

Informe de inspección 01

LAGUNA SALKANTAYCOCHA



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Elaborado por:
Ing. Oscar Vilca Gómez
Especialista en Hidrología y Glaciología

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

INFORME DE INSPECCIÓN DE LA LAGUNA SALKANTAYCOCHA

Fecha 25 de febrero del 2020.

Visita técnica realizada por el especialista en hidrología y glaciología de la Oficina Desconcentrada Macro Región Sur del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña INAIGEM, en razón a los sucesos acontecidos el día domingo 23 de febrero en la cuenca Salkantay.

1. Objetivo

Evaluar la situación de la laguna Salkantaycocha, luego de los sucesos acontecidos en la subcuenca Salkantay.

2. Ubicación

Se ubica en la cabecera de la cuenca Salkantay, perteneciente a la cuenca Urubamba. Políticamente se ubica en el distrito de Santa Teresa, provincia de La Convención del departamento de Cusco, ver Figura 1.

Geográficamente sus coordenadas UTM / WGS84 son:

Este: 763,307

Norte: 8,523,695

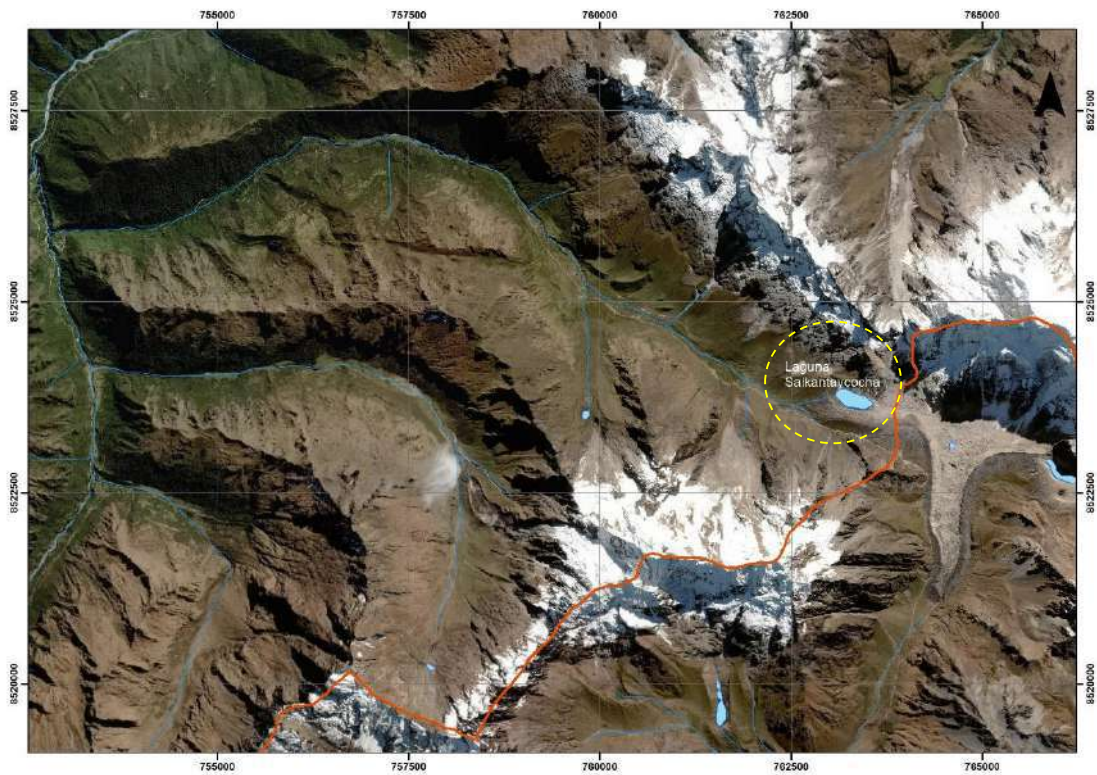


Figura 1. Ubicación de la laguna Salkantaycocha (Fuente: Elaboración propia)

3. Laguna Salkantaycocha

Es una laguna de origen glaciar situada a 4,500 msnm; ocupa una cubeta que dejó el glaciar durante su retroceso, sus características son:

Largo : 506 m
Ancho : 211 m
Superficie : 79,308 m²

Esta laguna se encuentra flanqueada en su totalidad por depósitos morrénicos Ver Figura 2, y su principal fuente de abastecimiento proviene del derretimiento de los glaciares del nevado Salkantay.



Figura 2. Imagen satelital de la laguna Salkantaycocha (Fuente: Google Maps).

El entorno de la laguna Salkantaycocha muestra evidencias claras de alteraciones en la superficie del agua, como es el cambio de coloración, también en la dinámica de los taludes internos, aspecto que se corrobora con la observación de deslizamientos y caída de rocas con relativa frecuencia (ver Figura 3).

En la zona posterior y entre el flanco izquierdo es posible apreciar una cantidad significativa de escombros, dispuestos en mayor proporción fuera del vaso lagunar.



Figura 3. Imagen de la laguna desde la zona posterior hacia aguas abajo, se observan los flancos izquierdo y derecho con marcadas zona de deslizamientos, así también en primer plano se observa la presencia de escombros, arena y lodo (Fuente: INAIGEM/O.Vilca).

La zona frontal que cumple la función de dique natural, está compuesta en su integridad por depósitos morrénicos, aquí se observan marcas que dejó el agua durante el salto u oleaje, sobrepasando los ~15 metros de borde libre (aproximadamente) (Ver Figura 4).



Figura 4. Zona frontal, se observa la huella del flujo de agua que sobrepasó la cota de rebose, también la erosión producida en la cara exterior (Fuente: INAIGEM / O.Vilca)

La zona posterior de la laguna se muestra con visibles signos de alteración en la superficie, con mayor presencia de escombros, arena y lodo. Esta zona es un depósito de detritos, con la frecuente caída de rocas y hielo proveniente de los frentes glaciares, hace la función de dissipador de energía amortiguando así la velocidad de las rocas antes que lleguen a impactar al espejo de agua (Ver Figura 5).



Figura 5. Vista de la zona posterior con presencia de abundante escombros, al momento de la inspección se observó caída de roca y hielo desde el frente glaciar. (Fuente: INAIGEM / O.Vilca)

4. Descripción de los sucesos

Avalancha mixta

Con origen en la cara sur del sector oeste del nevado Salkantay, aproximadamente entre los 5,600 y 5,400 msnm (Ver Figura 6). El desprendimiento de roca y hielo cae en forma vertical y luego se desplaza sobre el glaciar, este último cumple la función de una rampa de hielo debido a que posee una pendiente muy elevada, generando así la energía suficiente para alcanzar un desplazamiento de hasta 1.7 km.

Se estima la caída de un volumen de roca y hielo de aproximadamente 400 mil metros cúbicos, siendo roca más del 90% (Datos preliminares).



Figura 5. Zona de origen de la avalancha mixta, se observan las líneas paralelas en la pared rocosa que indican el proceso de fricción ejercido durante el desprendimiento (Fuente: Benito Moncada).

El volumen de escombros de la avalancha mixta, según la línea de flujo principal, se deposita entre la zona posterior de la laguna Salkantaycocha y sobre la línea del divorcio de aguas.



Figura 6. Línea de flujo de la avalancha y zona principal de depósito de escombros (Fuente: Benito Moncada)

Impacto en la laguna y generación del oleaje

Se plantea la hipótesis que un porcentaje menor del volumen total de escombros ingresa a la laguna, presumiblemente rocas de volumen considerable (De hasta 12 metros de diámetro), algunos de ellos impactan en el talud interior del flanco izquierdo causando deslizamientos, los mismos que aún se visibilizaron al momento de la inspección, el impacto de este volumen de escombros sobre el espejo de agua ocasiona el movimiento del agua y oleajes sucesivos dentro del vaso, siendo presumiblemente tres olas los que superan la cota de rebose del dique natural.

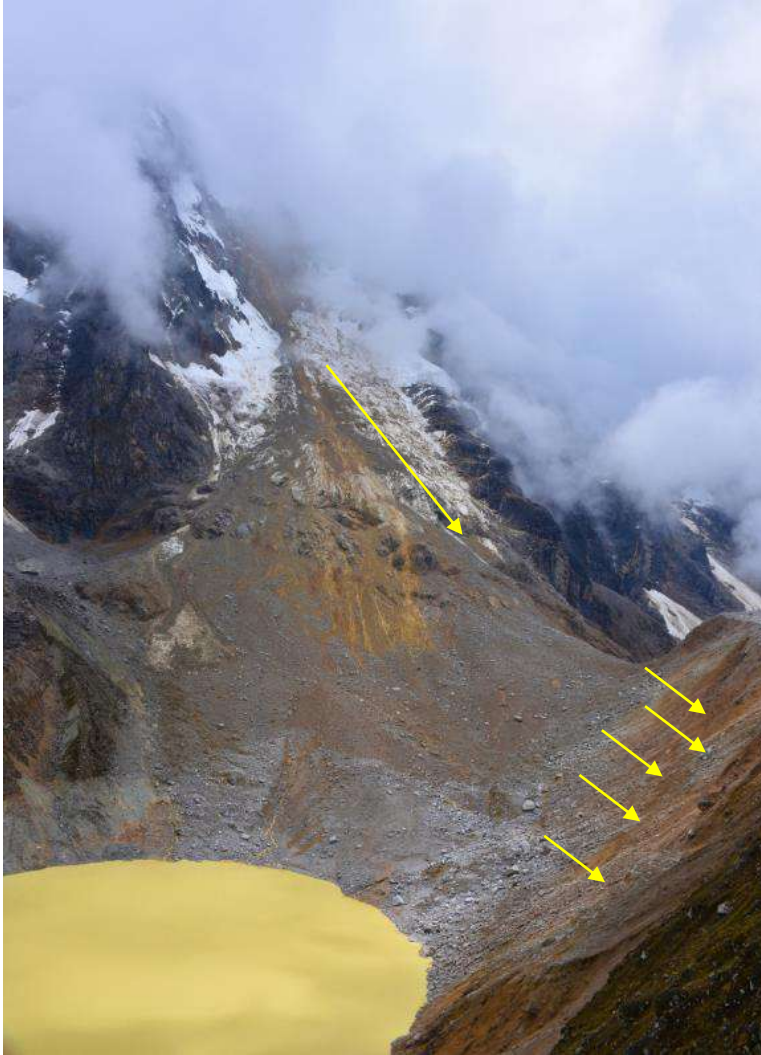


Figura 7. Se aprecia zonas significativamente alteradas en el talud interior del flanco izquierdo de la laguna, esto nos permite asumir la hipótesis sobre el impacto de los escombros (Fuente: INAIGEM / O.Vilca)

La dirección del flujo hidrodinámico llega ligeramente hacia la derecha del dique natural, zona donde se observa el mayor impacto con un deslizamiento de magnitud considerable y en constante dinámica, al momento de la inspección se observó continuos desprendimientos de roca (Ver Figura 8).



Figura 8. Dirección de flujo durante el oleaje, (Fuente: INAIGEM / O.Vilca)

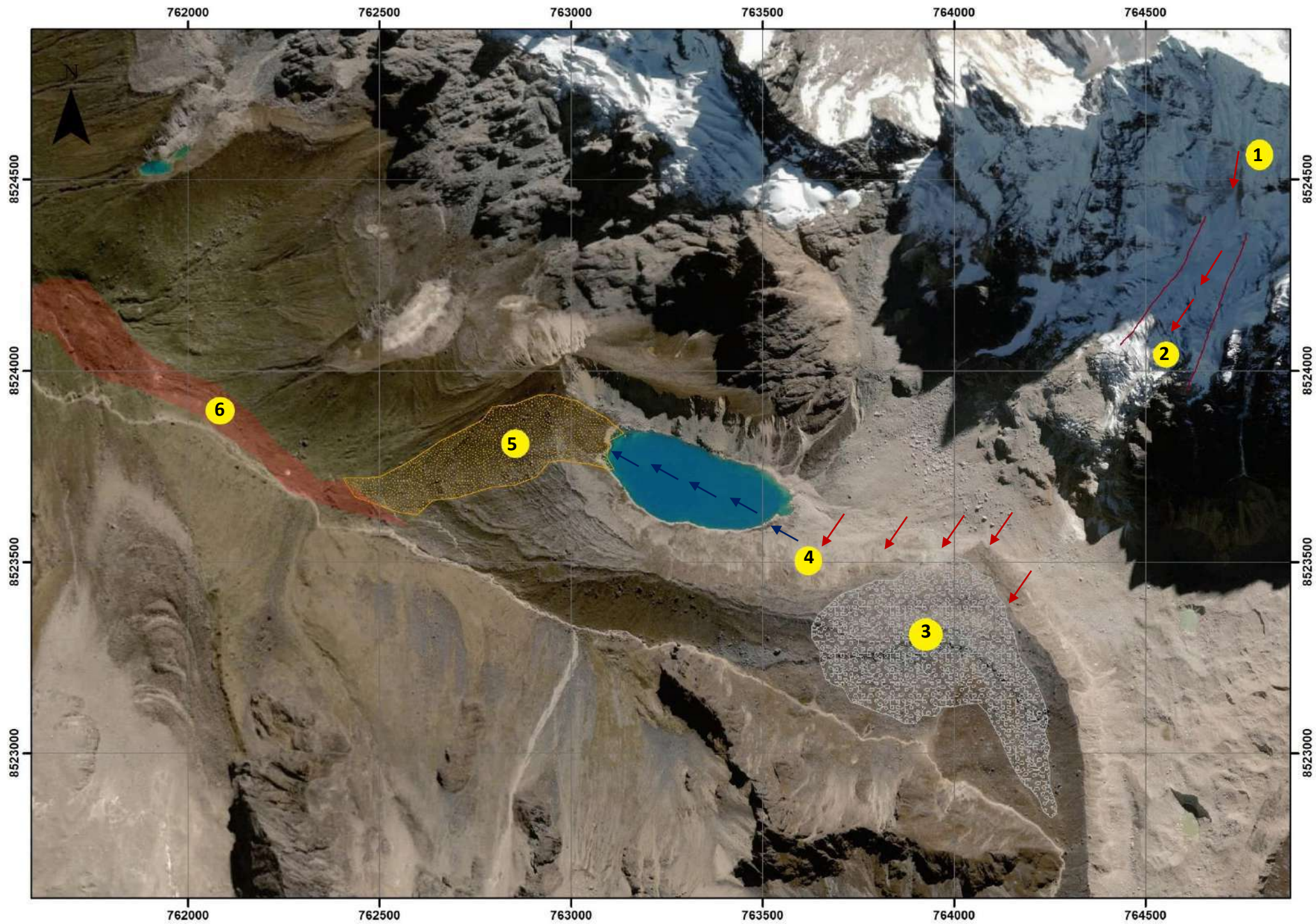
El proceso en cadena que desata la avalancha de tipo mixto (ver figura 9), tuvo como factores condicionantes lo siguiente:

- Días consecutivos con precipitaciones intensas.
- Laguna con el espejo de agua en su máximo nivel (sin rebose).
- Fuerte pendiente sobre el glaciar en la zona baja del desprendimiento, lo que facilitó que los escombros acumulen suficiente energía para sobrepasar la morrena de fondo y alcanzar así, hasta inmediaciones del abra Salkantay.

Figura 9. Descripción gráfica del proceso en cadena.

La avalancha mixta inicia en la cara sur del nevado Salkantay entre los 5,600 y 5,400 m de altitud **(1)**, se estima que cae un volumen de 400 mil metros cúbicos, estos escombros se transportan sobre el glaciar ubicado en la parte baja haciendo la función de rampa y con dirección de flujo hacia el divorcio de aguas **(2)**, la fuerte pendiente de la rampa incrementa la velocidad del flujo haciendo que estos se depositen en mayor proporción sobre la línea de divorcio de agua y parte de la morrena lateral izquierda **(3)**, una parte de los escombros impactan en el talud interior del flanco izquierdo logrando alcanzar el espejo de agua y desestabiliza la laguna al punto de generar oleajes dentro del vaso **(4)**, algunas olas sobrepasan el nivel de rebose de la laguna, erosionando la cara exterior del dique morrénico **(5)** El flujo de escombros se desplaza aguas abajo, ganando volumen con las escorrentías producto de las precipitaciones intensas de los últimos días **(6)**

(Fuente: Elaboración propia).



5. Conclusiones

- El fenómeno que originó el aluvión producto del desborde de la laguna Salkantaycocha fue una “avalancha mixta”.
- La avalancha mixta está compuesta predominantemente por roca.
- No se evidencia formación de brecha, el ancho de la base y la sección con una altura reducida en relación a los flancos hizo posible que el dique natural resista al impacto de los oleajes.
- Este evento pudo tener consecuencias mayores, en caso de que la totalidad de los escombros producto de la avalancha hubiera ingresado a la laguna.
- Se estima que el volumen de escombros precipitado desde la parte alta del nevado Salkantay es de 400 mil metros cúbicos.
- El volumen estimado de la laguna Salkantaycocha, es aproximadamente 2 millones de m³.
- El peligro es latente, considerando que la laguna mantiene un volumen importante de agua, y se observan desprendimientos de roca y hielo de manera permanente.

6. Recomendaciones

A corto plazo:

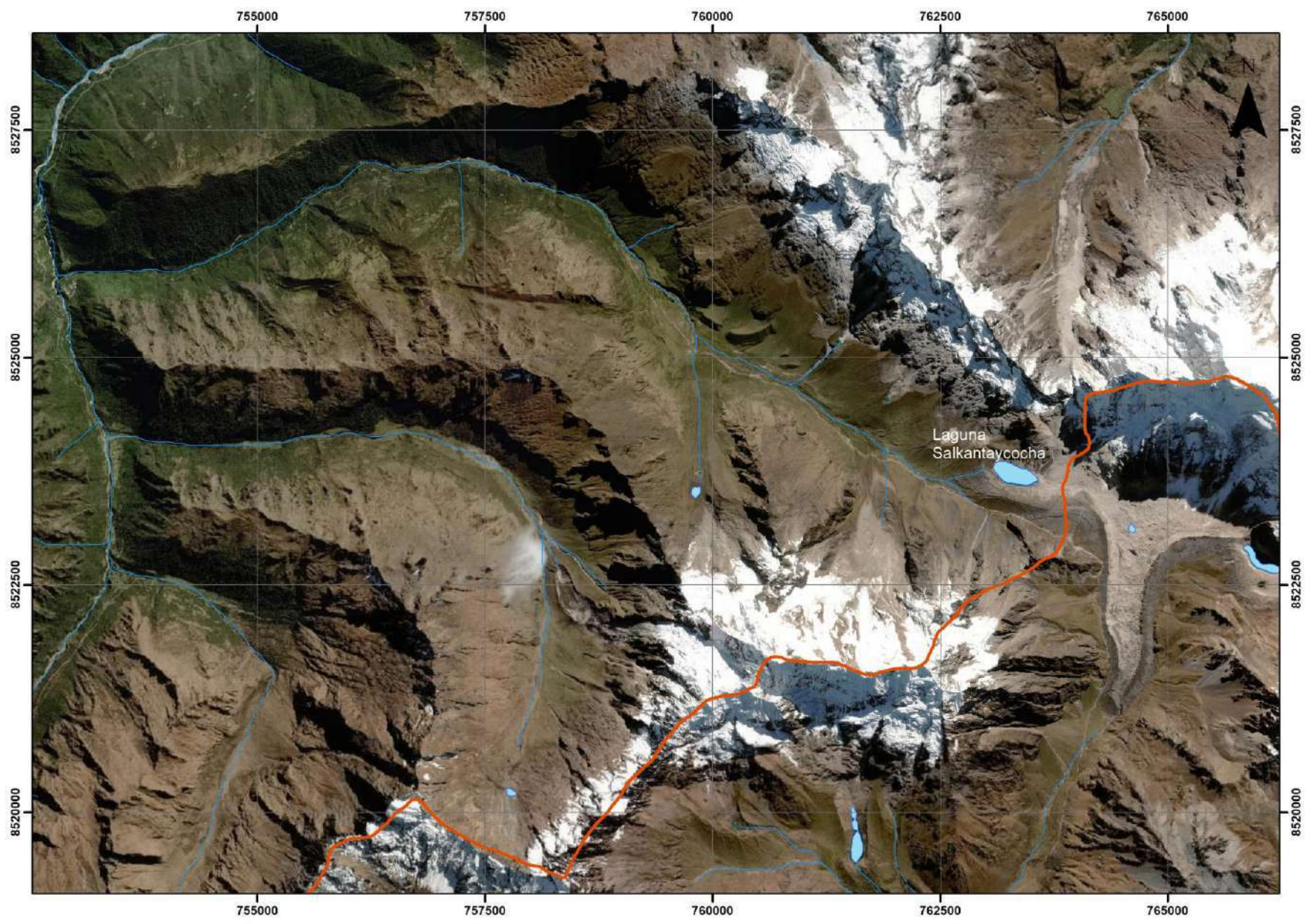
- Realizar la evaluación del ámbito mediante un levantamiento con DRONE.
- Estimar el volumen de hielo y roca con potencial de peligro.
- Evaluar la situación de la morrena frontal, que actúa como un dique de la laguna Salkantaycocha.

A mediano plazo:

- Realizar un estudio de evaluación de riesgos en la cuenca Salkantay.
- Realizar estudios geotécnicos a detalle, con la finalidad de determinar la estabilidad del vaso de la laguna posterior al evento suscitado.
- Realizar la batimetría de la laguna Salkantaycocha, para conocer con exactitud el volumen de acumulación de agua.
- Implementar un sistema de alerta temprana, para que la población actúe con suficiente tiempo y de modo adecuado para reducir daños de orden personal y material.
- Sensibilizar y preparar a la población de la sub cuenca Salkantay, fundamentalmente en aspectos de prevención.

Ing. Oscar Vilca Gómez
Especialista en Hidrología y Glaciología
Oficina Desconcentrada Macro Región Sur

Anexo. Mapa de Ubicación



Fotografías



Laguna Salkantaycocha antes del evento

Fuente: Abel Tseng

<https://lh5.googleusercontent.com/p/AF1QipPh1VJpiRoCroV8yZ9n9oqBP7ippOrKRBxWoNuk=h1440>



Laguna Salkantaycocha el día 25/02/2020

Fuente: INAIGEM / O.Vilca

Fotos 1. Comparativas de la laguna Salkantaycocha, antes y después del evento.



Foto 2. Vista panorámica de la zona de avalancha, capturada el día 24/02/2020 a las 09:14 hrs (Fuente: Benito Moncada)



Foto 3. Zona de depósito de escombros, se observa el tamaño de las rocas producto de la avalancha mixta (Fuente: INAIGEM / O.Vilca).



Foto 4. Taludes interiores del vaso, en línea amarilla se señala el impacto de los oleajes producidos por la avalancha (Fuente: INAIGEM / O.Vilca).



Foto 5. Panorámica de la zona de avalancha y la huella del flujo con dirección a la laguna (Fuente: INAIGEM / O.Vilca).

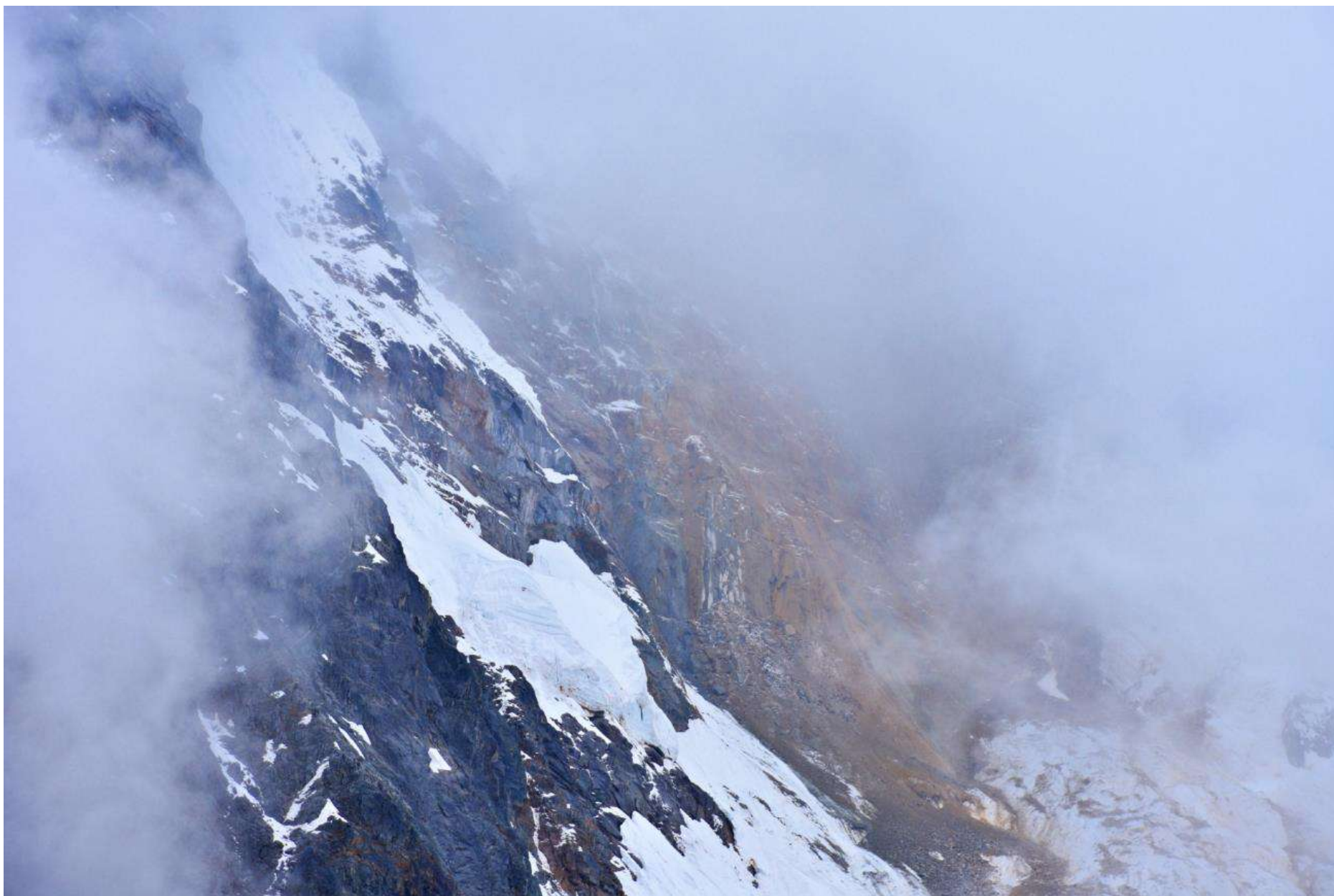


Foto 6. Zoom de la zona de arranque de la avalancha, se observa la acumulación de escombros en la zona alta/media (Fuente: INAIGEM / O.Vilca).



Foto 7. Deslizamiento en el talud de la morrena lateral derecha, cercano a la zona frontal (Fuente: INAIGEM / O.Vilca).



Foto 8. Vista de la cara exterior en la zona frontal del dique de la laguna Salkantaycocha (Fuente: Benito Moncada).

Informe de inspección 02

LAGUNA SALKANTAYCOCHA



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Elaborado por:

Ing. Oscar Vilca Gómez
Especialista en Hidrología y Glaciología

Integrantes de la segunda inspección realizada del 28 de febrero al 02 de marzo

Ing. Jesús Gómez López
Ing. Alexzander Santiago Martel
Ing. Harrison Jara Infante
Ing. Oscar Vilca Gómez
Blgo. Israel Aragón Romero
Guarda Parque Isaías Navarrete Quintanilla

Ing. Victor Bustinza Urviola
Coordinador

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

INFORME DE INSPECCIÓN DE LA LAGUNA SALKANTAYCOCHA

1. Antecedentes

El domingo 23 de febrero del 2020 aproximadamente a las 14:42 hrs. se produce el desprendimiento de un bloque de roca desde la zona alta del nevado Salkantay (5,600 msnm), el desprendimiento constituido por una mezcla de rocas y bloques de hielo llegan a depositarse en un zona entre la laguna Salkantaycocha y el Abra Salkantay, un porcentaje del mismo llega a impactar en la laguna produciendo oleajes que ocasionó el aluvión, el primer sector en ser afectado fue Wayraqmachay aproximadamente a las 14:45 hrs.

El 25 de febrero un especialista de la ODMRS 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 dirigen a la zona de interés con la finalidad de realizar el mapeo y reconocimiento de zonas de peligro.

2. Objetivo

Evaluar la situación de la laguna Salkantaycocha

3. Ubicación

Se ubica en la cabecera de la cuenca Salkantay, perteneciente a la cuenca Urubamba. Políticamente se ubica en el distrito de Santa Teresa, provincia de La Convención del departamento de Cusco, ver Figura 1.

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

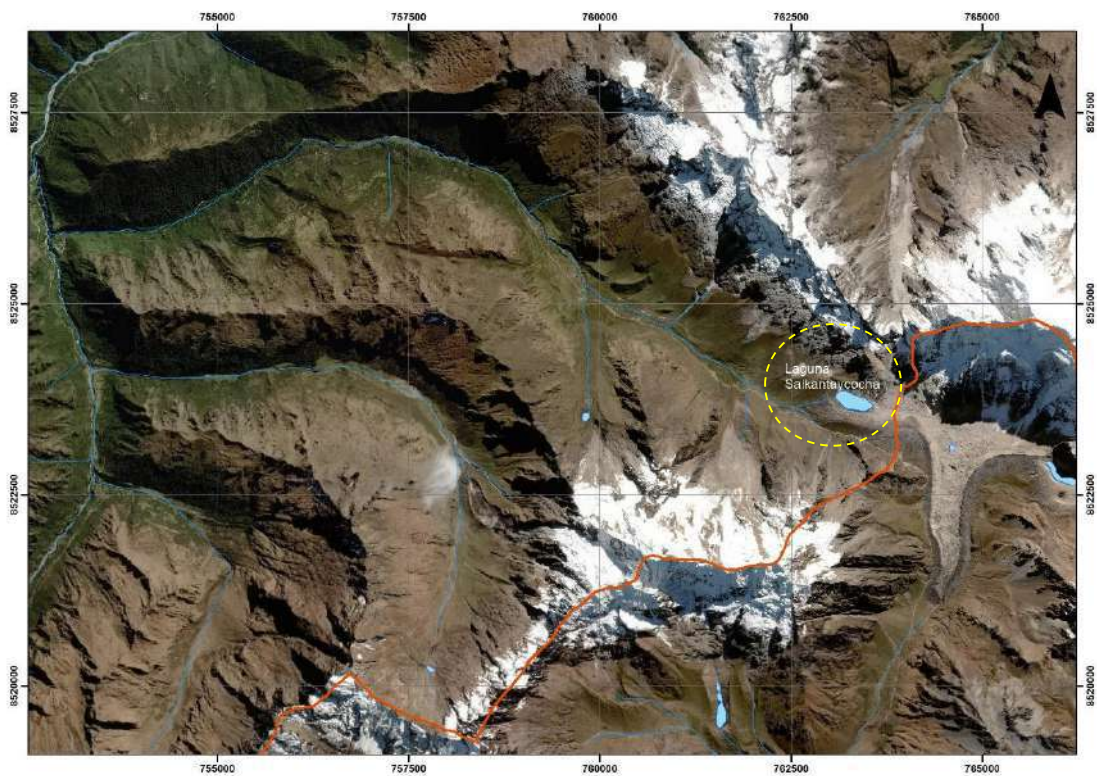


Figura 1. Ubicación de la laguna Salkantaycocha (Fuente: Elaboración propia)

4. Resultados de la inspección inmediata realizada el 24 de febrero del 2020.

4.1 Laguna Salkantaycocha

Es una laguna de origen glaciar situada a 4,500 msnm; ocupa una cubeta que dejó el glaciar durante su retroceso, sus características antes del evento fueron:

Largo : 506 m
Ancho : 211 m
Área : 79,308 m²

Esta laguna se encuentra flanqueada en su totalidad por depósitos morrénicos (Ver Figura 2), y su principal fuente de abastecimiento proviene del derretimiento de los glaciares del nevado Salkantay.



Figura 2. Imagen satelital de la laguna Salkantaycocha (Fuente: Google Maps).

El entorno de la laguna Salkantaycocha muestra evidencias claras de alteraciones en la superficie del agua, como es el cambio de coloración, también en la dinámica de los taludes internos, aspecto que se corrobora con la observación de deslizamientos y caída de rocas con relativa frecuencia (ver Figura 3).

En la zona posterior y entre el flanco izquierdo es posible apreciar una cantidad significativa de escombros, dispuestos en mayor proporción fuera del vaso lagunar.



Figura 3. Imagen de la laguna desde la zona posterior hacia aguas abajo, se observan los flancos izquierdo y derecho con marcadas zona de deslizamientos, así también en primer plano se observa la presencia de escombros, arena y lodo (Fuente: INAIGEM/O.Vilca – 25.02.2020).

La zona frontal que cumple la función de dique natural, está compuesta en su integridad por depósitos morrénicos, aquí se observan marcas que dejó el agua durante el salto u oleaje, sobrepasando los ~15 metros de borde libre (aproximadamente) (Ver Figura 4).



Figura 4. Zona frontal, se observa la huella del flujo de agua que sobrepasó la cota de rebose, también la erosión producida en la cara exterior (Fuente: INAIGEM / O.Vilca – 25.02.2020)

La zona posterior de la laguna se muestra con visibles signos de alteración en la superficie, con mayor presencia de escombros, arena y lodo. Esta zona es un depósito de detritos, con la frecuente caída de rocas y hielo proveniente de los frentes glaciares, la zona se encuentra sobresaturada, a la vez cumple la función de dissipador de energía amortiguando así la velocidad de las rocas antes que lleguen a impactar al espejo de agua (Ver Figura 5).



Figura 5. Vista de la zona posterior con presencia de abundante escombros, al momento de la inspección se observó caída de roca y hielo desde el frente glaciar (Fuente: INAI GEM / O.Vilca – 25.02.2020)

4.2 Descripción de los sucesos

Avalancha mixta

Con origen en la cara sur del sector oeste del nevado Salkantay, aproximadamente entre los 5,600 y 5,400 msnm (Ver Figura 6). El desprendimiento de roca y hielo cae en forma vertical y luego se desplaza sobre el glaciar, este último cumple la función de una rampa de hielo debido a que posee una pendiente muy elevada, generando así la energía suficiente para alcanzar un desplazamiento de hasta 1.7 km.

Se estima la caída de un volumen de roca y hielo de aproximadamente 400 mil metros cúbicos, siendo roca más del 90% (Datos preliminares).



Figura 5. Zona de origen de la avalancha mixta, 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).

El volumen de escombros de la avalancha mixta, según la línea de flujo principal, se deposita entre la zona posterior de la laguna Salkantaycocha y sobre la línea del divorcio de aguas.



Figura 6. Línea de flujo de la avalancha y zona principal de depósito de escombros (Fuente: Benito Moncada – 24.02.2020)

Impacto en la laguna y generación del oleaje

Se plantea la hipótesis que un porcentaje menor del volumen total de escombros ingresa a la laguna, presumiblemente rocas de volumen considerable (De hasta 12 metros de diámetro), algunos de ellos impactan en el talud interior del flanco izquierdo causando deslizamientos, los mismos que aún se visibilizaron al momento de la inspección, el impacto de este volumen de escombros sobre el espejo de agua ocasiona el movimiento del agua y oleajes sucesivos dentro del vaso, siendo presumiblemente tres olas los que superan la cota de rebose del dique natural.



Figura 7. Se aprecia zonas significativamente alteradas en el talud interior del flanco izquierdo de la laguna, esto nos permite asumir la hipótesis sobre el impacto de los escombros (Fuente: INAIGEM / O.Vilca – 25.02.2020)

La dirección del flujo hidrodinámico llega ligeramente hacia la derecha del dique natural, zona donde se observa el mayor impacto con un deslizamiento de magnitud considerable y en constante dinámica, tal como se evidenció al momento de la inspección, se observó continuos desprendimientos de roca y material morrénico (Ver Figura 8).



Figura 8. Dirección del flujo durante el oleaje (Fuente: INAIGEM / O.Vilca – 25.02.2020)

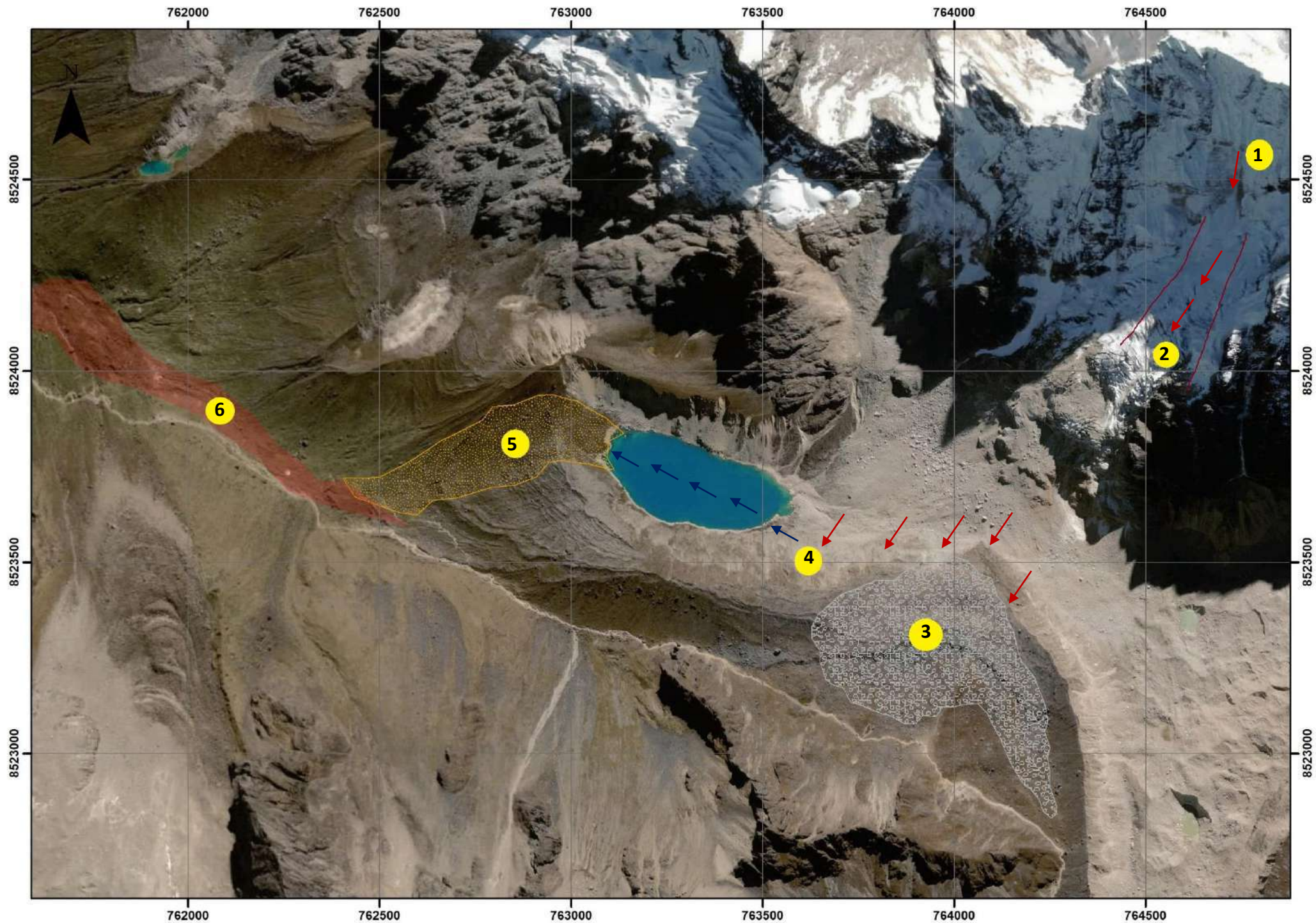
El proceso en cadena que desata la avalancha de tipo mixto (ver figura 9), tuvo como factores condicionantes lo siguiente:

- Días consecutivos con precipitaciones intensas.
- Laguna con el espejo de agua en su máximo nivel (sin rebose).
- Pendiente elevada sobre el glaciar en la zona baja del desprendimiento, lo que facilitó que los escombros acumulen suficiente energía para sobrepasar la morrena de fondo y alcanzar así, hasta inmediaciones del abra Salkantay.

Figura 9. Descripción gráfica del proceso en cadena.

La avalancha mixta inicia en la cara sur del nevado Salkantay entre los 5,600 y 5,400 m de altitud **(1)**, se estima que cae un volumen de 400 mil metros cúbicos, estos escombros se transportan sobre el glaciar ubicado en la parte baja haciendo la función de rampa y con dirección de flujo hacia el divorcio de aguas **(2)**, la fuerte pendiente de la rampa incrementa la velocidad del flujo haciendo que estos se depositen en mayor proporción sobre la línea de divorcio de agua y parte de la morrena lateral izquierda **(3)**, una parte de los escombros impactan en el talud interior del flanco izquierdo logrando alcanzar el espejo de agua y desestabiliza la laguna al punto de generar oleajes dentro del vaso **(4)**, algunas olas sobrepasan el nivel de rebose de la laguna, erosionando la cara exterior del dique morrénico **(5)** El flujo de escombros se desplaza aguas abajo, ganando volumen con las escorrentías producto de las precipitaciones intensas de los últimos días **(6)**

(Fuente: Elaboración propia).



5. Resultados de la inspección realizada del 28 de febrero al 02 de marzo del 2020

5.1 Características físicas de la laguna Salkantaycocha

Después de la avalancha, la laguna Salkantaycocha ha incrementado el nivel de espejo de agua en aproximadamente 3.00 m de altura (Ver Figura 10), modificando sus dimensiones así:

Largo : 609 m
Ancho : 264 m
Área : 118,955 m²

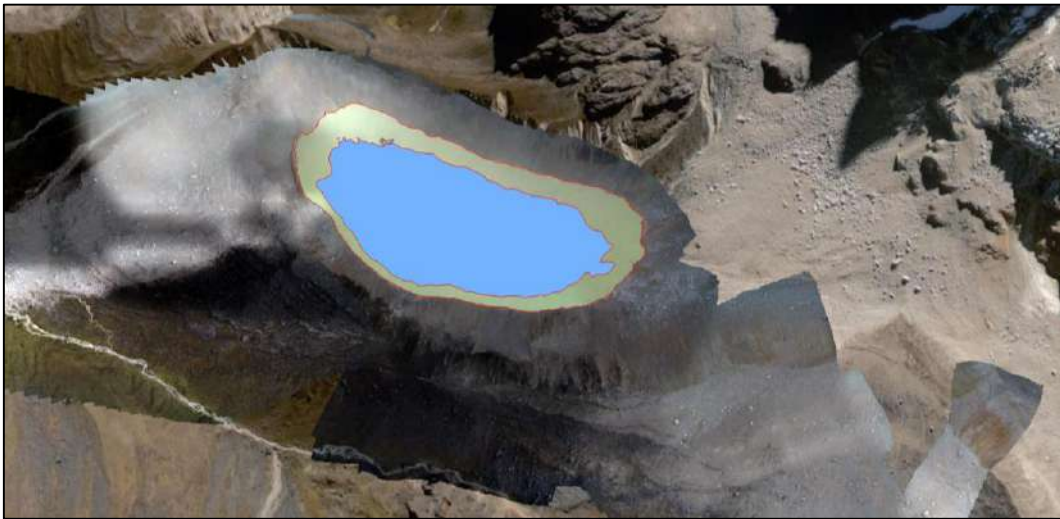


Figura 10. Incremento del nivel de espejo de agua (Fuente: INAIGEM / A. Santiago, H.Jara, E. Melgarejo – 01.03.2020)

El borde libre registrado en la laguna Salkantaycocha al día de la inspección es de 25.00 m. de altura, obtenido de la cota más baja en la coronación del dique frontal y el nivel del espejo de agua actual de la laguna (Ver Figura 11).

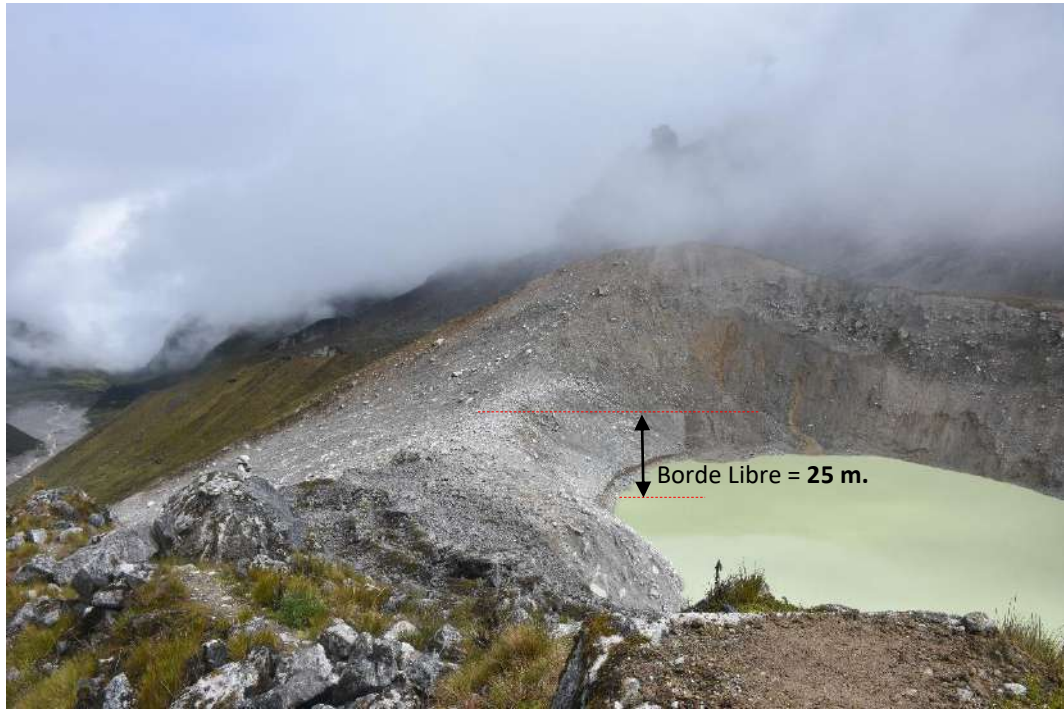


Figura 11. Borde libre registrado al momento de la inspección (Fuente: INAIGEM / A. Santiago, H.Jara – 01.03.2020)

Sobre los taludes internos de las morrenas

El análisis de las secciones obtenidas mediante el modelo de elevación digital (Ver Figura 12), que a su vez fueron resultados del vuelo drone, nos indican lo siguiente:

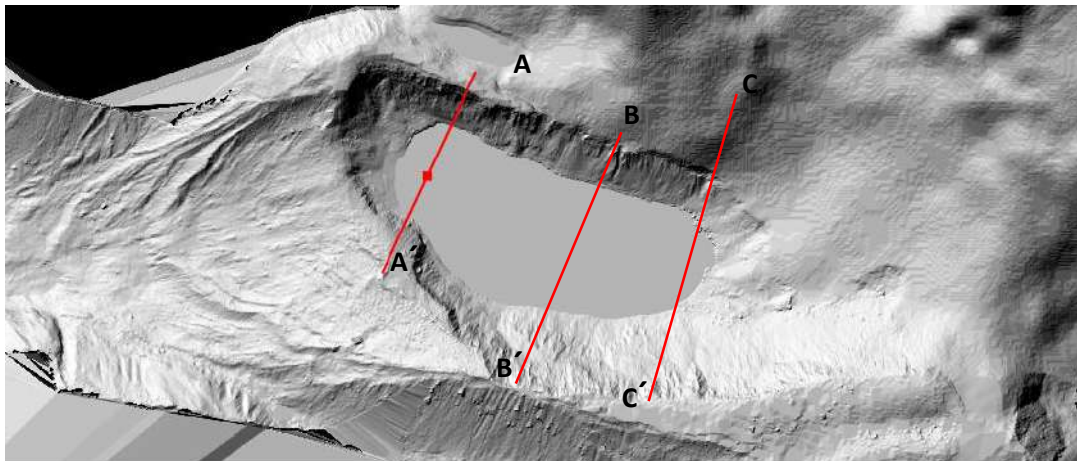


Figura 12. Modelo de elevación digital y secciones transversales para el análisis de los taludes internos (Fuente: INAIGEM / A. Santiago, H. Jara – 01.03.2020)

Sección A – A’: Sobre el talud de la morrena lateral derecha se observa pendientes muy pronunciadas, además la parte baja del talud se encuentra visiblemente erosionada, debido al oleaje generado por el desprendimiento de la avalancha mixta que cayó sobre la laguna. Todo ello hace que esta zona del talud morrénico sea altamente inestable y represente un nivel de peligro alto ante un eventual desplome sobre la laguna (Ver Figura 13).

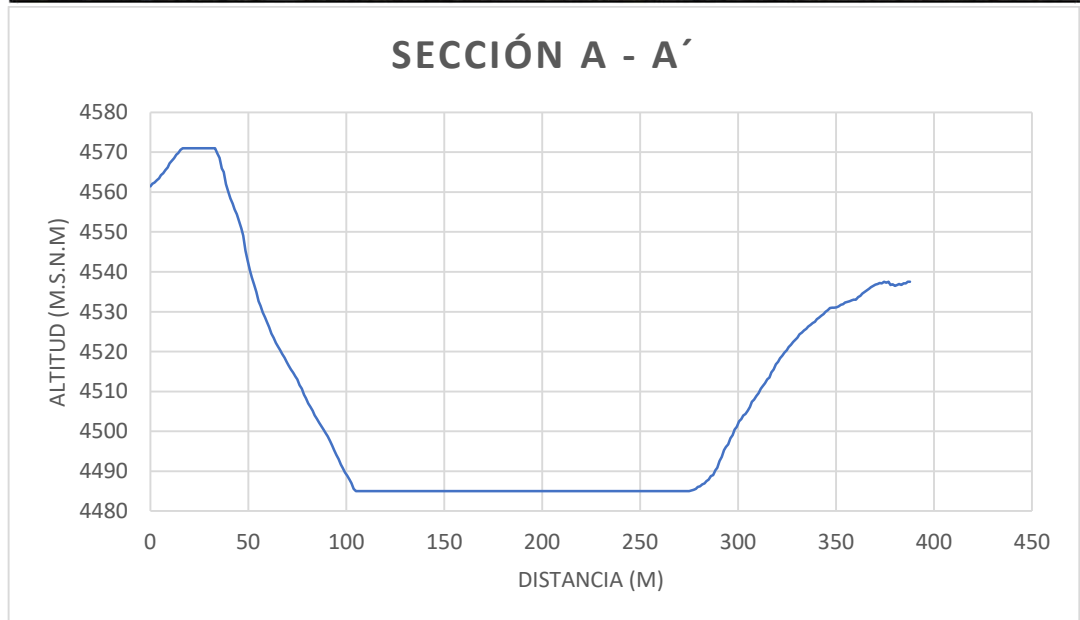


Figura 13. Sección A – A', talud interno en el flanco derecho afectado por los oleajes en la laguna (Fuente: INAIGEM /H. Jara – 01.03.2020)

Sección B - B' : Aquí se observa que la pendiente del talud en el flanco izquierdo no es tan abrupta como el del lado derecho, en este sector los taludes se muestran más estables luego de los oleajes debido principalmente a las pendientes que está en el orden de 55° en la base (Ver Figura 14).

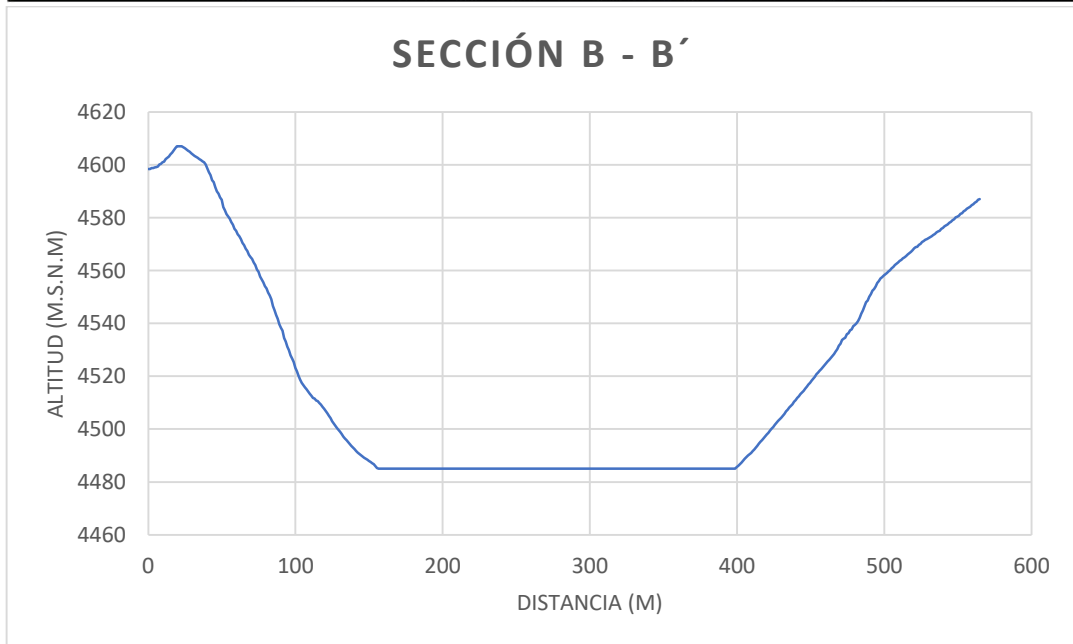


Figura 14. Sección B – B', talud interno en el flanco izquierdo (Fuente: INAIGEM /H. Jara – 01.03.2020)

Sección C – C’: Ubicado en la parte posterior y perpendicular al eje de la laguna Salkantaycocha, también se visualiza erosión en la parte baja de ambos taludes internos tanto de la morrena lateral derecha como de la izquierda. Es en el talud interno de la morrena lateral izquierda donde se produce el impacto de la avalancha, quedando afectada y con una alta probabilidad de deslizamiento (Ver Figura 15).

El desprendimiento de esta masa de morrena podría comprometer la estabilidad de la laguna.

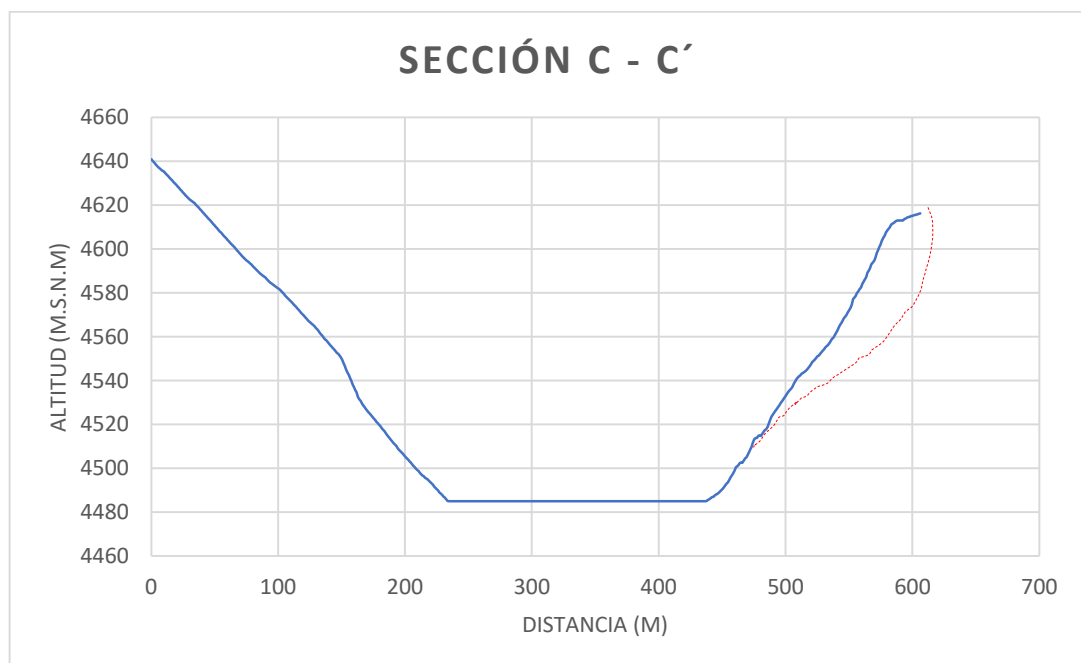


Figura 15. Sección C – C’, foto del talud interno en el flanco izquierdo, se observa un agrietamiento y ligero asentamiento en este sector, esta zona recibió el impacto más severo de la avalancha dentro de la laguna (Fuente: INAIGEM /O. Vilca, H. Jara – 01.03.2020)

6. Conclusiones

- El fenómeno que originó el aluvión producto del desborde de la laguna Salkantaycocha fue una “avalancha mixta”.
- El borde libre en la zona frontal es de 25.0 metros.
- Las características geométricas de la laguna al día de la inspección fueron:
 - Largo: 609 m
 - Ancho: 264 m
 - Área: 118,955 m²
- La avalancha mixta estuvo compuesta predominantemente por roca.
- Los taludes interiores están visiblemente afectados, en especial en la zona de impacto de la avalancha.
- El peligro es latente, considerando que la laguna mantiene un volumen importante de agua, y se observan desprendimientos de roca y hielo de manera constante.

7. Recomendaciones

A corto plazo:

- Realizar el estudio de batimetría en el vaso de la laguna Salkantaycocha.
- Estimar el volumen de hielo y roca con potencial de peligro.
- Monitorear los taludes interiores, en especial el talud en la morrena lateral izquierda (zona de impacto de la avalancha).

A mediano plazo:

- Realizar un estudio de evaluación de riesgos en la cuenca Salkantay.
- Realizar estudios de geofísica a detalle, con la finalidad de determinar la estabilidad del vaso.
- Implementar un sistema de alerta temprana, para que la población actúe con suficiente tiempo y de modo adecuado para reducir daños de orden personal y material.
- Sensibilizar y preparar a la población de la sub cuenca Salkantay, fundamentalmente en aspectos de prevención.

Informe de Inspección 03

LAGUNA SALKANTAYCOCHA



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe de Inspección 03

Ing. Oscar Vilca Gómez
Especialista en Hidrología y Glaciología

Ing. Victor Bustinza Urviola
Jefe de la Oficina Desconcentrada

Cusco, 09 de octubre del 2020

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

Informe de la situación actual de la laguna Salkantaycocha

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, realizan estudios para la 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 sub cuencas de origen glaciar.

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

Por ello, se realizó la inspección in situ el día 09 de octubre, en cumplimiento a las recomendaciones citadas en el informe técnico A01 emitido por el INAIGEM, que a la letra dice:

- Monitorear el comportamiento de los niveles de la laguna Salkantaycocha.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.

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.

El 10 de julio se presentó y sustentó ante el COER Cusco, el Informe técnico N°A01 Laguna Salkantaycocha.

El 09 de octubre, personal especialista del INAIGEM realiza la visita de inspección a Salkantaycocha con las apreciaciones mencionadas 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 zona 18L son:

763 307 Este y 8 523 695 Norte

3.2. Objetivos

- Monitorear el comportamiento del nivel de espejo de la laguna Salkantaycocha.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.

4. Descripción

4.1. Situación de la laguna Salkantaycocha

La situación de la laguna Salkantaycocha observada el día 09 de octubre (Ver **Figura 01**), en comparación a las inspecciones realizadas los días 25 de febrero y 08 de julio, nos muestra lo siguiente:

- Los taludes internos del vaso morrénico evidencia fuerte erosión post evento, este proceso es en alguna medida responsable de la colmatación en la laguna, es notorio la señal que dejaron los deslizamientos iniciales (Ver **Figura 01 b**) se presume que fueron los de mayor tamaño, posteriormente solo se produjo erosión laminar por escorrentía y por gravedad.

- La zona de mayor dinámica e inestabilidad se encuentra en el sector posterior de la morrena lateral izquierda, zona donde se produjo el impacto con mayor energía proveniente de la avalancha, esta zona aún mantiene grietas de discontinuidad y fracturamiento, lo que lo hace potencial a deslizamientos en la temporada de lluvia (Ver **Figura 02**).

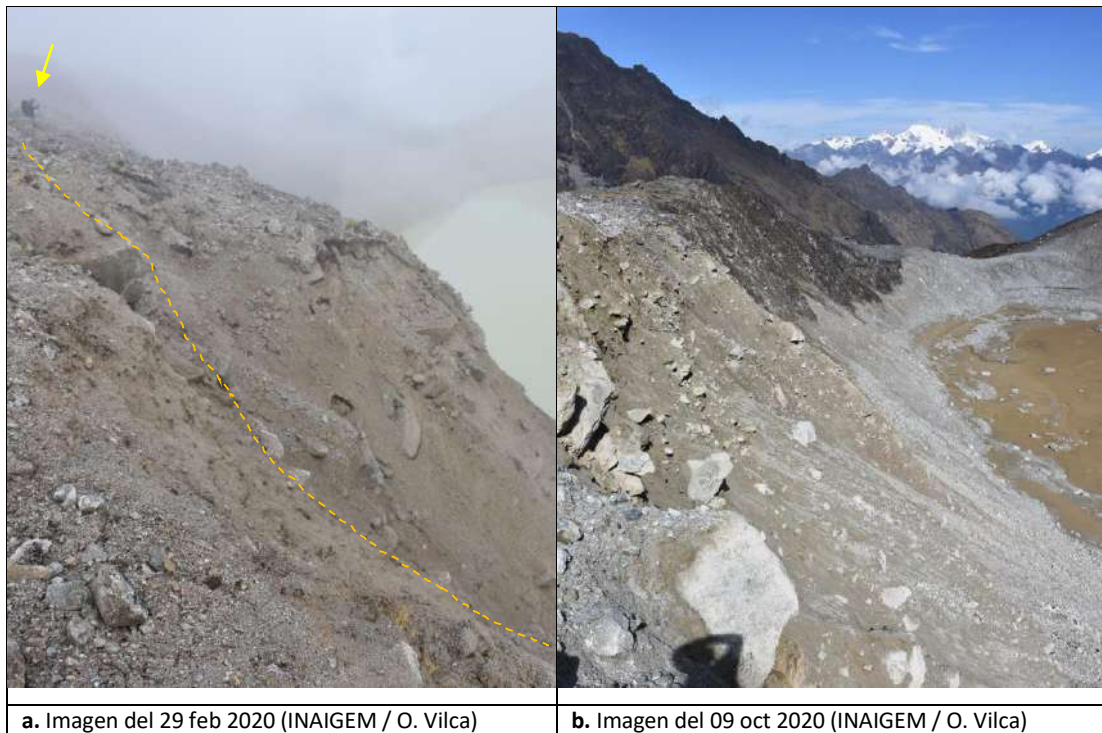
- El dique frontal presenta condiciones similares en referencia a las visitas de inspección anteriores, se observa un alto grado de erosión en la zona de mayor altura, zona que recibió el mayor impacto del oleaje el día del evento (Ver **Figura 03**).

- Salkantaycocha presenta un nivel de espejo de agua superior al reportado en la inspección del 08 de julio, esto debido en gran medida al aporte del glaciar producto de la fusión en los días previos, días que se caracterizaron por ser secos y despejados, de este modo los glaciares aportantes quedaron expuestos a la acción de la radiación solar, según versiones de los pobladores que habitan en las zonas aledañas y como se evidencia en los registros de la estación Soraypampa (SENAMHI) (Ver **Figura 04**).

- La zona posterior mantiene su condición de receptor de deposición del material detrítico proveniente de la zona alta del Salkantay, contribuyendo de manera constante con abundante carga de sedimentos hacia la laguna.



Figura 01. Se muestra una comparativa de fotografías capturadas en las diferentes inspecciones realizadas a la laguna Salkantaycocha, en la que se evidencia la fluctuación del nivel de espejo de agua. En la actualidad se muestra a una laguna visiblemente colmatada con un ligero incremento en el nivel respecto a la inspección de julio.



a. Imagen del 29 feb 2020 (INAIGEM / O. Vilca)

b. Imagen del 09 oct 2020 (INAIGEM / O. Vilca)

Figura 02. Se observa la zona de mayor impacto en el talud interno de la morrena lateral izquierda, en el mismo que se produjeron diversos deslizamientos y que a la fecha se mantiene en constante dinámica. En la figura 02 a, se marca el plano de deslizamiento y en flecha de color amarillo a una persona que nos permite dimensionar aproximadamente la cantidad de material que terminó depositándose en la laguna.

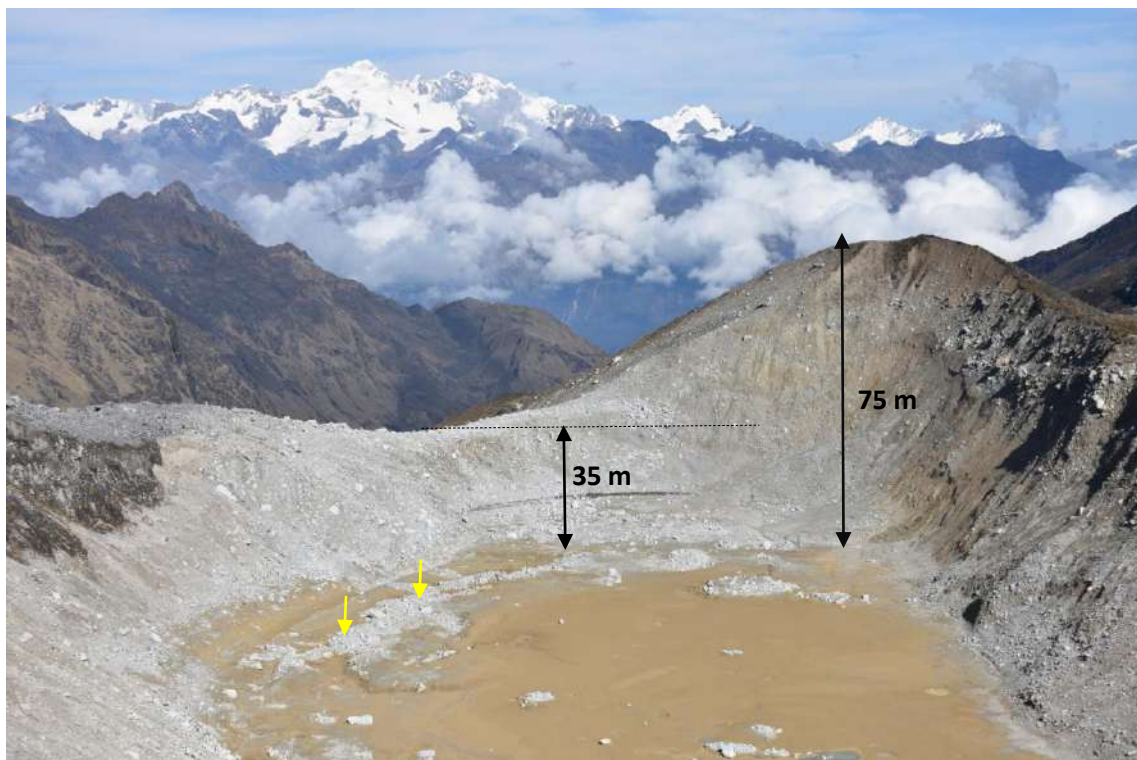


Figura 03. Zona frontal, acorde a las estimaciones realizadas con el modelo de elevación digital obtenida mediante RPAS, se observan las alturas en relación al nivel de espejo, tanto el borde libre como la cresta en la zona de mayor impacto. En flechas de color amarillo se señala las evidencias de los deslizamientos depositados en el vaso lagunar.

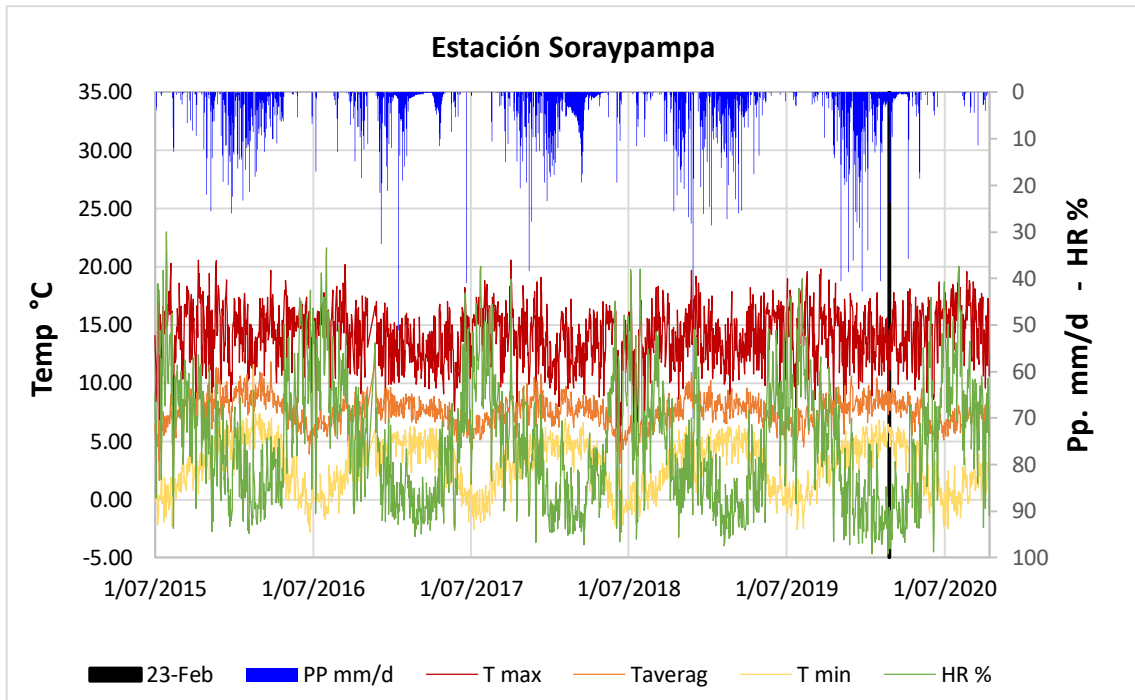


Figura 04. Análisis de los registros de precipitación, temperatura y humedad relativa en la estación Soraypampa. Se observa que los meses de previos a la inspección fueron los días más secos con registros de humedad relativa mínima de hasta 37% registrado el 02 de agosto, además de precipitaciones leves y esporádicas en los últimos días previos a la inspección (Fuente. SENAMHI).

4.2. 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, al día de la inspección se observó sin señales de desprendimientos significativos, sin embargo, existe caída constante de fragmentos de roca, volúmenes reducidos que forman parte de la dinámica normal en esta zona.

Para realizar el seguimiento de este sector se considera ideal las fotografías desde el sector campamento laguna ubicada a 20 minutos antes de llegar al abra Salkantay subiendo desde Soraypampa, lugar que nos ofrece una vista como la que se ve en la **Figura 05**, en la que se observa el plano de inclinación de la falla, además de una fotografía desde la zona del abra Salkantay tal como se muestra en la **Figura 06**.

Este seguimiento nos permitirá observar los cambios que se presentan en la pared de roca, tanto de los glaciares colgantes aledaños como de la dinámica de fracturamiento de la roca, de este modo conocer los mecanismos que actúan en paredes de roca en altitudes similares.



Figura 05. Fotografía capturada desde la zona campamento laguna, se observa el plano de inclinación en la zona de interés.



Figura 06. Vista frontal de la zona de arranque, imagen capturada desde el abra Salkantay. Esta imagen nos muestra zonas de oxidación en el sector de arranque, esto nos devela el proceso de gelifración que ocasionó el desprendimiento del volumen de roca el día 23 de febrero.

5. Conclusiones

- La situación de la laguna Salkantaycocha acorde a la inspección ocular realizada el 09 de octubre del 2020, es de una laguna colmatada producto de la acumulación de escombros y sedimentos, tanto de la avalancha, así como de los deslizamientos continuos producidos 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 incremento leve en comparación a la reportada el 08 de julio, existiendo la probabilidad de que en la temporada de lluvias eleve el nivel de espejo, aspecto que se deberá monitorear.
- En referencia a la pared de roca del Salkantay no muestra cambios significativos en comparación a lo reportado en la inspección del 08 de julio, pero sí muestra una dinámica activa con desprendimientos constantes de fragmentos de roca de dimensiones menores, estos no representan peligro para los transeúntes del camino entre Soraypampa y Wayraqmachay.

6. Recomendaciones

- Monitorear el comportamiento de los niveles de la laguna Salkantaycocha en la estación húmeda.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.
- Evitar el acercamiento de personas a la zona de depósito de escombros, por tratarse de una zona inestable.

Informe de Inspección 04

LAGUNA SALKANTAYCOCHA



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe de Inspección 04
Laguna Salkantaycocha

Ing. Oscar Vilca Gómez
Especialista en Hidrología y Glaciología

Ing. Victor Bustinza Urviola
Jefe de la Oficina Desconcentrada

Cusco, 05 de marzo del 2021

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

Informe de la situación actual de la laguna Salkantaycocha

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, realizan estudios para la 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 sub cuencas de origen glaciar.

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

Por ello, se realizó la inspección in situ el día 26 de enero del 2021, en cumplimiento a las recomendaciones citadas en el informe técnico A01 emitido por el INAIGEM, que a la letra dice:

- Monitorear el comportamiento de los niveles de la laguna Salkantaycocha.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.

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 del 2020, 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 del 2020, 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 del 2020, personal del INAIGEM realiza una visita de inspección a la laguna Salkantaycocha.

El 10 de julio del 2020, se presentó y sustentó ante el COER Cusco, el Informe técnico N°A01 Laguna Salkantaycocha.

El 09 de octubre del 2020, personal especialista del INAIGEM realiza la visita de inspección a Salkantaycocha.

El 26 de enero del 2021, personal especialista del INAIGEM realiza la visita de inspección a Salkantaycocha con las apreciaciones mencionadas 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 Anexo **Mapa**.

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 zona 18L son:

763 307 Este y 8 523 695 Norte

3.2. Objetivos

- Monitorear el comportamiento del nivel de espejo de la laguna Salkantaycocha.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.

4. Descripción

4.1. Situación de la laguna Salkantaycocha

La situación de la laguna Salkantaycocha observada el día 26 de enero, en comparación a las inspecciones realizadas los días 25 de febrero, 08 de julio y 09 de octubre del 2020 (Ver **Figura 01**), nos muestra lo siguiente:

- Los taludes interiores del vaso morrénico continúa en proceso de erosión lenta, debido principalmente a la escorrentía producto de las precipitaciones.
- El dique frontal presenta condiciones similares en referencia a las visitas de inspección anteriores.
- Sobre el nivel de espejo de agua de Salkantaycocha se observaron cambios significativos al reportado en la inspección del 09 de octubre, debido a las precipitaciones de la estación. Este nivel de espejo incrementó en aproximadamente 2 m, lo que nos indica que Salkantaycocha regula el volumen de agua de forma natural acorde a las condiciones meteorológicas. El volumen de agua almacenada no representaría peligro inminente, tanto por la profundidad reducida como consecuencia de la sedimentación, así como por la latura de borde libre existente.
- La zona posterior no muestra cambios significativos con relación a lo reportado en la última inspección.



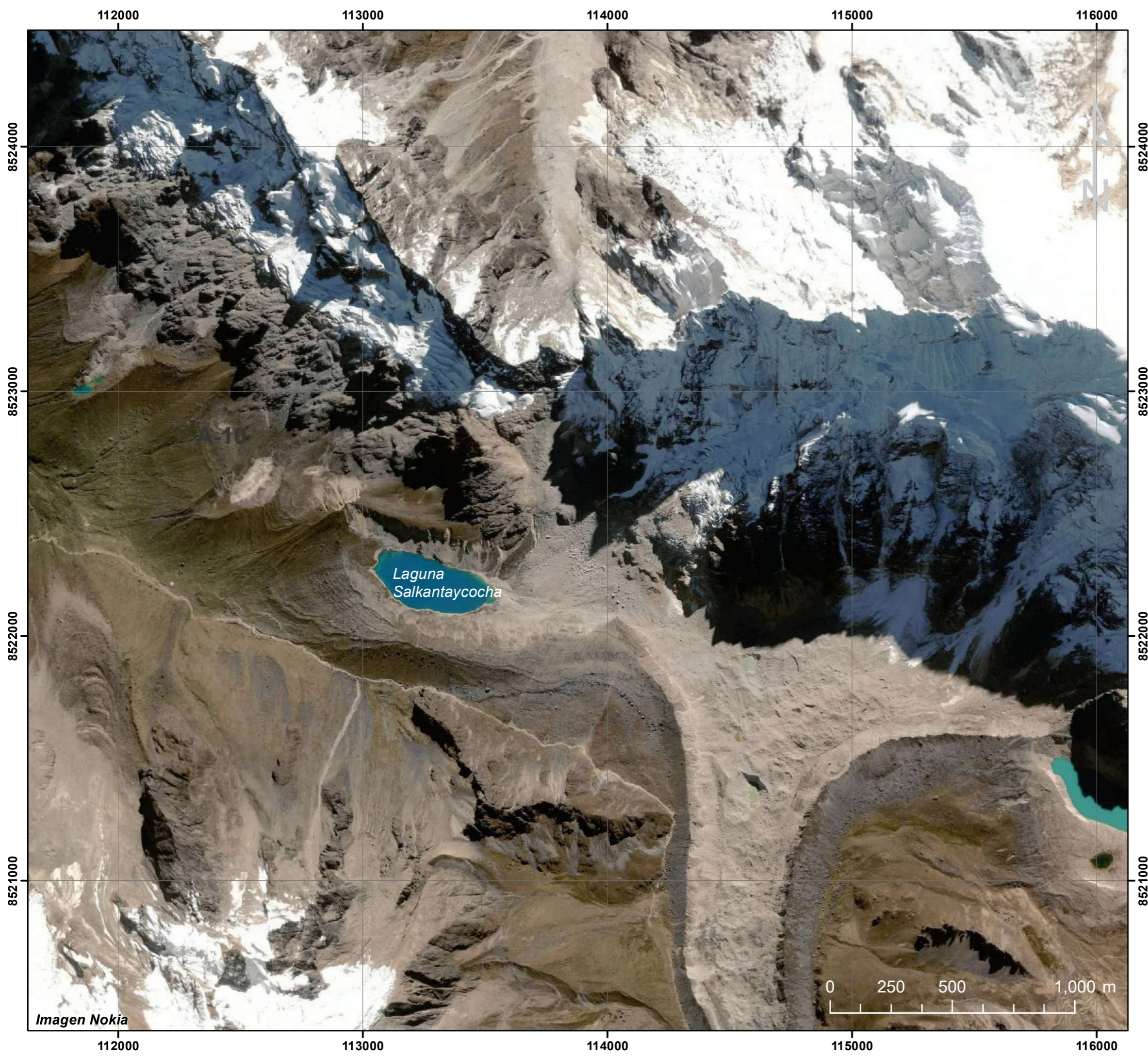
Figura 01. Comparativa de fotografías capturadas en las diferentes inspecciones realizadas a la laguna Salkantaycocha, en la que se evidencia la fluctuación del nivel de espejo de agua.

5. Conclusiones

- La situación de la laguna Salkantaycocha acorde a la inspección ocular realizada el 26 de enero del 2021, es de una laguna con un incremento significativo del nivel de espejo de agua en comparación a la inspección realizada en octubre del 2020.
- Como se mencionó en las conclusiones del informe N° 03 el incremento del nivel de espejo de agua era un escenario esperado debido a la temporada de precipitaciones.
- En referencia a los taludes interiores se evidenciaron cambios menores característicos y comunes en este tipo de lagunas.
- Las condiciones de nubosidad no permitieron la visualización de la pared de roca en el nevado Salkantay.

6. Recomendaciones

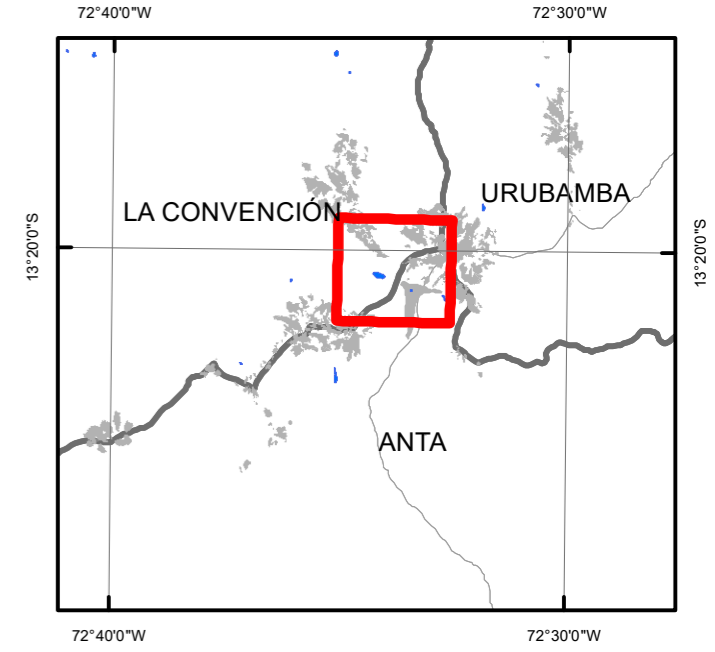
- Monitorear el comportamiento de los niveles de la laguna Salkantaycocha finalizando la estación húmeda.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.
- Evitar el acercamiento de personas a la zona de depósito de escombros, por tratarse de una zona inestable.




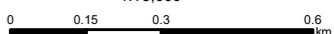
UBICACIÓN POLÍTICA



PROVINCIAS



Distritos: Santa Teresa
 Provincias: La Convención
 Departamento: Cusco

 INAIGEM <small>INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA</small>		
LAGUNA SALKANTAYCOCHA		
Elaborado por: O. Vilca	Coordenadas: Proyección UTM Datum WGS84 - Zona 18S	Fecha : Julio, 2020
Fuente: Elaboración propia	Escala: 1:15,000 	

Informe de Inspección 05
Mayo 2021

LAGUNA SALKANTAYCOCHA



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA



Firmado digitalmente por VILCA
GOMEZ Oscar Dante FAU
20600404262 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 25.05.2021 10:45:04 -05:00

Informe de Inspección 05
Laguna Salkantaycocha

Ing. Oscar Vilca Gómez
Especialista en Hidrología y Glaciología

Ing. Victor Bustinza Urviola
Jefe de la Oficina Desconcentrada

Cusco, 25 de mayo del 2021

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

Informe de la situación actual de la laguna Salkantaycocha

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, realizan estudios para la 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 sub cuencas de origen glaciar.

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

Por ello, se realizó **la inspección in situ el día 20 de mayo del 2021**, en cumplimiento a las recomendaciones citadas en el informe técnico A01 emitido por el INAIGEM, que a la letra dice:

- Monitorear el comportamiento de los niveles de la laguna Salkantaycocha.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.

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 del 2020, 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 del 2020, 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 del 2020, personal del INAIGEM realiza una visita de inspección a la laguna Salkantaycocha.

El 10 de julio del 2020, se presentó y sustentó ante el COER Cusco, el Informe técnico N°A01 Laguna Salkantaycocha.

El 09 de octubre del 2020, personal especialista del INAIGEM realiza la visita de inspección a Salkantaycocha.

El 26 de enero del 2021, personal especialista del INAIGEM realiza la visita de inspección a Salkantaycocha con las apreciaciones mencionadas 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 Anexo **Mapa**.

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 zona 18L son:

763 307 Este y 8 523 695 Norte

3.2. Objetivos

- Monitorear el comportamiento del nivel de espejo de la laguna Salkantaycocha.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.

4. Descripción

4.1. Situación de la laguna Salkantaycocha

La situación de la laguna Salkantaycocha observada el día 20 de mayo, en comparación a las inspecciones realizadas los días 25 de febrero, 08 de julio, 09 de octubre del 2020 y del 26 de enero del 2021 (**Figura 01**), nos muestran los siguiente:

- Los taludes interiores del vaso no muestran evidencia de cambios significativos (**Figura 02**).

- El nivel de espejo de agua de Salkantaycocha se encuentra visiblemente por debajo del nivel observado en la inspección de enero del presente año. Esto nos indica la capacidad receptora del vaso en función del aporte de agua que recibe estacionalmente.

- La zona posterior no muestra cambios significativos con relación a lo reportado en la última inspección.



Figura 01. Comparativa de fotografías capturadas en las diferentes inspecciones realizadas a la laguna Salkantaycocha, en la que se evidencia la fluctuación del nivel de espejo de agua.



Figura 02. Laguna Salkantaycocha el día 20 de mayo del 2021

El sector de la zona de arranque se muestra con cambios en la coloración de la superficie de roca, lo cual indicaría el proceso de oxidación de los minerales existentes. No se visualizan cambios significativos.



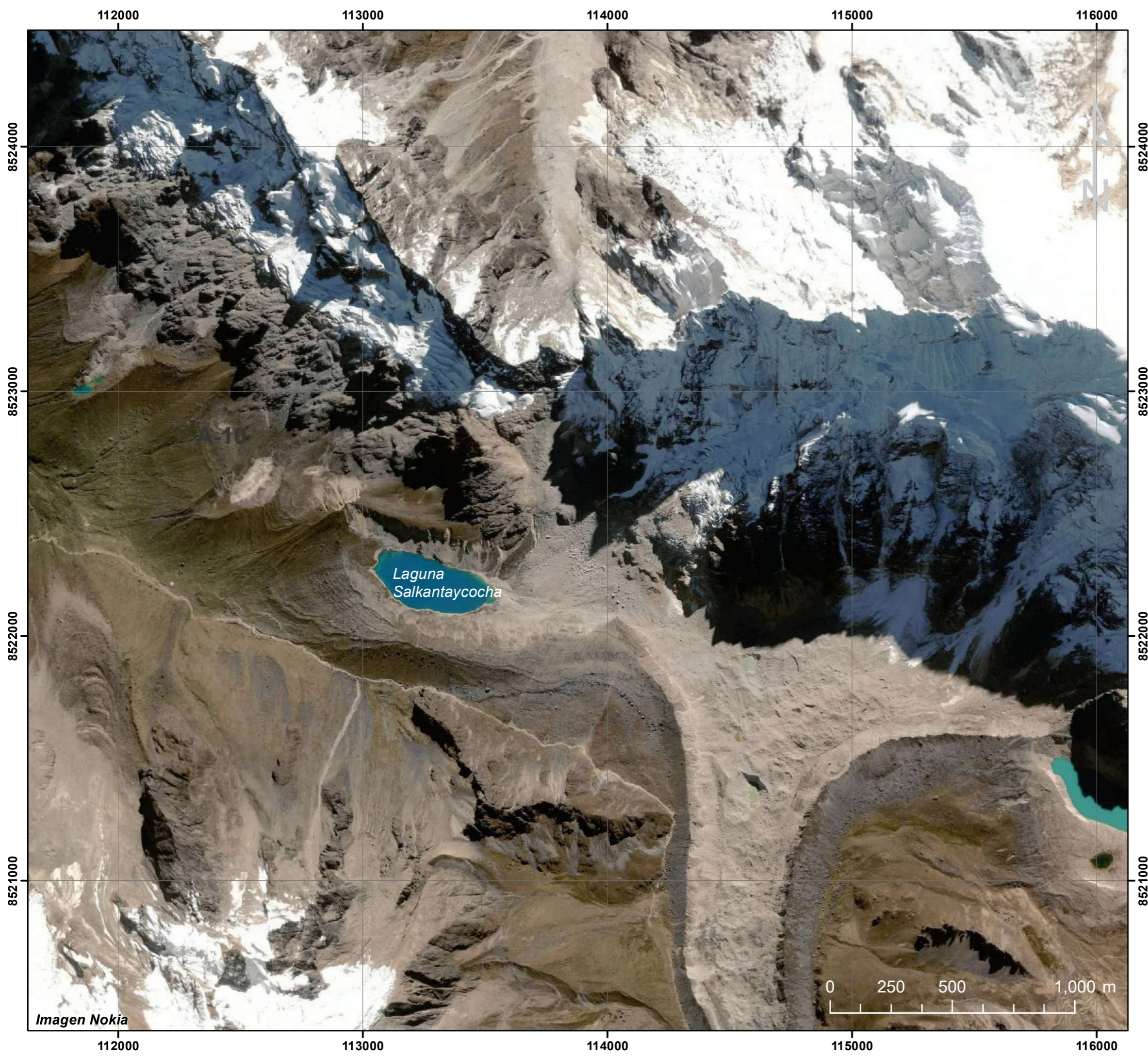
Figura 03. Zona de arranque

5. Conclusiones

- La situación de la laguna Salkantaycocha acorde a la inspección ocular realizada el 20 de mayo del 2021, es de una laguna con una disminución significativa del nivel de espejo de agua en comparación a la inspección realizada en enero del 2021.
- El cambio en los niveles de espejo de agua obedece principalmente a los aportes propios del ciclo estacional de las precipitaciones.
- En referencia a los taludes interiores no se evidencian cambios significativos.
- La zona de arranque en la pared de roca del nevado Salkantay muestra cambios en la coloración de la superficie de roca probablemente producto del proceso de oxidación de los minerales existentes, además se evidencia escasa presencia de cobertura de nieve.

6. Recomendaciones

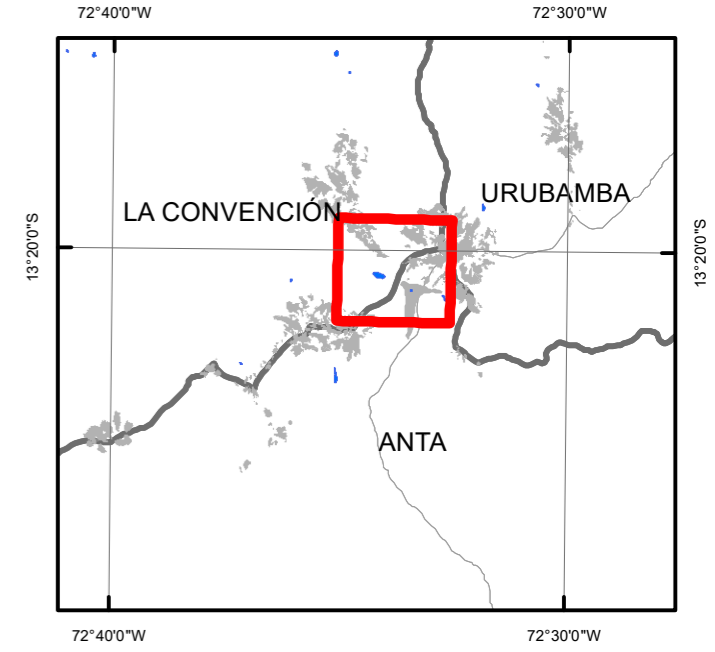
- Continuar con el monitoreo del comportamiento de los niveles de la laguna Salkantaycocha en los meses más secos (Julio – Agosto).
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.
- El día de la visita de inspección se observó la presencia de grupos de personas, turistas y guías en la zona posterior de la laguna y cercana a la zona de mayor impacto de la última avalancha. En la actualidad es probable el desprendimiento de bloques reducidos de roca que significaría una amenaza para la vida de las personas. Por ello, se debe evitar el acercamiento de personas a la zona de depósito de escombros por tratarse de una zona inestable y de muy alto riesgo.



UBICACIÓN POLÍTICA



PROVINCIAS



Distritos: Santa Teresa
 Provincias: La Convención
 Departamento: Cusco

LAGUNA SALKANTAYCOCHA		
Elaborado por: O. Vilca	Coordenadas: Proyección UTM Datum WGS84 - Zona 18S	Fecha : Julio, 2020
Fuente: Elaboración propia	Escala: 1:15,000 	

Informe de Inspección 06
Septiembre 2021

LAGUNA SALKANTAYCOCHA



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe de Inspección 06
Laguna Salkantaycocha

Ing. Oscar Vilca Gómez
Especialista en Hidrología y Glaciología

Ing. Victor Bustinza Urviola
Jefe de la Oficina Desconcentrada

Cusco, 01 de septiembre del 2021

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



Firmado digitalmente por VILCA
GOMEZ Oscar Dante FAU
20600404262 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 08.09.2021 08:03:47 -05:00

Informe de la situación actual de la laguna Salkantaycocha

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, realizan estudios para la 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 sub cuencas de origen glaciar.

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

Por ello, se realizó **la inspección in situ el día 01 de septiembre del 2021**, en cumplimiento a las recomendaciones citadas en el informe técnico A01 emitido por el INAIGEM, que a la letra dice:

- Monitorear el comportamiento de los niveles de la laguna Salkantaycocha.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.

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.

- 25 de febrero del 2020, un especialista del INAIGEM se constituye a la laguna Salkantaycocha emitiendo un primer informe de los sucesos.
- 28 de febrero al 02 de marzo del 2020, 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.
- 08 de julio del 2020, visita de inspección.
- 10 de julio del 2020, se presentó y sustentó ante el COER Cusco, el Informe técnico N°A01 Laguna Salkantaycocha.
- 09 de octubre del 2020, visita de inspección.
- 26 de enero del 2021, visita de inspección.
- 20 de mayo del 2021, visita de inspección.
- 01 de septiembre del 2021, visita de inspección.

3. Aspectos Generales

3.1. Ubicación

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

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 zona 18L son:

763 307 Este y 8 523 695 Norte

3.2. Objetivos

- Monitorear el comportamiento del nivel de espejo de la laguna Salkantaycocha.
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.

4. Descripción

4.1. Situación de la laguna Salkantaycocha

La situación de la laguna Salkantaycocha observada el día 1 de septiembre, en comparación a las inspecciones realizadas en fechas anteriores (**Figura 01**), nos muestran lo siguiente:

- No presenta espejo de agua, en su lugar se observan los sedimentos que lucen expuestos, entre ellos charcos reducidos que nos dan una idea del nivel freático alcanzado al finalizar la temporada seca.

- Los taludes interiores del vaso no muestran evidencia de cambios significativos, sin embargo se observa procesos lentos de erosión que a su vez incrementan sedimentos al vaso lagunar (**Figura 02**).

- La zona posterior, compuesta principalmente por detritos y arena, muestra la formación de cárcavas, lo que significa que el aporte de sedimentos hacia el vaso lagunar es constante, este aspecto determinará la colmatación total del vaso lagunar.



a. 25 de febrero 2020 (INAIGEM/O. Vilca)



b. 08 de julio 2020 (INAIGEM/V. Bustinza)



c. 09 de octubre 2020 (INAIGEM/O. Vilca)



d. 26 de enero del 2021 (INAIGEM/O. Vilca)

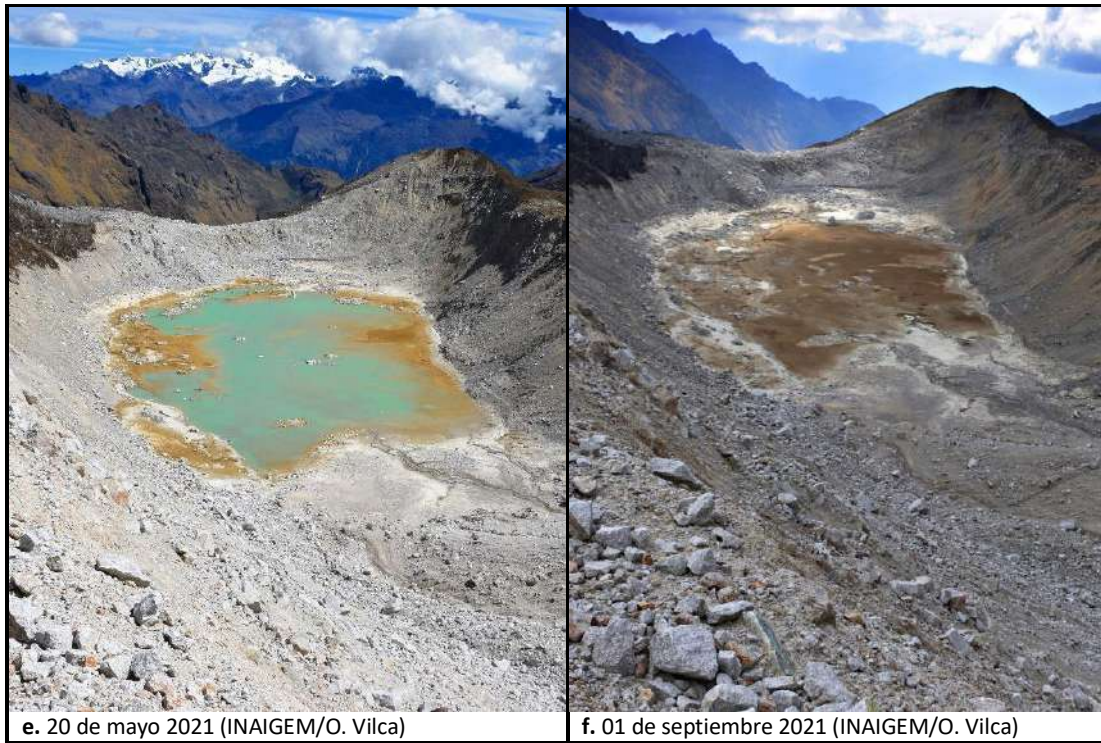


Figura 01. Comparativa de fotografías capturadas en las diferentes inspecciones realizadas a la laguna Salkantaycocha, en la que se evidencia la fluctuación del nivel de espejo de agua.



Figura 02. Laguna Salkantaycocha el día 01 de septiembre del 2021, se observa que el vaso lagunar no presenta espejo de agua, los taludes y la zona posterior con signos evidentes de actividad erosiva.

El sector de la zona de arranque de la avalancha de febrero del 2020 (**Figura 03**), se observa en su condición más expuesta (con presencia mínima de cobertura nival), de este modo se puede observar bloques de roca en forma de corniza que podrían caer, de ocurrir este escenario se descarta que este podría ocasionar otros eventos.



Figura 03. Zona de arranque el día 01 de septiembre del 2021.

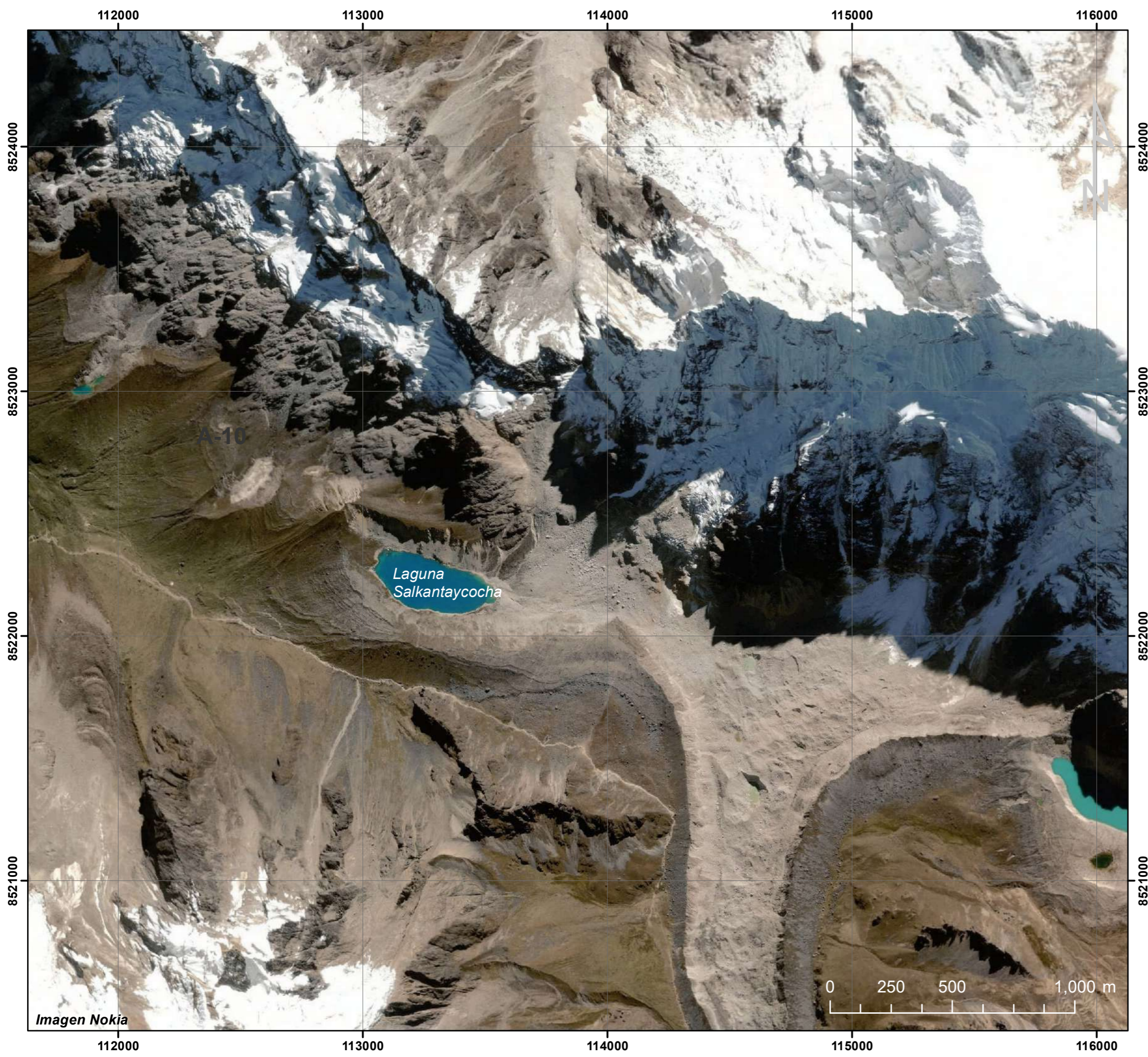
5. Conclusiones

- La situación de la laguna Salkantaycocha acorde a la inspección ocular realizada el 01 de septiembre del 2021, es de una laguna colmatada en su totalidad.
- No presenta espejo de agua, solo es posible observar charcos de agua que nos muestran el nivel freático en el vaso lagunar.
- En referencia a los taludes interiores, estos muestran alto grado de erosión en procesos lentos pero continuos.
- En la zona de arranque en la pared de roca del nevado Salkantay se observan bloques colgantes de roca en forma de cornizas, en la situación de la laguna y en el escenario de que estos cayeran no representaría peligro.

6. Recomendaciones

- Continuar con el monitoreo del comportamiento de los niveles de la laguna Salkantaycocha en los meses húmedos (Enero – Marzo).
- Monitorear mediante registro fotográfico la pared de roca expuesta producto de la avalancha.

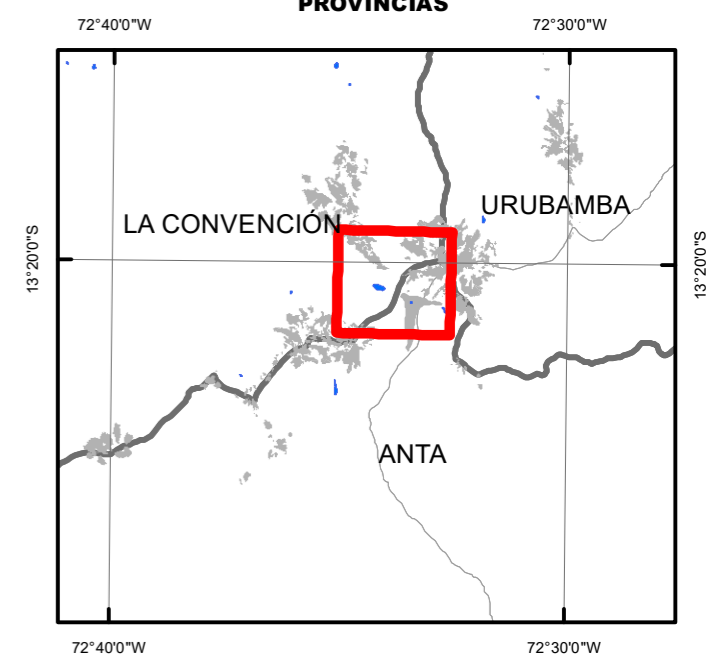
- En relación a la existencia de probabilidad de desprendimiento de bloques de rocas, es preciso advertir a las empresas de servicio turístico para que eviten el tránsito por inmediaciones de la zona posterior de Salkantaycocha, así como entre los escombros dejados en el evento de febrero del 2020.



UBICACIÓN POLÍTICA



PROVINCIAS



Distritos: Santa Teresa
 Provincias: La Convención
 Departamento: Cusco

LAGUNA SALKANTAYCOCHA		
Elaborado por: O. Vilca	Coordenadas: Proyección UTM Datum WGS84 - Zona 18S	Fecha : Julio, 2020
Fuente: Elaboración propia	Escala: 1:15,000 	



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 afectó 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 está asociado 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 constituido 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 rebasa el agua y arrastra 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 asumi3 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 consider3 un modelo de elevaci3n digital DEM de Alos Palsar y TanDEM-X 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.

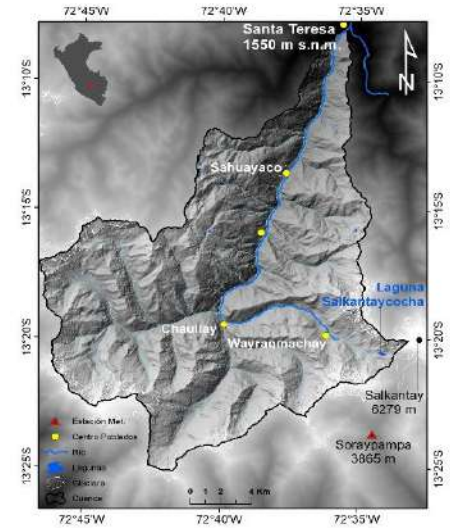
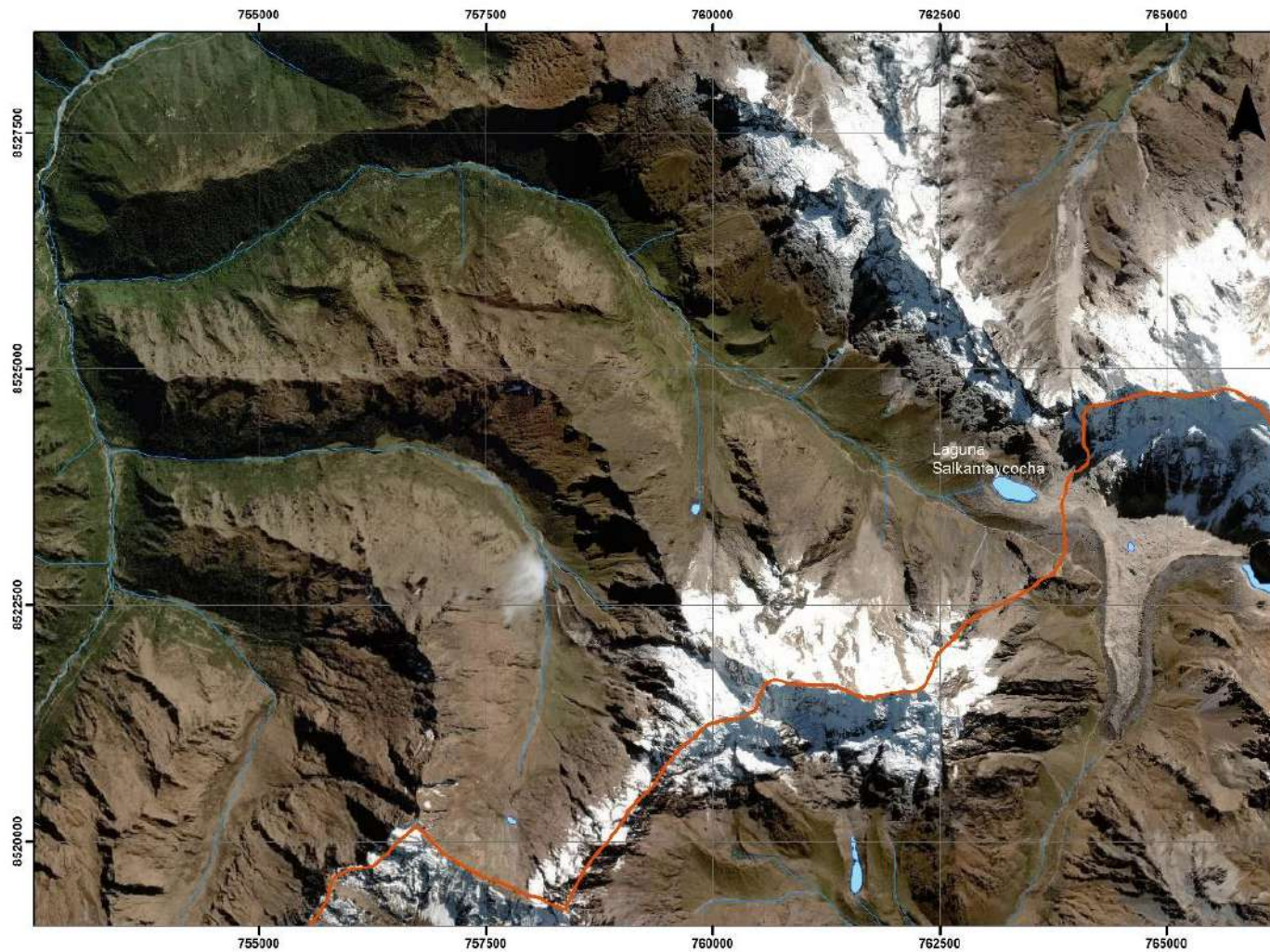
Los primeros resultados obtenidos del modelamiento de la cadena de procesos del aluvión nos indica una aproximación aceptable respecto a la huella observada en la **Figura 26**, sin embargo, los últimos registros fotográficos (ver **Figura 18**) se muestra a la laguna con el vaso colmatado casi en su 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

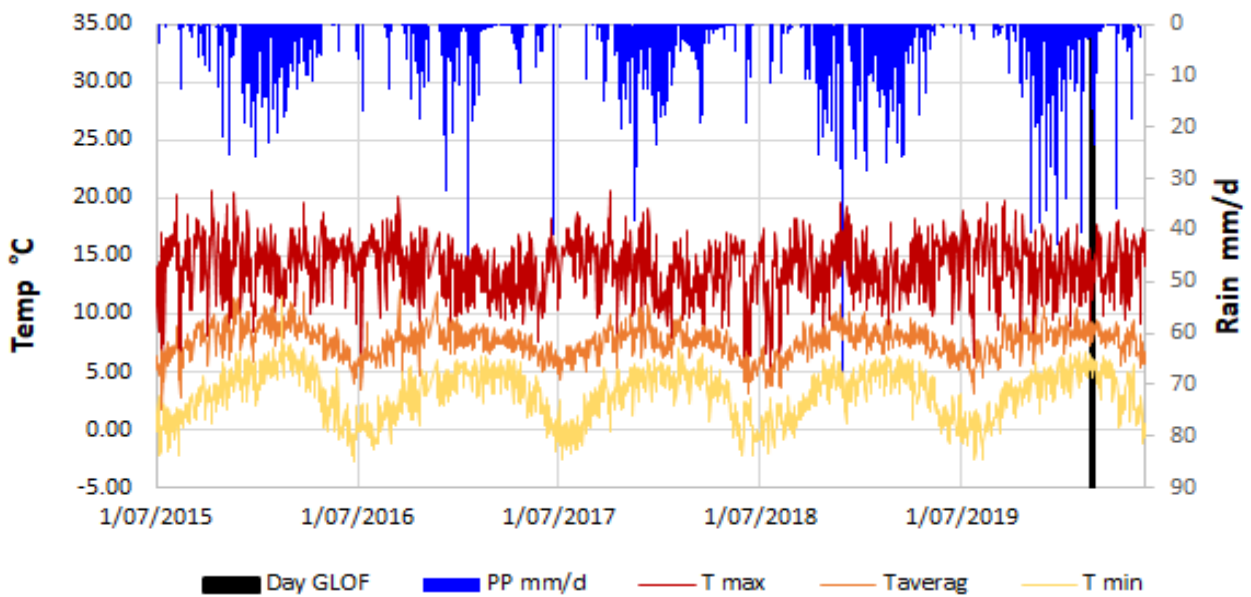
- Realizar el estudio topográfico en el vaso de la laguna Salkantaycocha.
- Realizar estudios geotécnicos a detalle, con la finalidad de determinar la estabilidad del vaso de la laguna.
- Realizar el estudio de geofísica en el dique frontal.
- Monitorear los puntos de afloramiento de agua en la zona 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.



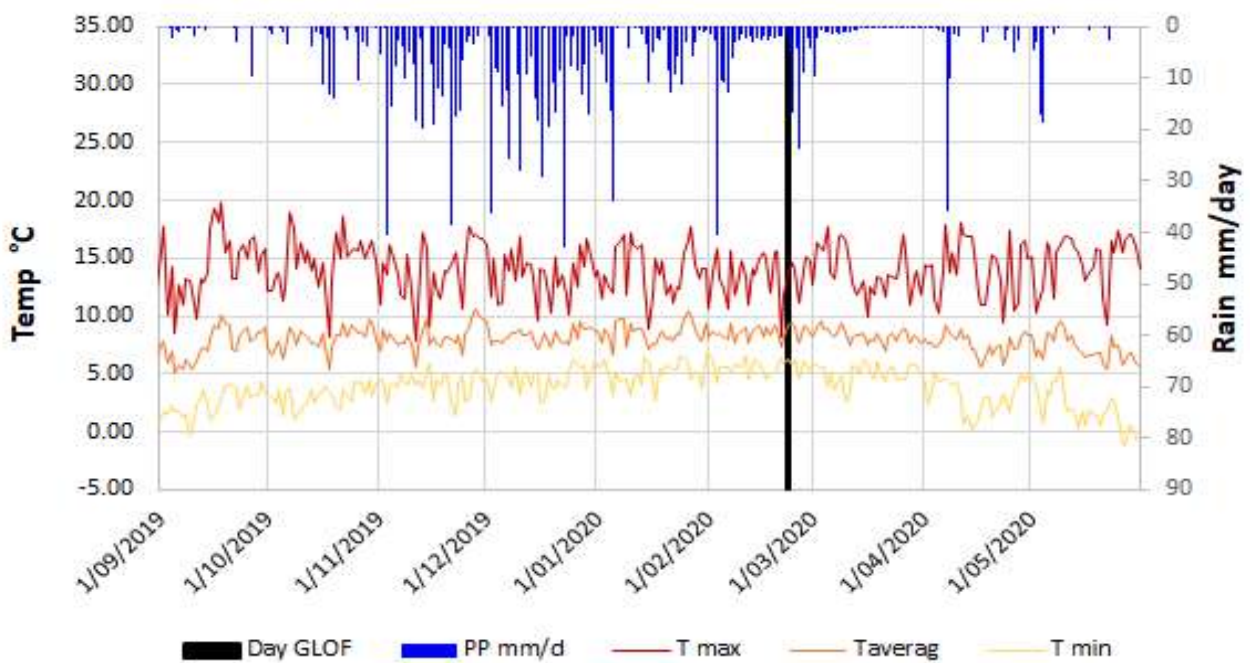
INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

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)

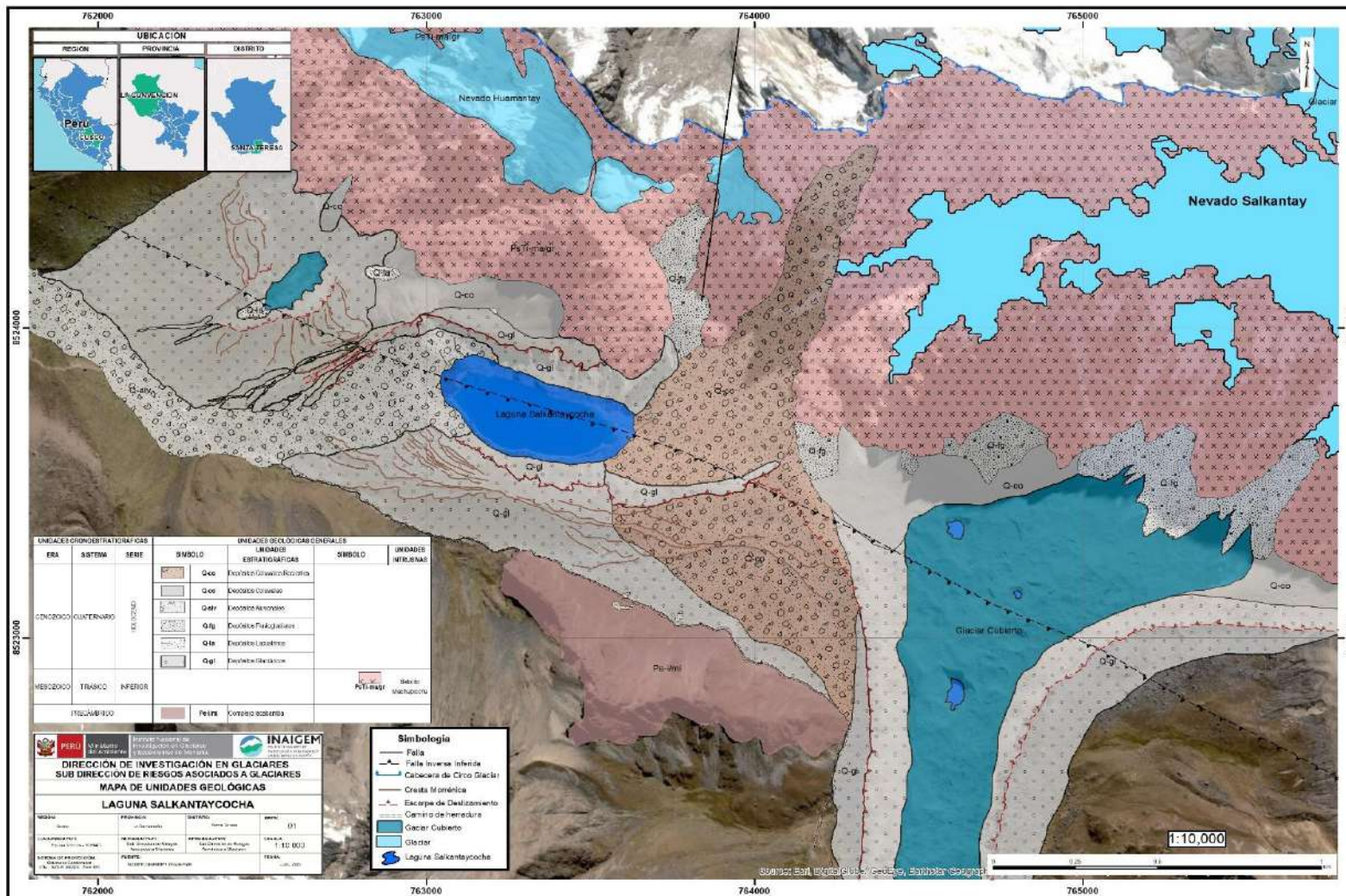
* Gráficos elaboración propia



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



INAI GEM
 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*



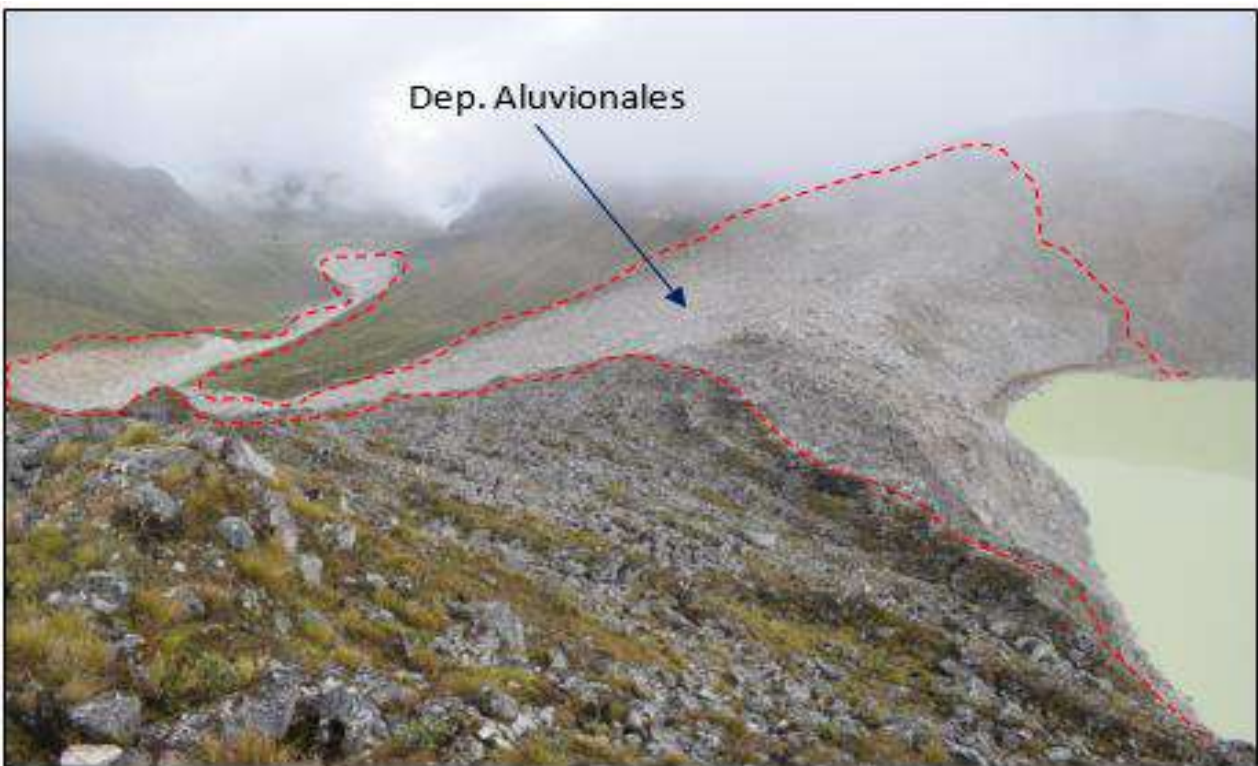
INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

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

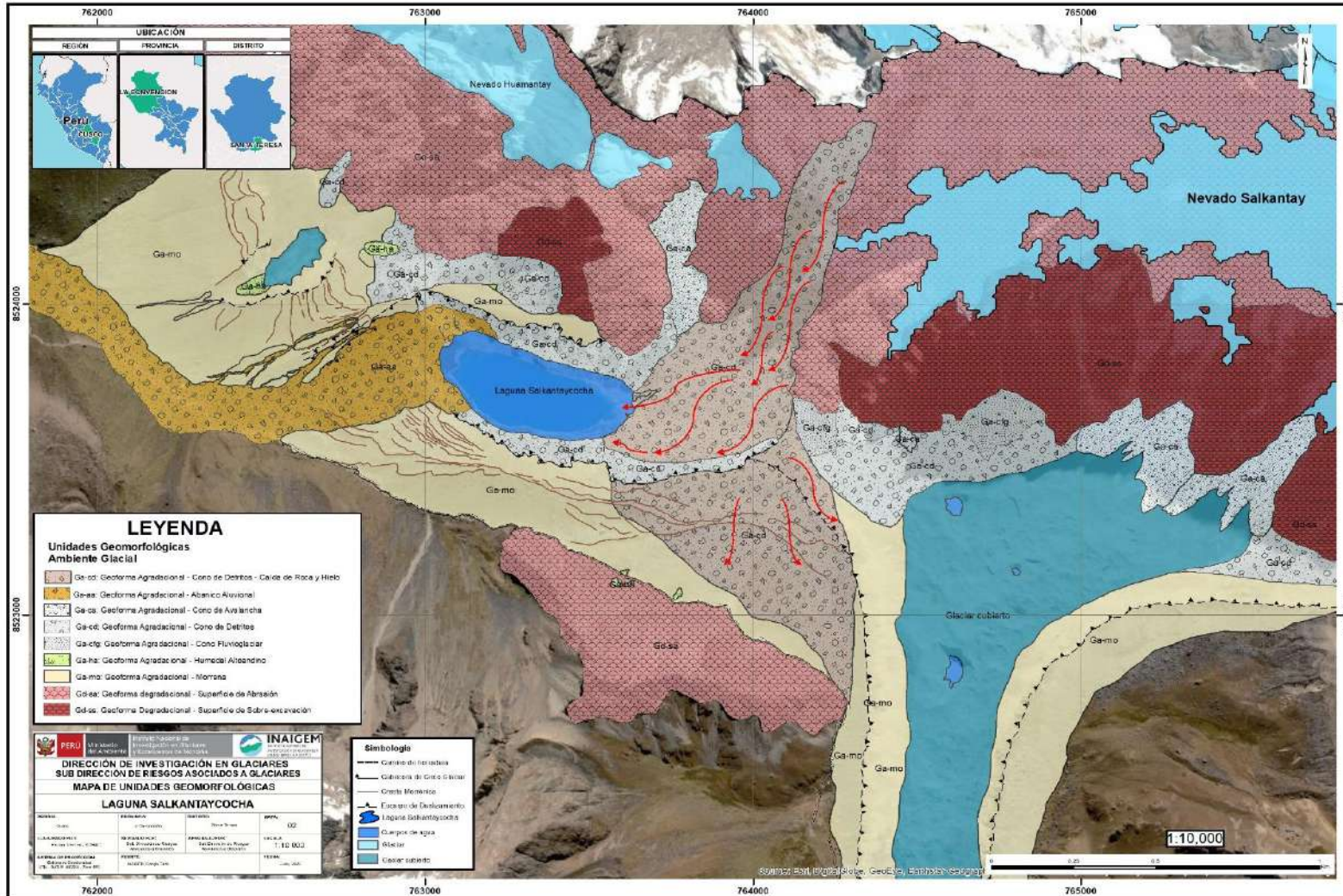
* *Elaboración propia*



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 9
Geología



* Elaboración propia



INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha
Figura 10

Mapa de Unidades Geomorfológicas en el entorno de la laguna Salkantaycocha



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

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

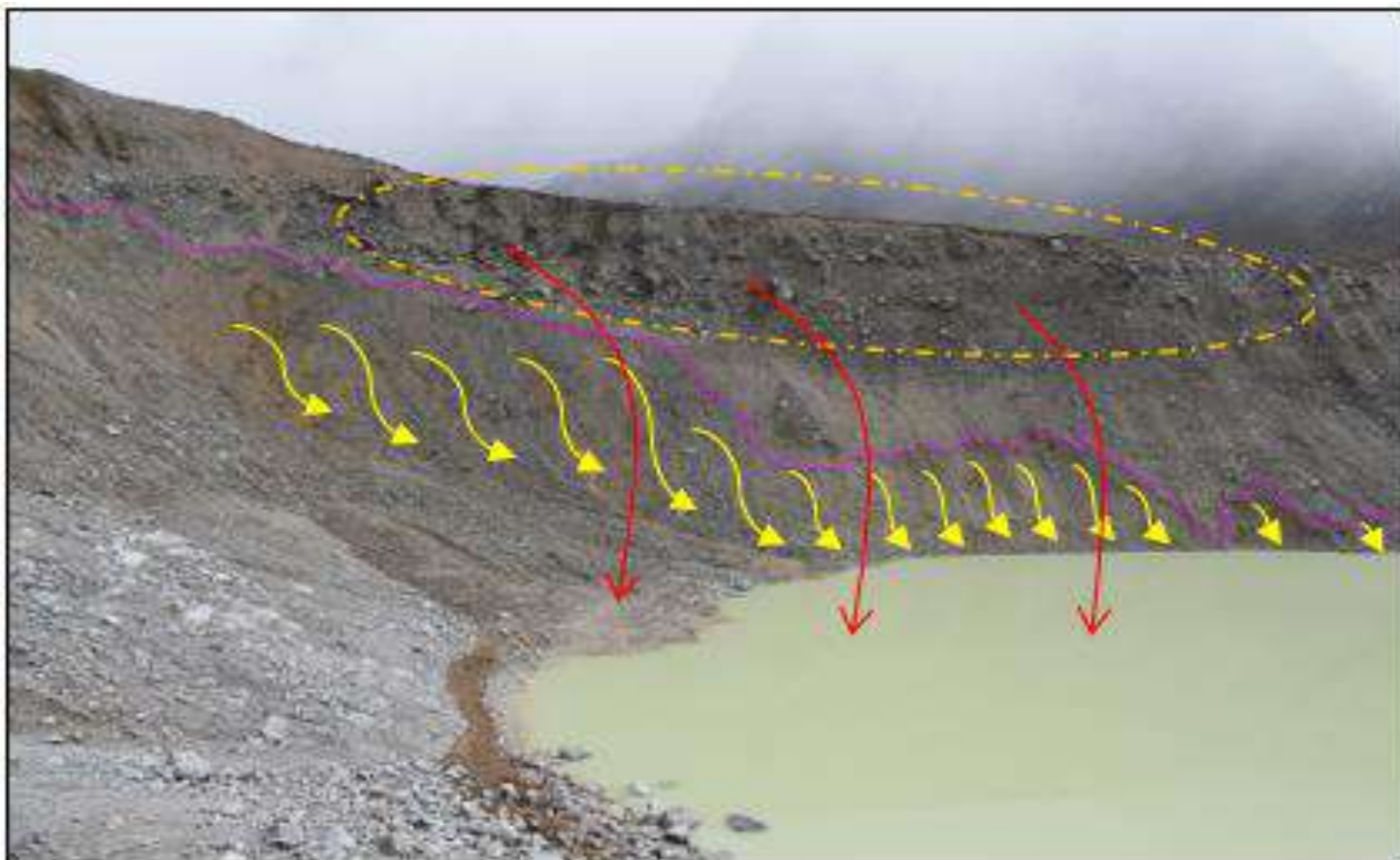


INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

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 detrítico



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



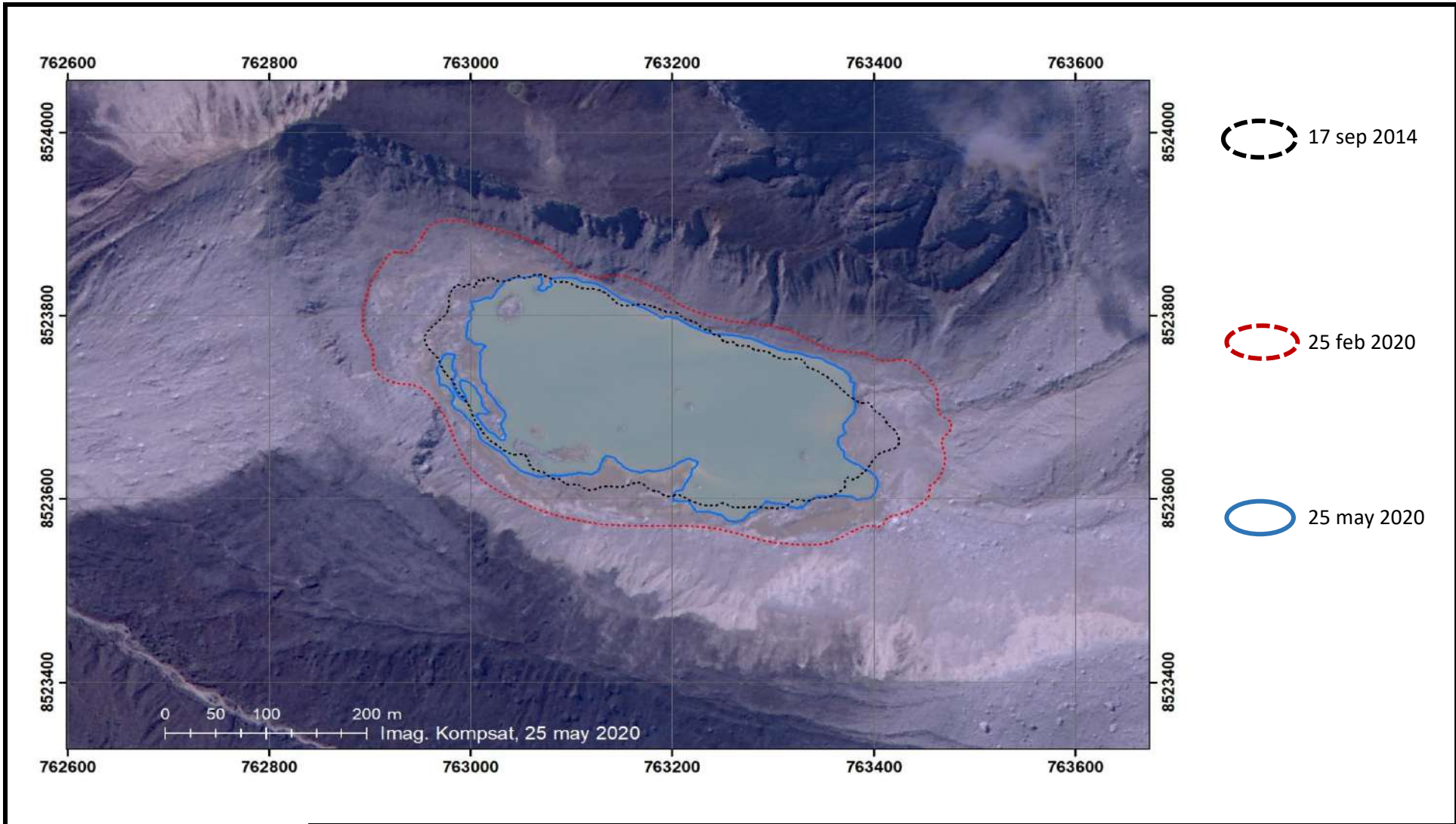
15. Superficies de sobre excavación, parte baja del nevado Salkantayo (Úbeda, J. 2014)



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 15
Geomorfología



* *Elaboración propia*



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha
Figura 16
Evolución de la superficie de la laguna Salkantaycocha



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

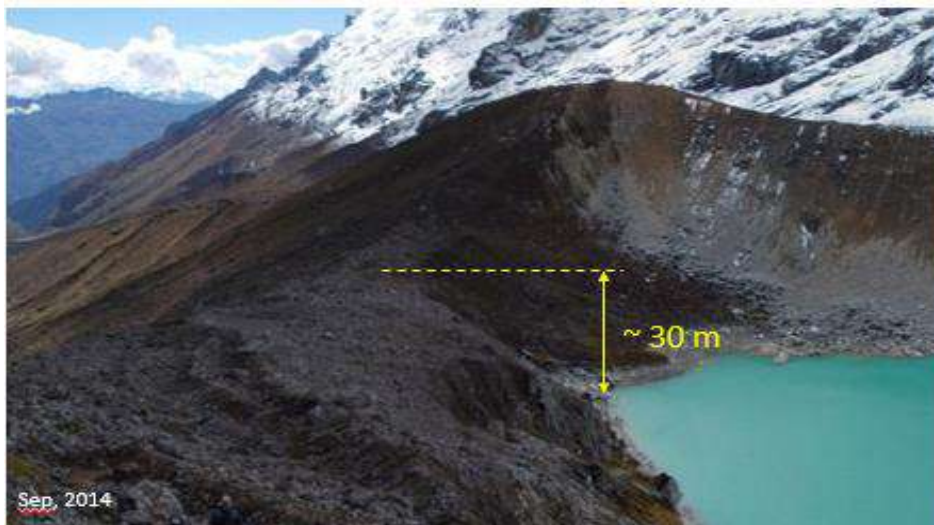


Foto: Bustinza, V. (08 Julio 2020)



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

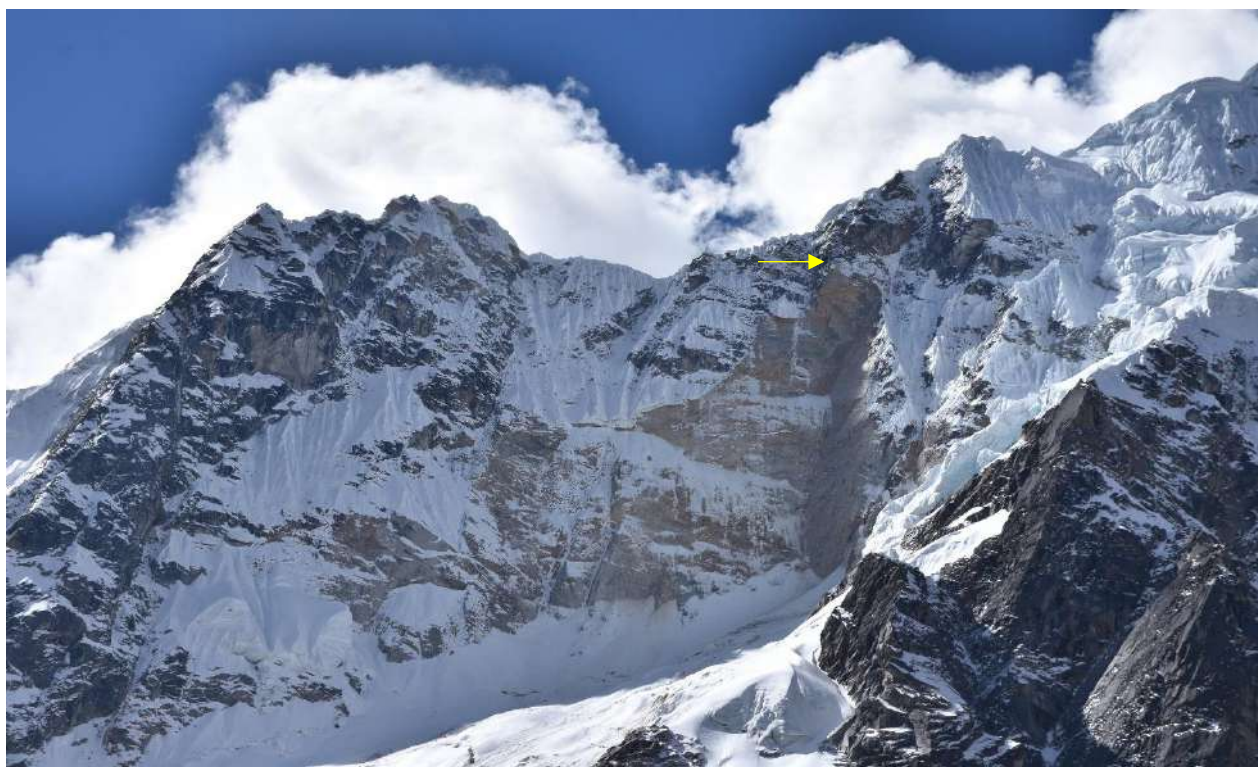
Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

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)



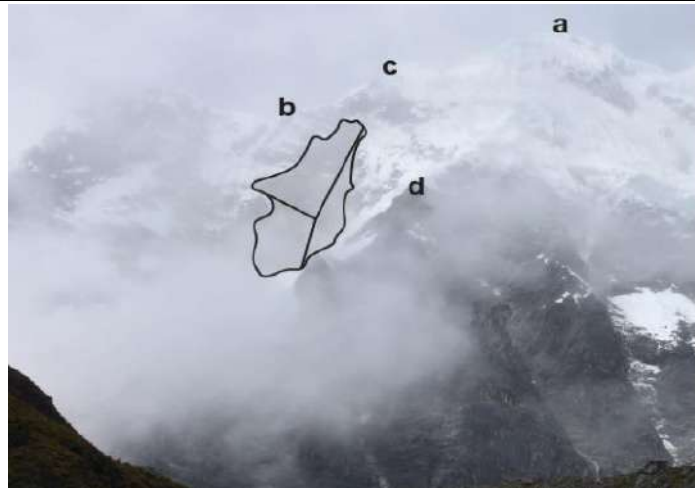
b) Zona de arranque y potencial de riesgo de desprendimientos futuros (Foto: Bustinza, V. 08 julio 2020)



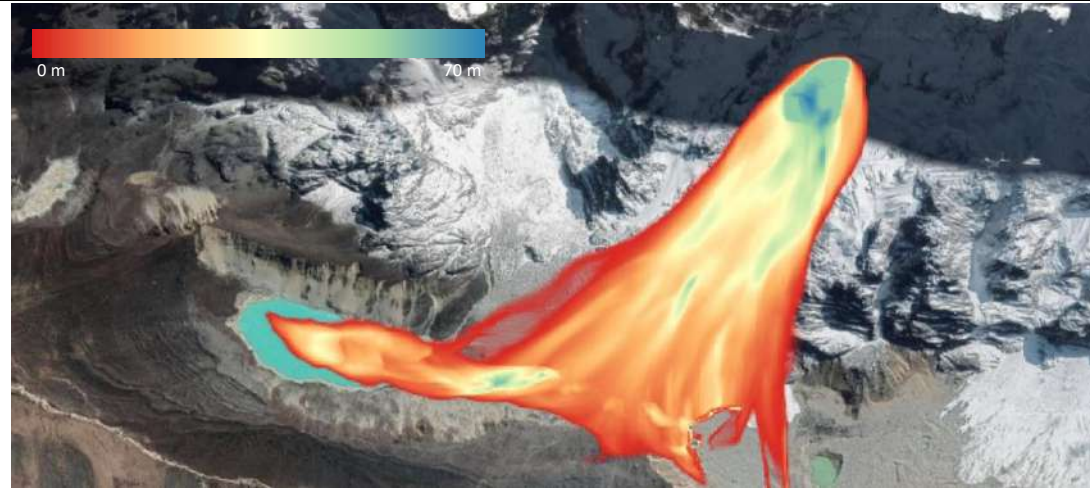
INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 20
Zona de arranque

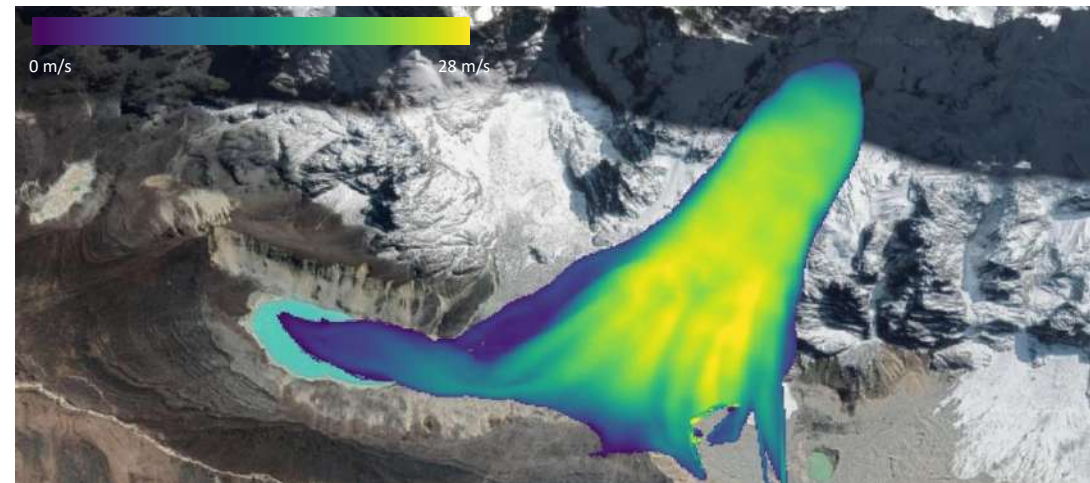


Modelamiento de avalancha de roca



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

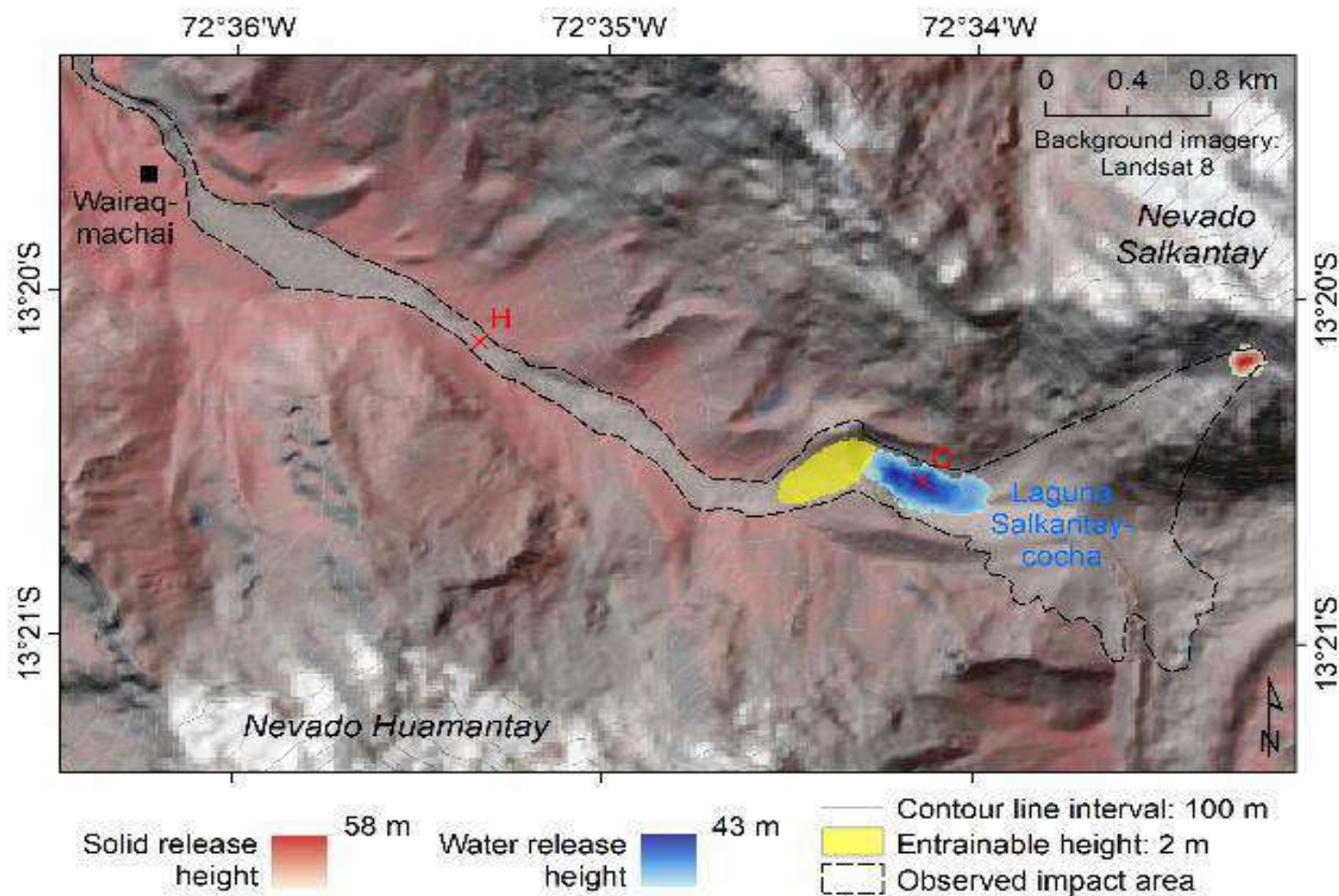
Velocidades alcanzadas en el trayecto de la avalancha, la máxima velocidad se produce en la zona de la rampa de hielo y cuando se precipita después.



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

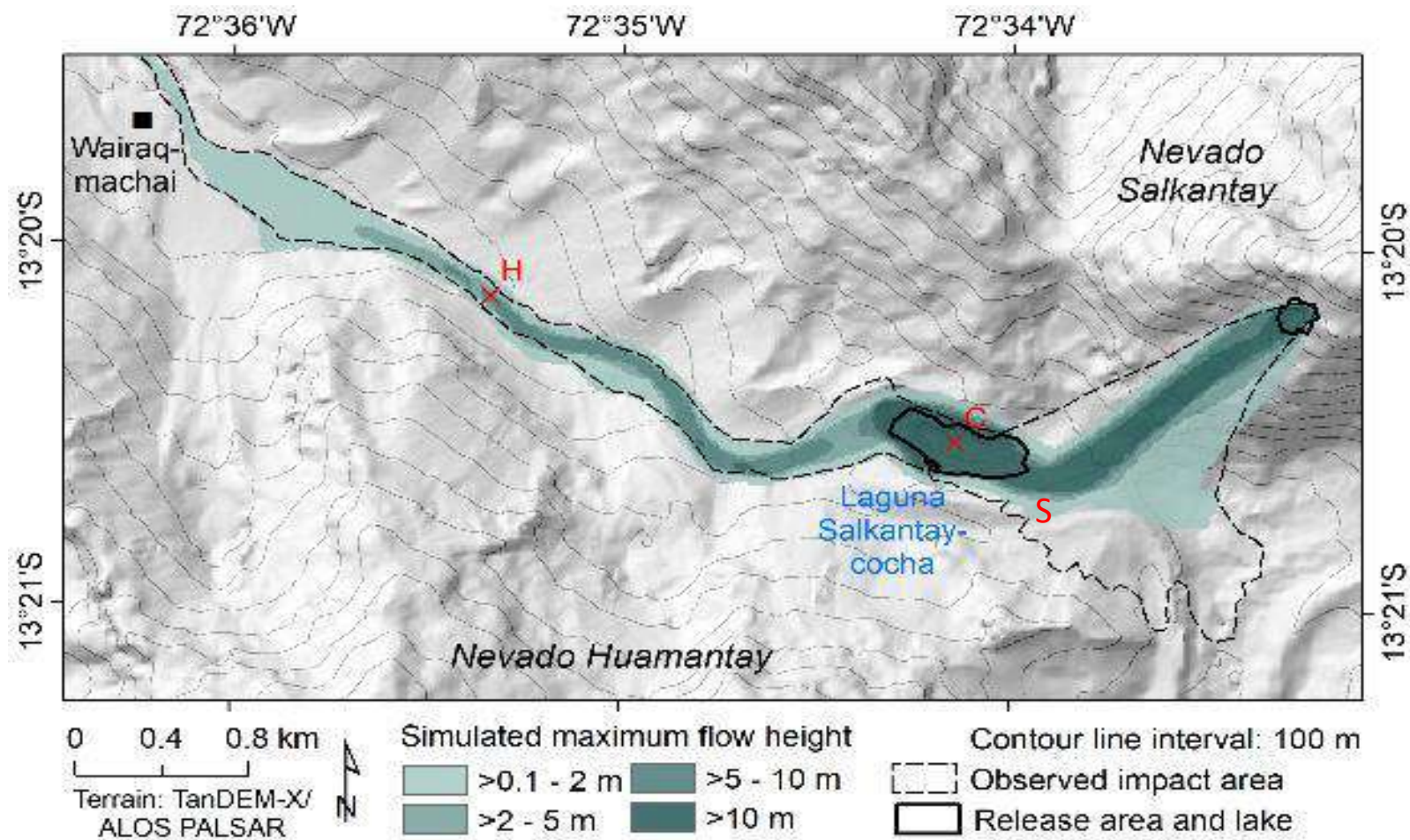


INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 22

Modelamiento de la cadena de procesos

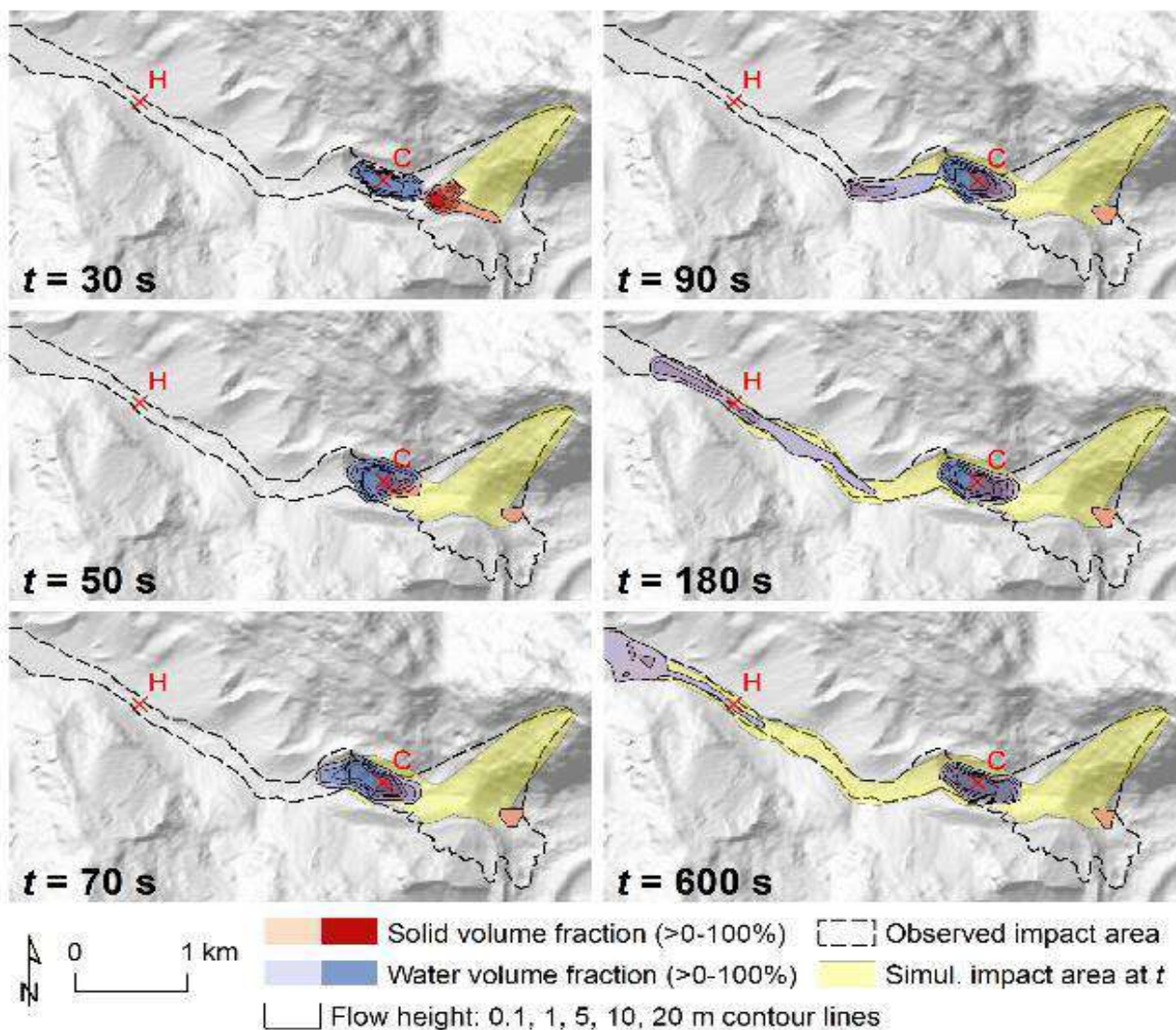


INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 23

Modelamiento de la cadena de procesos



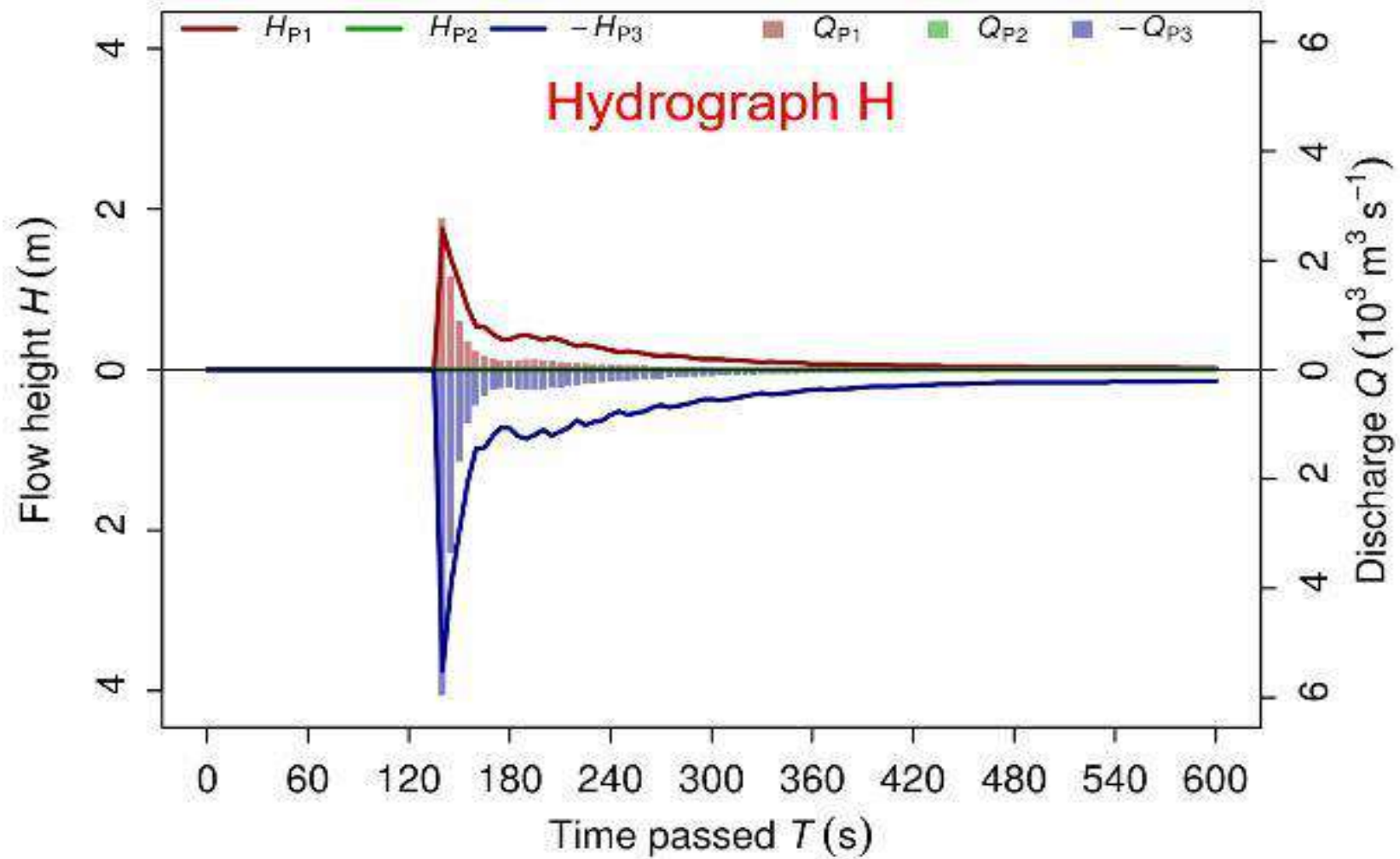
* *Elaboración propia*



INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 24
 Modelamiento de la cadena de procesos

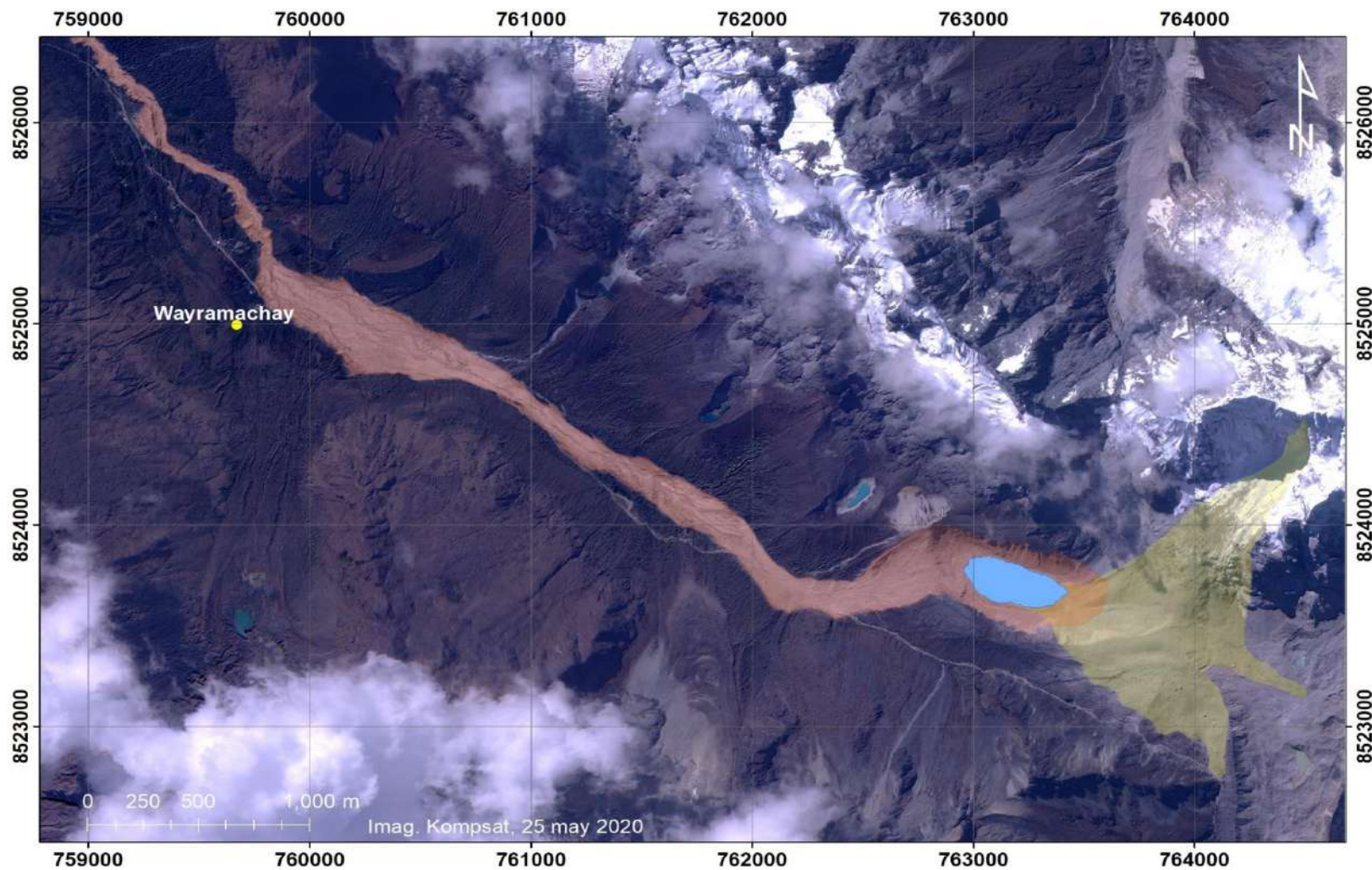


INAIGEM
 INSTITUTO NACIONAL DE
 INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
 ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Informe técnico de la situación de la laguna Salkantaycocha

Figura 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