomorfología



Conos de detritos, parte interna de los taludes morrénicos (flechas amarillas).

* *Elaboración propia*



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 12

Geomorfología



13. Cono de deyección de material detritico



14. Superficies de abrasión ubicados cerca a la morrena lateral derecha de la laguna Salkantaycocha

8. Parte frontal de la laguna Salkantaycocha, donde se muestran depósitos aluvionales

* *Elaboración propia*



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figuras 13 y 14
Geomorfología



15. Superficies de sobre excavación, parte baja del nevado Salkantayo (Úbeda, J. 2014)



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 15
Geomorfología

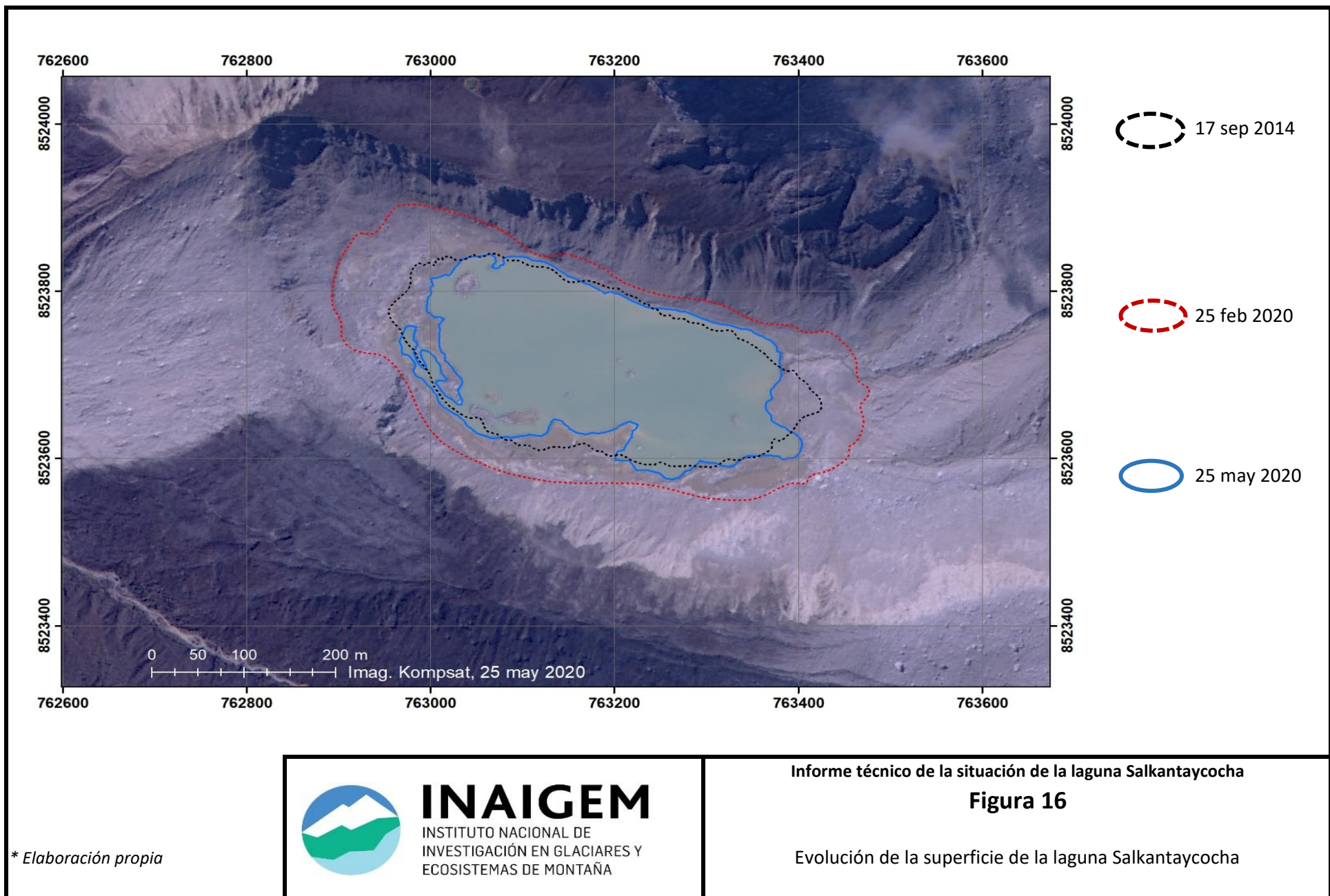




Foto: Vilca, O. (25 Febrero 2020)



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 17

Laguna Salkantaycocha



Foto: Bustinza, V. (08 Julio 2020)



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 18

Laguna Salkantaycocha

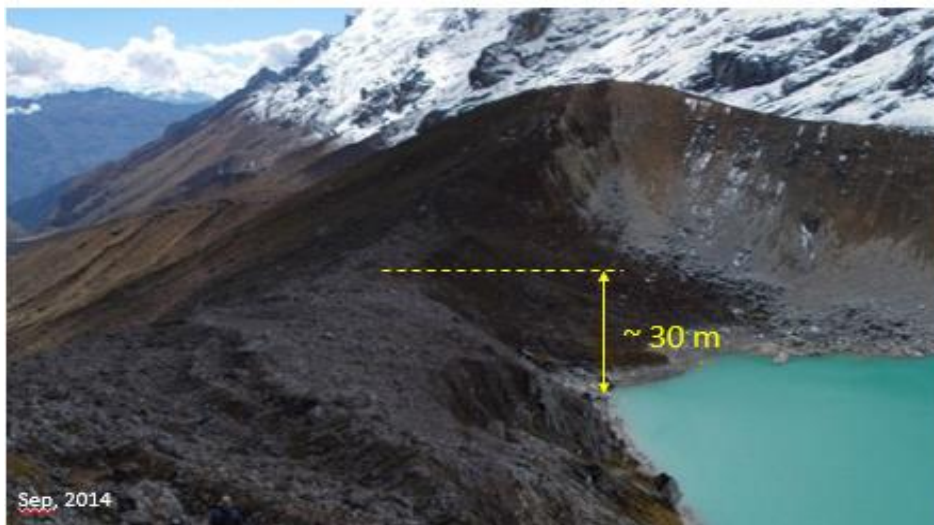


Foto: Bustinza, V. (08 Julio 2020)



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

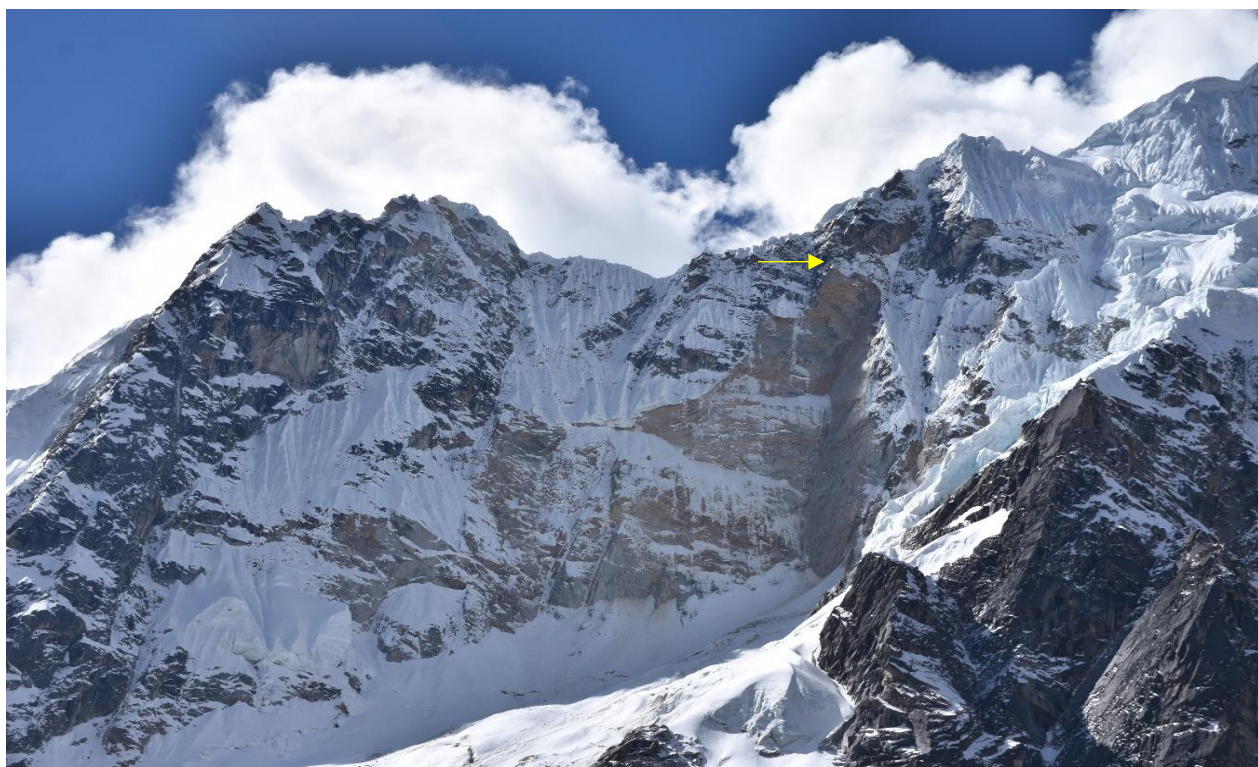
Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 19

Laguna Salkantaycocha



a) Zona de origen de la avalancha, se observan las líneas paralelas en la pared rocosa que indican el proceso de fricción ejercido durante el desprendimiento (Fuente: Benito Moncada 24.02.2020)



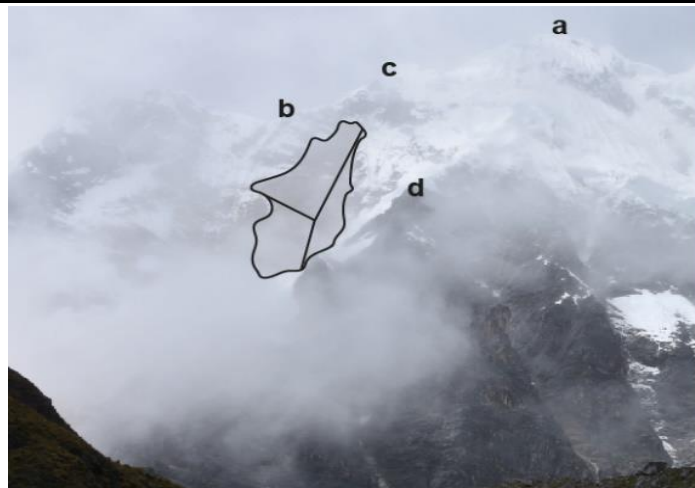
b) Zona de arranque y potencial de riesgo de desprendimientos futuros (Foto: Bustinza, V. 08 julio 2020)



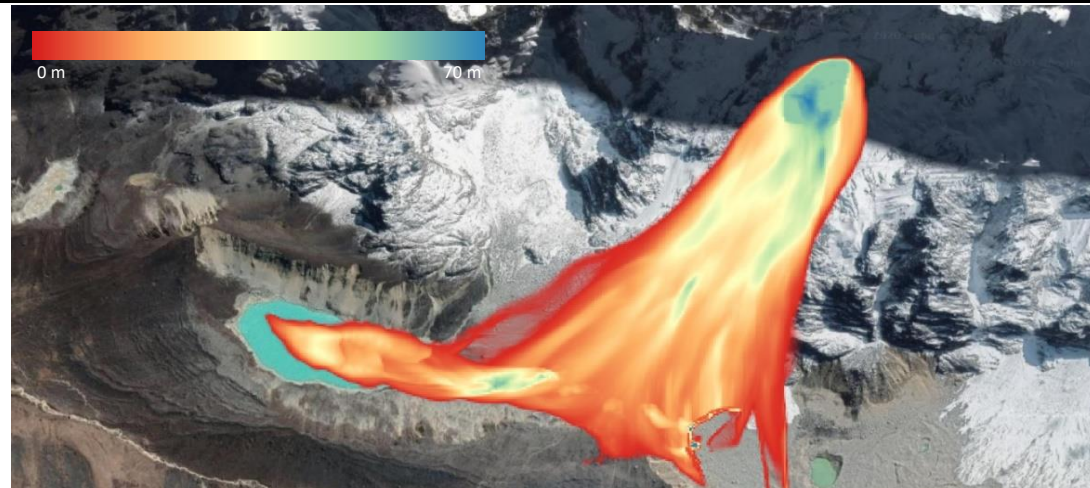
INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

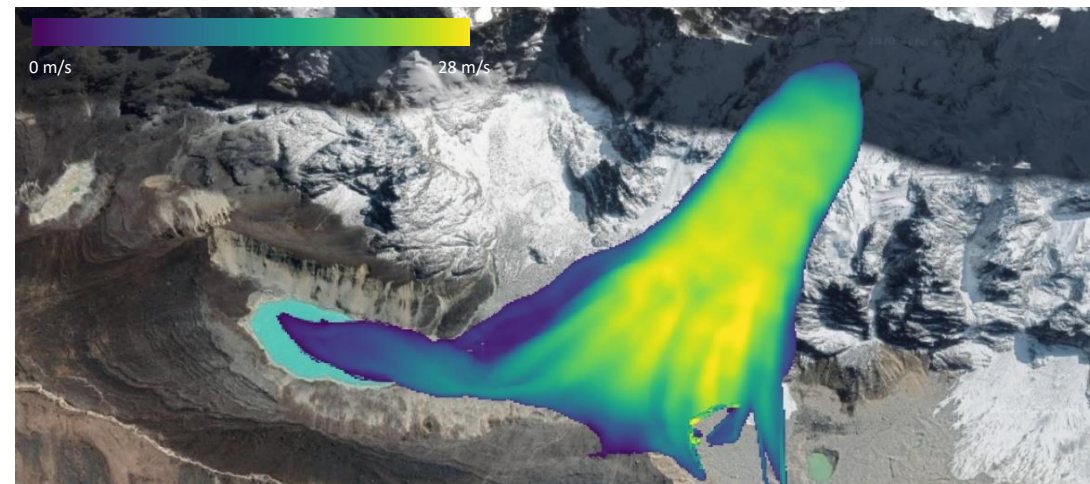
Figura 20
Zona de arranque



Modelamiento de avalancha de roca



Espesor del material desprendido, 30 m en la zona posterior de la laguna



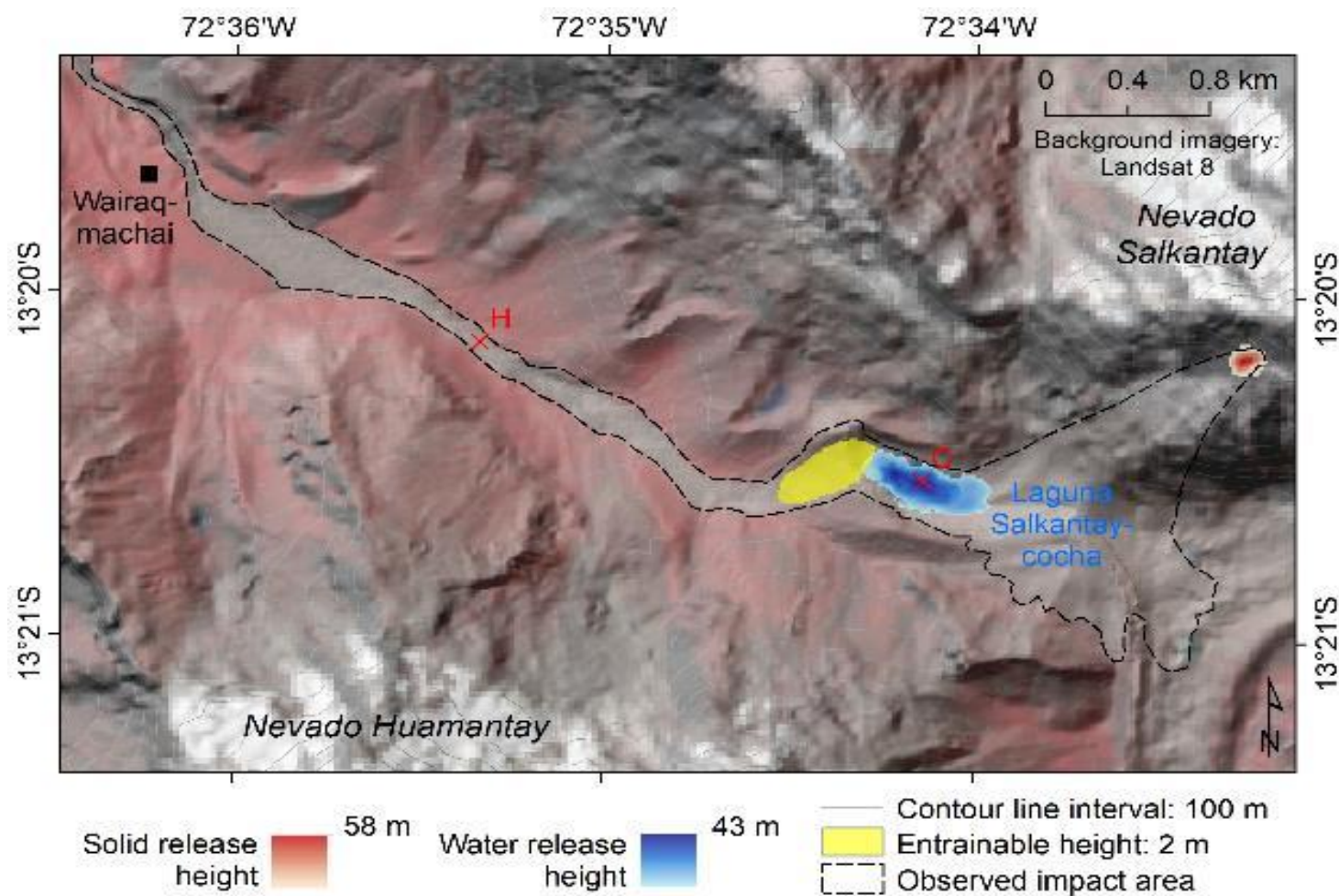
Velocidades alcanzadas en el trayecto de la avalancha, la máxima velocidad se produce en la zona de la rampa de hielo y cuando se precipita después.



INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha
Figura 21

Modelamiento de la cadena de procesos

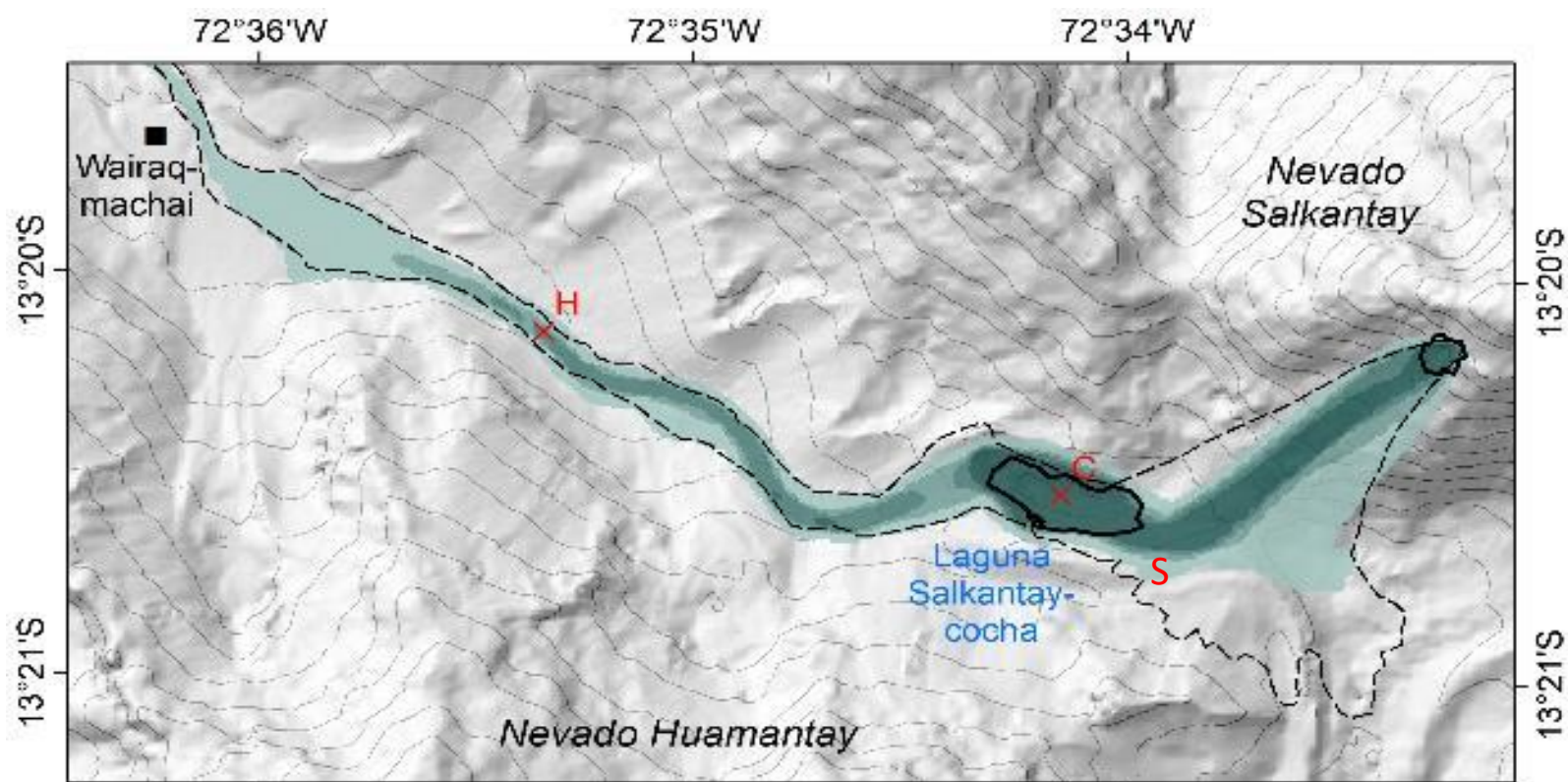


INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 22

Modelamiento de la cadena de procesos



0 0.4 0.8 km
 Terrain: TanDEM-X/
 ALOS PALSAR

Simulated maximum flow height

 >0.1 - 2 m	 >5 - 10 m
 >2 - 5 m	 >10 m

Contour line interval: 100 m

 Observed impact area
 Release area and lake

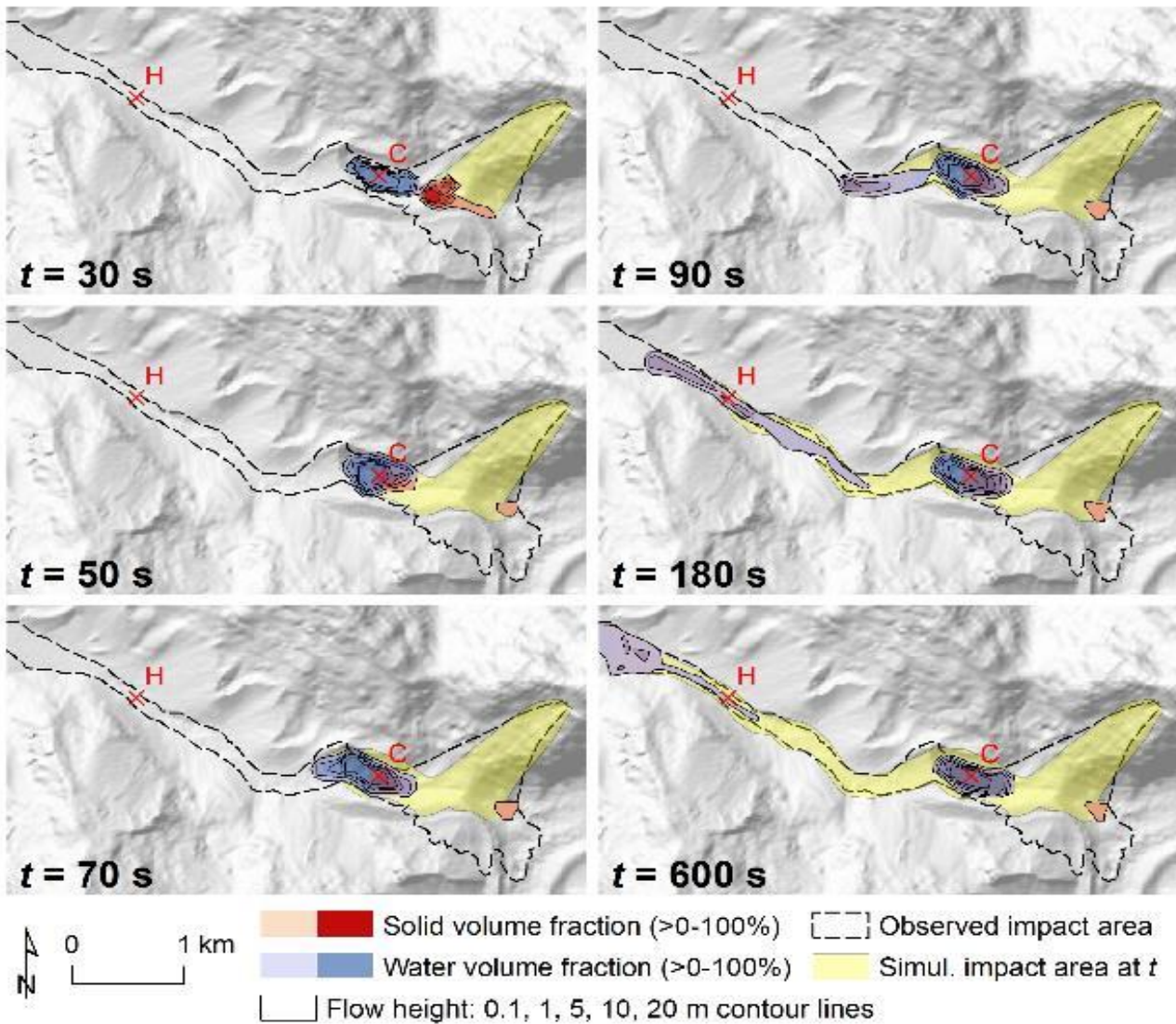


INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

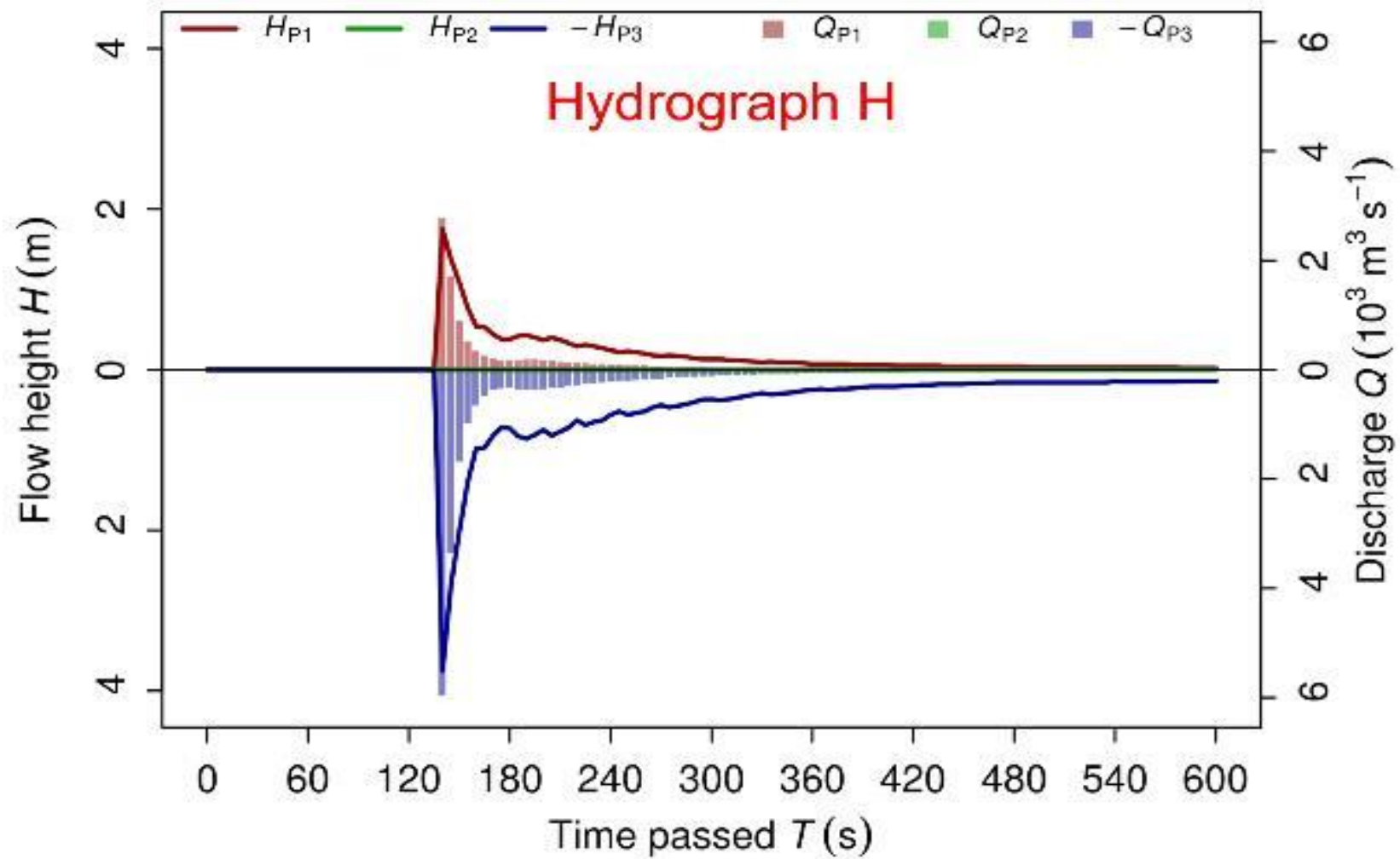
Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 23

Modelamiento de la cadena de procesos



* *Elaboración propia*

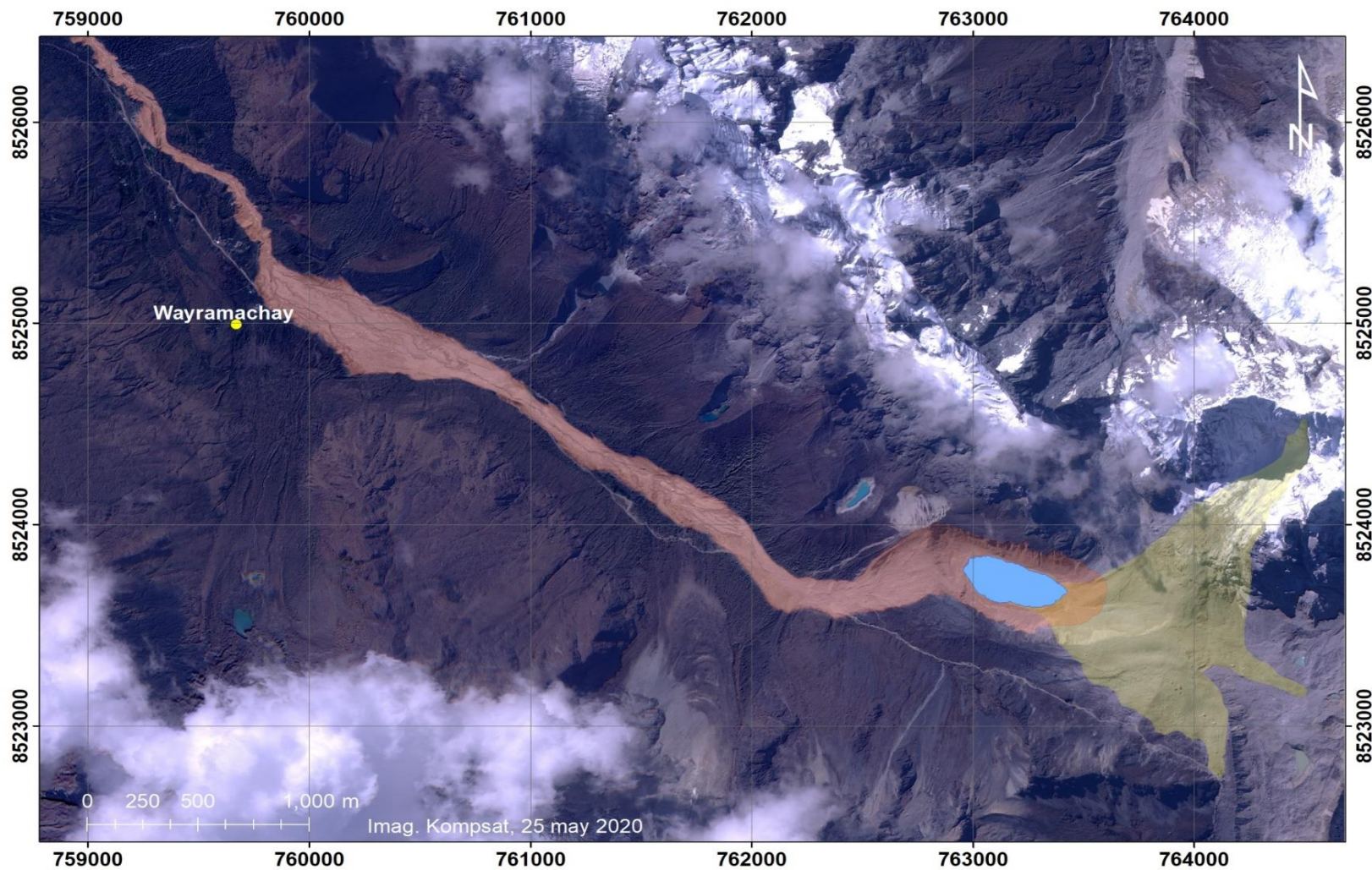


INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 25

Modelamiento de la cadena de procesos



INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 26

Modelamiento de la cadena de procesos