

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Evolución del Balance de Masas y Retroceso Glaciar en el Nevado Artesonraju (Cordillera Blanca, Perú)

UPV/EHU: Universidad del País Vasco



UNAI GANCEDO ALONSO

Grado de Geografía y Ordenación del Territorio, 4º Curso

Tutor: Ramón Pellitero Ondicol

Departamento: Geografía, Prehistoria y Arqueología

Área: Geografía Física



LETREN
FAKULTATEA
FACULTAD
DE LETRAS



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
Resumen.....	2
1.1 Presentación del trabajo	2
1.2 Explicación de conceptos	4
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Localización Geográfica	7
1.5 Características Climáticas	9
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1 Materiales.....	16
2.2 Identificación de la superficie glaciar actual (2014).....	17
2.3 Clasificación por altitudes de la superficie del glaciar (2014)	17
2.4 Evolución y cálculo de las superficies anuales (2004-2014).....	19
2.5 Cálculo las ELAs anuales	19
2.6 Cálculo del balance de masa anual.....	21
3. RESULTADOS	24
3.1 Identificación de la superficie glaciar actual (2014).....	25
3.2 Evolución y cálculo de las superficies anuales (2004-2014).....	26
3.3 Cálculo de las ELAs anuales	27
3.4 Cálculo del balance de masa anual.....	29
4. CAMBIO CLIMÁTICO Y GESTIÓN DEL AGUA	32
4.1 Cambio climático	33
4.2 Riesgos asociados a la desglaciación	33
4.3 Gestión de los recursos hídricos.....	34
4.4 Pronóstico y posibles líneas de actuación	36
5. CONCLUSIONES	38
6. BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	44
ANEXO 1. MEDICIONES RECOGIDAS DE LAS BALIZAS	45
ANEXO 2. GRÁFICOS ANUALES Y LÍNEAS DE TENDENCIA	48
ANEXO 3. CÁLCULOS DE BALANCE DE MASA ANUALES.....	52

1. INTRODUCCIÓN

Resumen

Los glaciares tropicales son considerados como los perfectos indicadores a la hora de medir los efectos del calentamiento global, ya que cualquier variación del clima incide en ellos, de manera más rápida que en glaciares de diferentes latitudes. En este trabajo abordaremos el análisis de un glaciar perteneciente al Nevado Artesonraju, un pico ubicado en la Cordillera Blanca, en los Andes peruanos. Mediante este análisis se pretende evaluar la pérdida de masa glaciar en este punto durante los últimos años, concretamente durante el periodo entre 2004-2014. Recogiendo los resultados que nos arroje el cálculo del balance de masas del glaciar, analizaremos su posible retroceso, asociando estas pérdidas glaciares con el fenómeno del cambio climático, y evaluaremos de manera sintética las consecuencias medioambientales, económicas y sociales que conlleva esta pérdida.

Palabras clave: Calentamiento global, glaciares tropicales, balance de masa, retroceso glaciar.

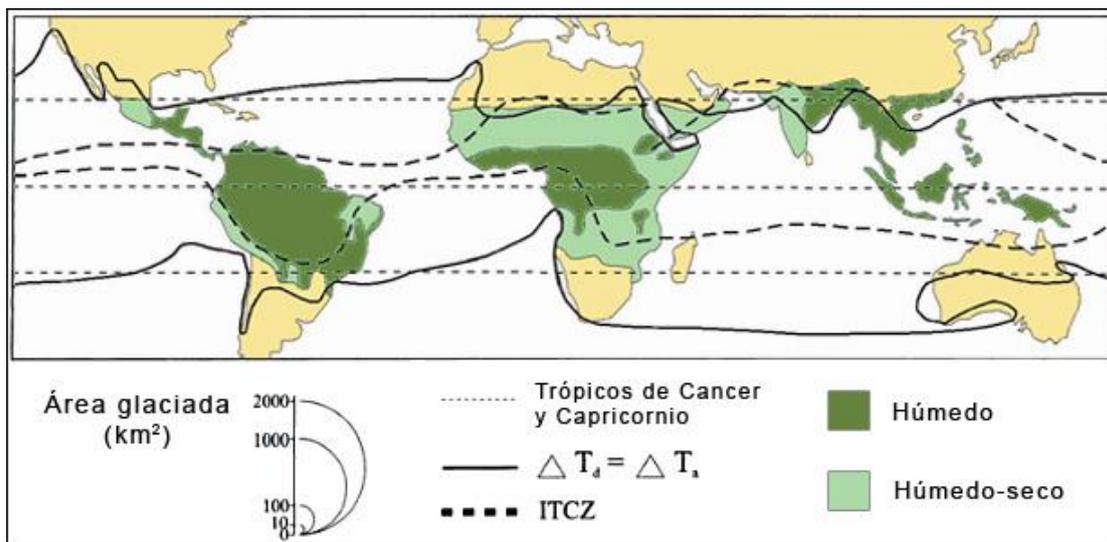
1.1 Presentación del trabajo

Los glaciares son sistemas que pueden ser considerados como indicadores clave para la interpretación del cambio climático, ya que el estudio de las masas de hielo que los conforman es un indicador muy revelador de los posibles cambios de clima en una zona geográfica concreta (Francou B. et. Al., 2008).

Debido a su latitud, el glaciar Artesonraju pertenece al grupo de glaciares tropicales, situados entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio, en una gran franja alrededor del Ecuador. Los glaciares andinos tropicales tienen un funcionamiento distinto al de otros glaciares de montaña de latitudes medias. En las latitudes medias, debido a la marcada estacionalidad, los glaciares tienen fijados los ciclos de crecimiento durante los meses de invierno, y de pérdida de masa durante los meses estivales. En los glaciares tropicales, en cambio, debido a la ausencia de estacionalidad en esta latitud, los glaciares poseen un ciclo mucho más corto, en el que el crecimiento se produce mediante nevadas en cualquier momento del año, y la pérdida de masa depende de las diferencias de temperatura entre la noche y las horas diurnas. De este modo, el estudio del comportamiento del glaciar se antoja más complejo e impredecible (Kaser y Osmaston, 2002).

De manera más localizada, la Cordillera Blanca se ve afectada por otros factores climáticos que influyen en sus ciclos de crecimiento y pérdida. Al ejercer de separación de dos ámbitos geográficos y climáticos totalmente diferentes, sus dos vertientes poseen unas características de temperatura y de precipitación totalmente distintas, de manera que en la vertiente oriental (amazónica) se registran mayores niveles de precipitación y de temperatura media, mientras que la vertiente occidental (pacífica) es algo más seca y con temperaturas menores (Martín, 2014).

Figura 1. Zona de Convergencia Intertropical



Fuente: Delimitación desde un punto de vista glaciológico de los trópicos y sus glaciares (Kaser and Osmaston, 2002). ITCZ: Zona de Convergencia Intertropical; ΔT_d : variación de la temperatura diaria; ΔT_a : variación de la temperatura anual.

A la hora de analizar los efectos del cambio climático, estos glaciares son de gran ayuda puesto que son extremadamente sensibles a las variaciones del clima, por lo que constituyen un indicador excelente a la hora de medir y evaluar el alcance de estos efectos. Esto se debe a que cualquier variación del clima se manifiesta rápidamente en la masa de hielo del glaciar, es decir, en su balance de masa¹.

Este proceso de pérdida de masa que los glaciares están experimentando desde el final de la Pequeña Edad de Hielo², y que se ha visto acentuado desde 1980 hasta nuestros días,

¹ Relación entre su área de acumulación y su área de ablación o pérdida.

² La Pequeña Edad de Hielo fue un período frío que abarcó desde comienzos del siglo XIV hasta mediados del XIX, poniendo fin a una era extraordinariamente calurosa llamada óptimo climático medieval (siglo X al XIV). Hubo tres máximos o picos de temperaturas más frías: sobre 1650, alrededor de 1770 y hacia 1850. Esta etapa supuso el último gran avance de los glaciares.

además de la importante degradación ambiental y paisajística que supone, tiene también otro tipo de consecuencias en otros ámbitos.

En el ámbito económico y de sustento, los glaciares actúan como depósitos de agua dulce muy importantes para el ecosistema en el que están ubicados, así como abastecimiento de la población de los alrededores. La recesión glaciaria significa un cambio a gran escala que conlleva profundas consecuencias locales en lo que se refiere a los recursos hídricos y a las poblaciones que depende de ellos para su sustento (Mark, 2008).

Además, suponen una reserva hídrica de carácter estratégico para el abastecimiento de agua, de especial importancia en las áreas donde los recursos hídricos escasean. Otro de los factores a tener en cuenta tiene que ver con el desahue acelerado de las lagunas glaciares, ya que puede constituir un serio riesgo de inundación para las poblaciones cercanas y sus actividades económicas (Kaser y Osmaston, 2002).

1.2 Explicación de conceptos

En este punto explicaremos algunos conceptos y palabras clave, que servirán de ayuda para la adecuada comprensión del trabajo.

- **Glaciar:** “Masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes; la topografía del lecho de roca es el factor que ejerce mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie. Un glaciar subsiste merced a la acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o la descarga en el mar”. (Panel Intergubernamental del Cambio Climático IPCC, 2007).
- **Balance de masa:** El balance de masa en un glaciar corresponde a la ganancia y pérdida de nieve y hielo en el mismo, y normalmente se mide por su equivalente en agua (cantidad de agua resultante de la fusión) (Gutiérrez Elorza, 2001). El cálculo del balance de masas se realiza mediante el sumatorio entre la acumulación y la ablación glaciaria, en una unidad espacial de referencia y durante un periodo concreto, normalmente durante un año.

- **Zona de acumulación:** Hace referencia al lugar del glaciar donde se dan procesos por los que se añade material al mismo, esencialmente gracias a las precipitaciones sólidas recogidas en su superficie. La acumulación comprende también los aportes de la escarcha, del desplazamiento de la nieve por el viento, de las avalanchas y de las coladas proviniendo de las paredes empinadas. La zona de acumulación de un glaciar es la región donde el depósito resiste a la ablación, durante un año. La extensión de la zona de acumulación de un glaciar varía de un año a otro con el balance de masa (Francou B. Vincent C., 2007).
- **Zona de ablación:** Se refiere al área del glaciar donde se dan procesos por los que este pierde parte de su masa. El principal es la fusión, que está influenciada por la radiación solar, lluvia, temperatura del aire, cubierta de nubes, cantidad de detritos, etc. (Sharp, 1988). Una parte de la ablación, limitada en cantidad, proviene del calor del suelo (flujo geotérmico) y de los esfuerzos mecánicos debidos a las deformaciones sufridas por el hielo. La zona de ablación, donde la ablación supera la acumulación durante el año, forma la parte baja del glaciar. Esta zona puede variar de un año a otro.
- **Línea de Equilibrio Glaciar (ELA):** Es la línea fronteriza que separa la zona de acumulación de la zona de ablación en la superficie de un glaciar. Esta línea representa, por tanto, un balance de masa anual igual a 0 mm de agua. La porción del glaciar ubicada por encima de esta línea tendrá al final del año un balance de masa positivo, mientras que la parte del glaciar ubicada por debajo de la ELA tendrá un balance de masa negativo. Atendiendo a la altitud de la ELA, podremos señalar que un glaciar ha perdido masa cuando la ELA sube en altitud, ganándole terreno a la zona de acumulación, mientras que si la altitud de la ELA disminuye (aumentando así el volumen de la zona de acumulación), será indicador de la ganancia de masa en el glaciar.
- **Morrenas:** Acumulación de material que ha sido transportado o depositado por el hielo. Este transporte de material se puede producir tanto en la superficie del hielo, en el propio hielo (endoglaciar) y bajo éste (subglaciar). El material de morrena es generalmente una masa no gradada de sedimentos, cuyo tamaño varía desde el diámetro de arcilla al de bloque, y está sujeta a modificaciones y destrucciones posteriores por la acción de las aguas originarias de la fusión de

hielo. Estas acumulaciones de material transportadas por la acción glaciaria, dan lugar a diferentes formas morrénicas en base a su posicionamiento respecto al lecho glaciario (morrena de fondo, lateral, central, de ablación, etc.). Las morrenas constituyen una fuente de información vital para la reconstrucción de los glaciares en épocas pasadas, ayudando a delimitar su extensión y su forma sobre el territorio.

- **Rimayas:** Grieta estrecha, larga y profunda que se puede hallar en el extremo superior de un glaciar de circo o en glaciares longitudinales. Esta hendidura se forma cuando la masa helada inmóvil del escarpe se separa de la parte glaciaria en movimiento. En un glaciar longitudinal, la rimaya se localiza en el extremo superior del mismo y traza un ángulo recto con la dirección en la que avanza el glaciar, correspondiendo su origen al movimiento que efectúa el glaciar hacia abajo. Las rimayas pueden prolongarse hasta el lecho de roca y suelen alcanzar una profundidad superior a los 100 metros.

Figura 2. Esquema de zonificación glaciaria en base a la línea de equilibrio (ELA).



Fuente: Rivera A. et. Al., 2017.

1.3 Objetivos

El **objetivo general** de este TFG es el de evaluar los impactos del calentamiento global en el glaciar del Nevado Artesonraju durante los años 2004-2014.

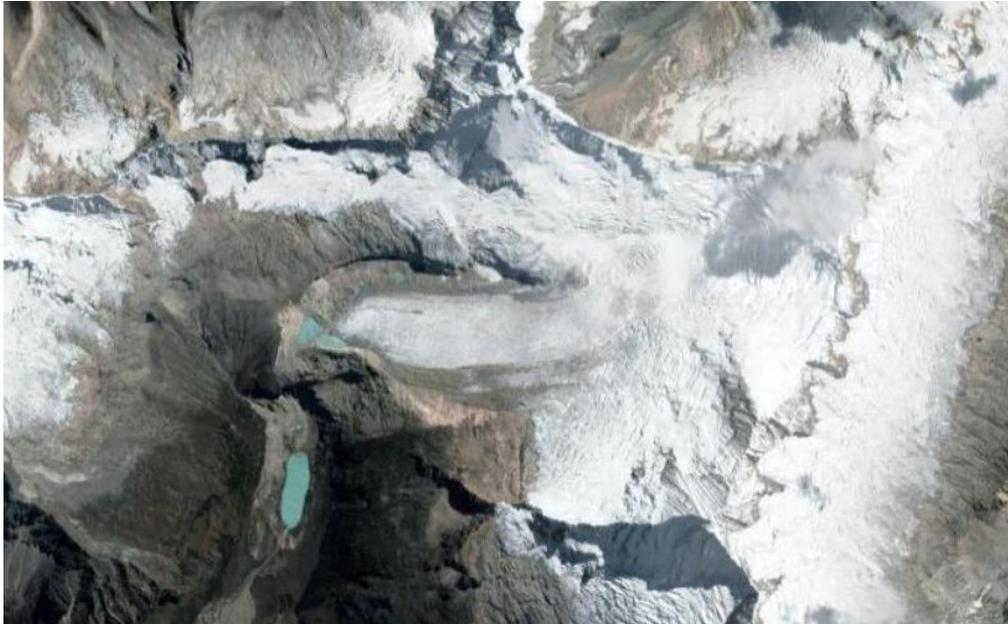
Para ello, se pretenden alcanzar los siguientes **objetivos específicos**:

1. Identificar, digitalizar y calcular la superficie del glaciar en la actualidad (2014) y su correspondiente ELA.
2. Cartografiar el volumen y la delimitación del glaciar para los años estudiados, pudiendo observar así su evolución.
3. Cartografiar y calcular el área del glaciar por intervalos de 50 metros de altitud, observando así su evolución a lo largo de los años estudiados.
4. Calcular el balance de masa del glaciar para cada año estudiado a partir de mediciones directas, teniendo en cuenta el retroceso de la superficie glaciar y las ELAs.
5. Tratar de establecer escenarios y pronósticos futuros de la desaparición de los glaciares.

1.4 Localización Geográfica

El Nevado Artesonraju es uno de los aproximadamente 50 picos que componen la Cordillera Blanca, perteneciente a los Andes Centrales peruanos. Su altura alcanza los 6.025 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas geográficas son 8°57'S, 77°38'O.

Figura 3. Imagen de satélite del Nevado Artesonraju



Fuente: Google Earth

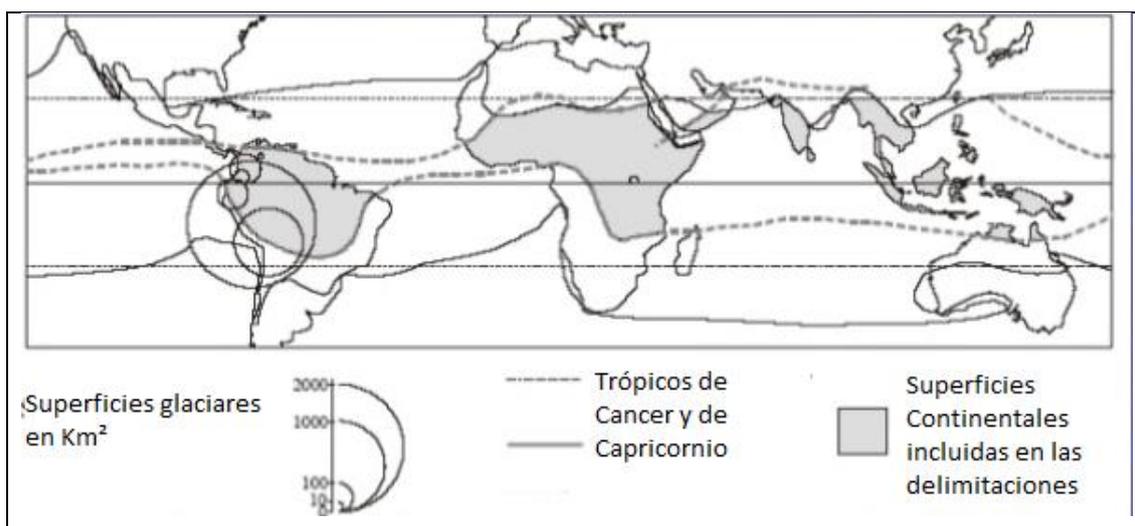
La cadena montañosa de los Andes es un sistema de cordilleras que se extienden en toda la longitud de la costa oeste de América del Sur, con una dirección norte-sur, a lo largo de más de 7500 km, desde la depresión de Barquisimeto hasta la Isla de los Estados en

Argentina. Por lo tanto, es en su conjunto la cordillera más larga del planeta. Su anchura general se sitúa entre los 400-500 km, alcanzando un máximo de 800 km en el sector de Bolivia. En esta cordillera se pueden encontrar algunas de las montañas más altas del planeta, cuyas cimas superan con holgura los 6.000 msnm, culminando a 6.962 msnm en el cerro del Aconcagua, la montaña más alta del planeta entre las no ubicadas en la Cordillera del Himalaya. Los Andes se subdividen en tres grandes sectores: los Andes del Norte o Septentrionales, los Andes Centrales, y los Andes del Sur o Meridionales.

La Cordillera Blanca se sitúa en los Andes Centrales. Se extiende por 200 km entre los 8°08'-9°58'S y los 77°00'-77°52'W, en dirección noroeste. Es la cadena montañosa tropical nevada más extensa y cuenta con 722 glaciares individuales. También cuenta con la montaña más alta de Perú, el Huascarán de 6.768 msnm. Esta cordillera se encuentra totalmente dentro de la Región Ancash³ y corre paralela al valle del río Santa en el oeste, que es donde van a parar las aguas de deshielo de los glaciares de la cordillera.

Los países de la Comunidad Andina concentran el 95% de los glaciares tropicales del mundo, los cuales cubren hoy una superficie estimada en 2.500 km². En cuanto a países, el 71% de los glaciares tropicales están ubicados en Perú, el 22% en Bolivia y el 3% en Colombia.

Figura 4. Mapa de las superficies tropicales continentales y ubicación de los glaciares



Fuente: Úbeda J., 2011.

³ Uno de los 24 departamentos que forman la República del Perú, ubicado al centro-oeste del país. Su capital es la ciudad de Huaraz mientras que su núcleo más poblado es la ciudad de Chimbote.

Figura 5. Mosaico que muestra la ubicación del Nevado Artesonraju



Fuente: Google Earth

1.5 Características Climáticas

A la hora de analizar las características climáticas de la Cordillera Blanca debemos considerar varios factores. El primero y el más importante es el referente a las variaciones de altitud, que afectan directamente a las características térmicas, pasando de las zonas de menor altitud en el Callejón de Huaylas⁴, las cuales sobrepasan ligeramente los 3000 msnm, a los más de 6000 msnm que poseen sus picos más altos. Al aumentar la altura, no sólo disminuyen de manera gradual las temperaturas medias anuales, sino que varían también las fluctuaciones térmicas diarias, con diferencias entre la temperatura diurna y nocturna más acusadas a mayor altitud (Sevink, 2014).

El factor de la altitud modela también el marcado clima de alta montaña de la zona de estudio, obteniéndose niveles muy bajos de presión atmosférica (con un 40% menos a 4000 msnm que al nivel del mar). Por otra parte, la densidad del aire es considerablemente más baja que al nivel del mar (un 35% menos) y la humedad atmosférica es escasa (Aceituno, 1997). De esta forma, las cumbres de gran altitud que se encuentran en la

⁴ El Callejón de Huaylas es un estrecho y alargado valle aluvial, formado por el recorrido del río Santa, y situado entre la Cordillera Negra al oeste y la Cordillera Blanca al este. En este callejón es donde se vierten todas las aguas de la vertiente occidental de la Cordillera Blanca.

Cordillera Blanca son susceptibles de acumular nieve y hielo, propiciando la formación de formas glaciares.

Otro de los factores que debemos considerar como fundamental es la barrera que ejerce el conjunto de cordilleras andinas y la disimetría existente, tanto térmica como pluviométrica, en cada una de sus dos vertientes. De este modo, la vertiente pacífica es más seca en cuanto a precipitaciones y más fresca en cuanto a temperaturas, mientras que la vertiente atlántica es más cálida y húmeda (Martín, 2014).

La diferencia de clima entre las vertientes occidental y oriental de la Cordillera Blanca se puede explicar completamente por las diferencias de contenido de agua y temperatura de las masas de aire que se desplazan por estas zonas. Cuando proceden del oeste, son secas y frías, por tanto, contienen relativamente poco vapor de agua. Al ascender, se forman nubes sólo a gran altura y la temperatura cae relativamente rápido cuando aumenta la altitud. Por eso, la línea de nieve está a menor altura, pero la cantidad de precipitación también es menor. Desde el este, las masas de aires son más cálidas y contienen más humedad. Se forman nubes con facilidad y, por tanto, la línea de nieve está a mayor altura. Sin embargo, la precipitación es mayor, lo que explica el mayor desarrollo de glaciares en las faldas orientales de la Cordillera Blanca (Sevink, 2014).

Por otro lado, existen otros agentes o factores que condicionan el clima de la zona de estudio, en los que los más influyentes son la corriente marina fría de Humboldt⁵ y los ciclos anuales de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT)⁶ (Úbeda, 2011).

La influencia de la corriente de Humboldt condiciona la temperatura y la aridez de la vertiente pacífica de Los Andes y de la Cordillera Blanca, donde la temperatura es varios grados más fresca (alrededor de 5°C anuales) y las precipitaciones más atenuadas (alrededor de 200mm anuales de variación) que en la vertiente atlántica.

Además, el enfriamiento de la troposfera provoca una inversión térmica en altura, impidiendo en gran medida que la región reciba los aportes de lluvias procedentes del

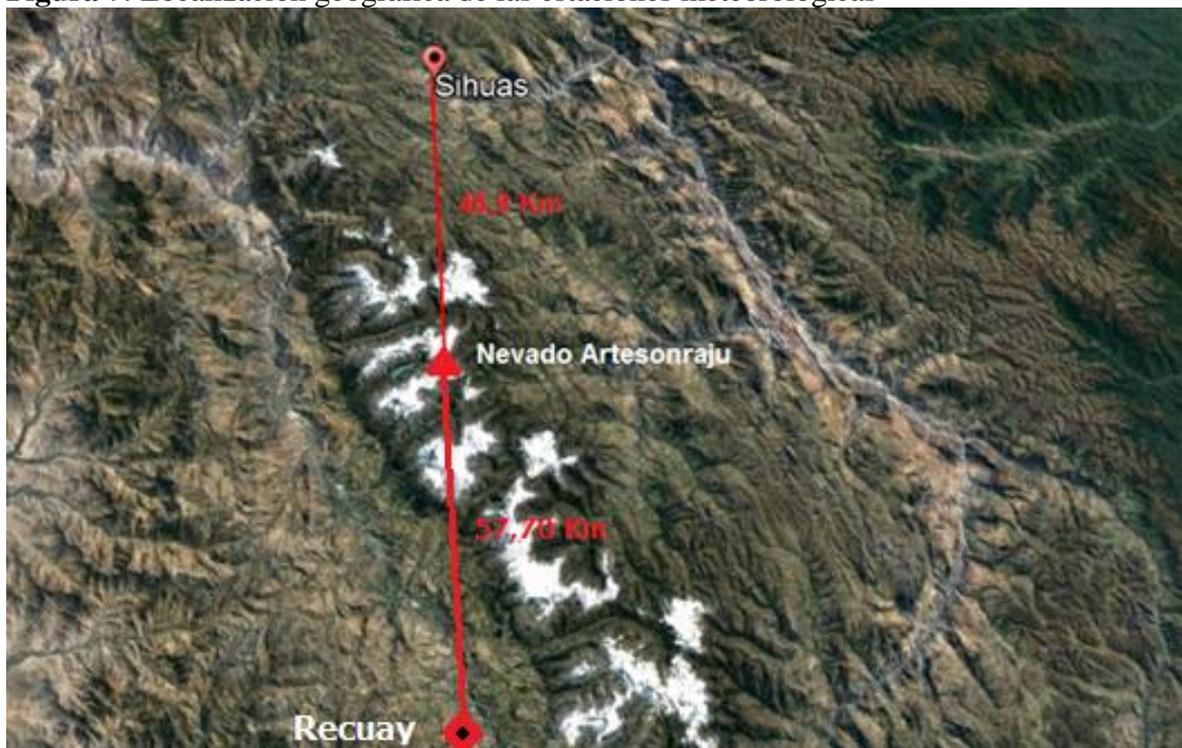
⁵ La corriente de Humboldt, también llamada corriente del Perú o corriente peruana, es una corriente oceánica originada por el ascenso de aguas profundas y, por lo tanto, muy frías, que se produce en las costas occidentales de América del Sur. Este fenómeno provoca altos niveles de aridez en las tierras continentales localizadas en Perú y Chile.

⁶ La zona de convergencia intertropical (ZCIT) es la región del globo terrestre donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur. Se caracteriza por ser un ancho cinturón de baja presión constituido por corrientes de aire ascendente, donde convergen grandes masas de aire cálido y húmedo provenientes del norte y del sur de la zona intertropical.

océano. Por lo tanto, las precipitaciones recibidas en la cordillera proceden en su mayor parte de la cuenca amazónica, y éstas, a su vez, están condicionadas a los ciclos de evolución anual de la ZCIT, siendo los meses de verano austral (de diciembre a marzo) cuando se dan los mayores aportes de precipitación.

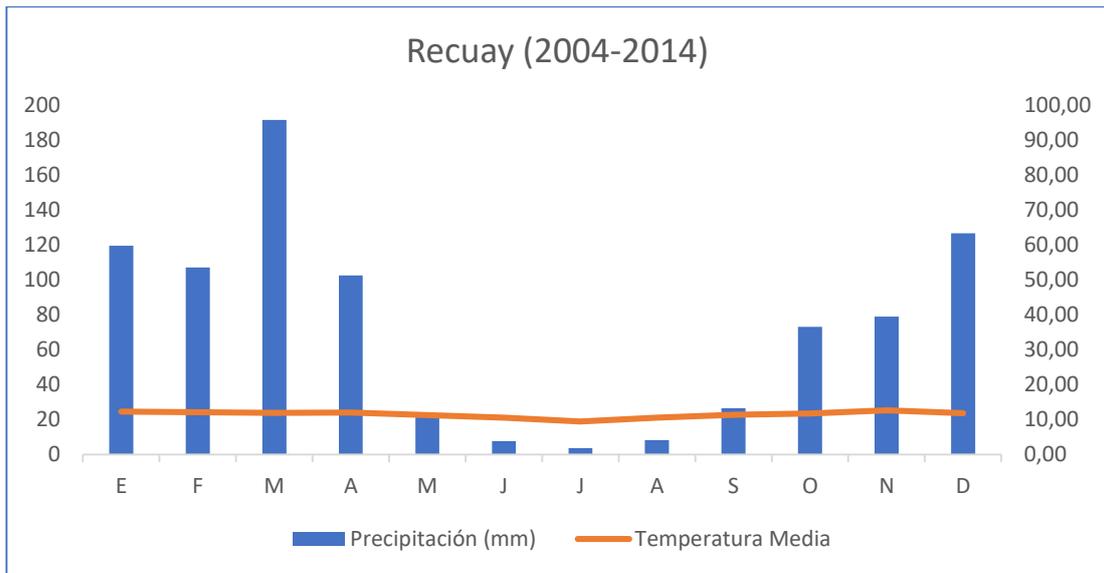
A continuación, se analizarán dos climogramas con datos obtenidos de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio, ubicadas en las localidades de Sihuas y Recuay, para los años 2004-2014. El primero se localiza en la vertiente oriental de la cordillera y el segundo en la vertiente occidental. De este modo, además de analizar los datos mensuales de precipitación y temperaturas, podremos comparar las diferencias existentes a uno y otro lado de la cordillera. Los datos han sido recogidos de la página de Senamhi (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), organismo público adscrito al Ministerio del Ambiente del gobierno peruano.

Figura 7: Localización geográfica de las estaciones meteorológicas



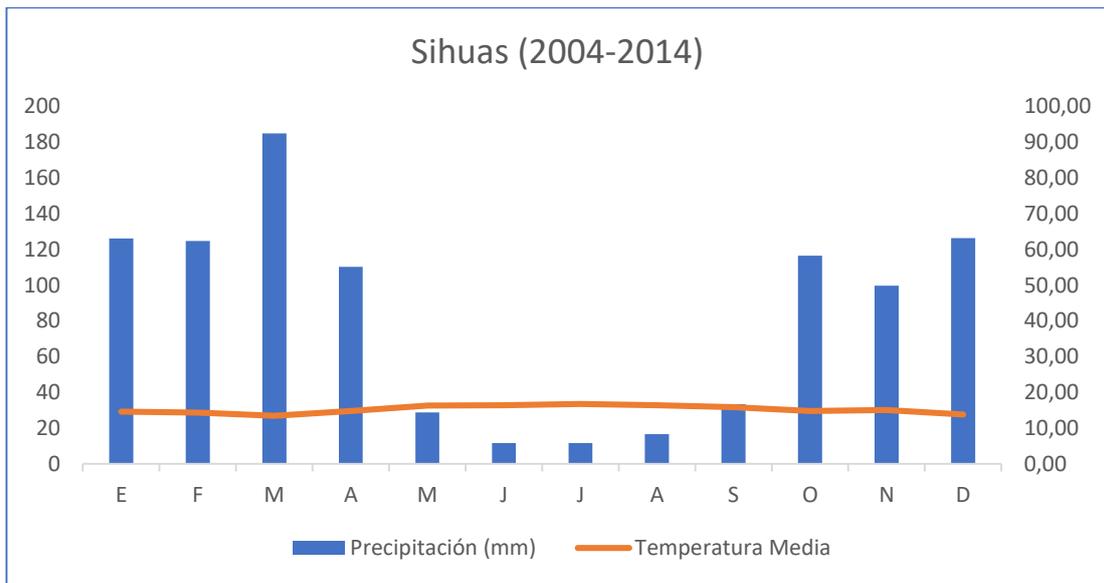
Fuente: Google Earth

Figura 8. Climograma de la estación meteorológica de Recuay



Fuente: Senamhi

Figura 9. Climograma de la estación meteorológica de Sihuas



Fuente: Senamhi

En estos climogramas podemos ver tanto el nivel de precipitaciones como las temperaturas medias mensuales de la estación meteorológica de Sihuas, ubicada a 46,9 Km de distancia al norte de nuestra zona de estudio, y de la estación de Recuay, a 57,70 Km al sur. Un dato a tener en cuenta es la altitud a la que se encuentran estas dos localidades, siendo de 3422 msnm en Recuay y de 2700 msnm en Sihuas. Por tanto,

puesto que nuestra zona de estudio se encuentra a una altitud de más de 5000 msnm, se debe saber que las condiciones no son exactamente las mismas, pero nos sirve para hacer una aproximación.

Como aspectos generales, la temperatura media anual obtenida en la localidad de Recuay es de 11,35°C, mientras que la de Sihuas es de 16,78°C. En cuanto a al nivel de precipitaciones, en la localidad de Recuay registra unos datos anuales de 849,2 mm de agua mientras que en Sihuas se registran 988mm. A través de estos datos vemos con claridad cómo las diferencias, tanto de temperatura como de precipitación, inciden a uno y otro lado de la cordillera, debido a los factores ya mencionados con anterioridad.

Otro de los aspectos más llamativos que nos arroja el climograma tiene que ver con la temperatura media, muy regular y constante durante todo el año, situándose entre los 9 y 14 grados en Recuay y entre los 13 y los 18 grados en Sihuas. Estos bajos niveles de oscilación térmica revelan, por un lado, el carácter tropical de esta zona, donde la estacionalidad no está en absoluto marcada, y por otro lado la influencia que ejerce el factor de la altitud, con temperaturas bastante menores que en otros puntos del planeta de similar latitud, pero de menor valor altitudinal. Hay que resaltar que los datos obtenidos son de la media diaria, por lo que no se tiene en cuenta la variación de temperatura diurna⁷, que en nuestro caso sería más acusada.

El otro factor es el de la precipitación, con una media anual en torno a los 850 mm en Recuay, y los 1000 mm en Sihuas. Al contrario que ocurre con la temperatura, en cuanto a la precipitación sí se observa una clara estacionalidad. En los dos casos, observamos cómo hay una clara disimetría entre los meses de octubre-abril, en donde se ven donde las precipitaciones superan los 70 mm en todos los meses, y entre los meses entre mayo-septiembre, que pertenecen a los meses de invierno austral, que no llegan a los 40mm. Estas condiciones de precipitación están claramente influenciadas por los ciclos de evolución anual de la ZCIT, sobre todo en la vertiente oriental a la que pertenece la localidad de Sihuas. En Recuay, en cambio, debido a que pertenece a la vertiente occidental, las precipitaciones son menores, ya que se ve influenciado por los efectos de aridez que provoca la corriente marina de Humboldt.

⁷ Variación en temperatura que ocurre entre el momento más caluroso del día y el momento más frío de la noche.

2. METODOLOGÍA

Este capítulo servirá como guía de los diferentes procesos, técnicas y materiales empleados en la elaboración de este proyecto, necesarios para el alcance de los objetivos previos deseados a la realización del mismo.

Nuestras labores principales para la consecución de estos objetivos serían las de delimitar cartográficamente la superficie glaciar para los diferentes años estudiados, obtener los datos de las áreas de la superficie glaciar en intervalos de 50 metros de altitud, calcular las ELAs para cada año y, por último, realizar el cálculo del balance de masa anual para este periodo.

El cálculo del balance de masa lo vamos a realizar mediante el método de **balance de masa directo**. Este método se realiza apoyándose en los datos obtenidos mediante la colocación de balizas, como podemos ver en un ejemplo en la figura 10. Estas balizas, se instalan en pozos a diferentes puntos de altitud, que nos ayudarán a medir la pérdida o ganancia de masa glaciar de cada año. Las mediciones, han sido realizadas por la Unidad Glaciológica de Recursos Hídricos (URGH), entidad perteneciente a la Autoridad Nacional del Agua (ANA)⁸ de Perú.

Figura 10. Sistema de balizas instaladas en un glaciar para su medición



Fuente: Rivera A. et. Al., (2017)

Las oscilaciones anuales de la masa glaciar van a ser medidas en metros equivalentes de agua, que arrojarán unos datos de la cantidad de hielo que va a perder o acumularse en cada punto de la medición. Este método, si se poseen los datos acerca del balance de masa y una correcta altimetría, es considerado como el más riguroso (Benn et al., 2005).

⁸ Institución adscrita al Ministerio de Agricultura y Riego del Gobierno de Perú. Entre sus funciones, están las de administrar y vigilar las fuentes naturales de agua o las de Gestionar de manera integrada y multisectorial los recursos hídricos en cuencas y acuíferos.

2.1 Materiales

El software empleado para la elaboración de todos los mapas expuestos es el **QGIS 2.18**. Este software nos ha servido como instrumento para la georreferenciación precisa de todos los elementos expuestos en este trabajo, siendo de gran importancia su ubicación correcta en el espacio, ya que de ello dependerá la exactitud de los resultados obtenidos. Por otro lado, también nos hemos servido de este software para la elaboración cartográfica de todos los mapas expuestos en este proyecto.

Los cálculos para determinar el balance de masa, así como las tablas y los gráficos presentados en este proyecto, han sido realizados en el programa de cálculo **Excel**.

Otro material utilizado ha sido el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) **Pleiades Elevation 4**, el cual posee una resolución espacial de 4 metros por píxel. Esta herramienta nos ha permitido localizar los diferentes cambios altitudinales dentro del glaciar, resultando clave para el cálculo de las áreas para cada intervalo altitudinal.

Por último, los materiales utilizados para la observación de imágenes por satélite del glaciar a lo largo de los años estudiados, han sido, por un lado, las tomadas de **Google Earth** (para el año 2014), y por otro las tomadas del **United States Geological Survey (USGS)** en su herramienta **Earth Explorer** (para el resto de años). En esta última, hemos recogido imágenes tomadas por el satélite Landsat 7 ETM+⁹, que posee una banda espectral pancromática con una resolución espacial de 15 metros por píxel.

Tabla 1. Materiales y softwares empleados

TABLA MATERIALES		
Material	Fuente-Institución	Fecha
Georreferenciación y Cartografía	QGIS 2.18	2016
Hojas de cálculo	Excel	2016
Modelo Digital de Elevaciones	Pleiades Elevation 4 (Airbus)	2012
Imágenes de Satélite (Landsat 7)	Earth Explorer (USGS)	2004-2013
Imágenes de Satélite	Google Earth	2014

⁹ Séptimo satélite lanzado por el programa Landsat, un grupo de satélites estadounidenses, en activo desde 1972, con el objetivo de facilitar la observación en alta resolución de la superficie terrestre. Su operación es administrada por la NASA y la producción y comercialización de imágenes depende de la USGS (United States Geological Survey). El Landsat 7 fue lanzado en abril de 1999 con el nuevo sensor ETM+, compuesto por 8 bandas espectrales.

2.2 Identificación de la superficie glaciar actual (2014)

El primer paso para el alcance de los objetivos marcados va a ser el de reconocer y delimitar la superficie glaciar del Nevado Artesonraju para el año 2014. Para ello, nos vamos a apoyar en las observaciones de imágenes por satélite recogidas por medio de Google Earth. Una vez cargadas estas imágenes en el programa QGIS, se procederá al reconocimiento de los límites del glaciar por medio de una capa Shapefile, que a su vez nos servirá para conocer el dato del área total de dicho glaciar.

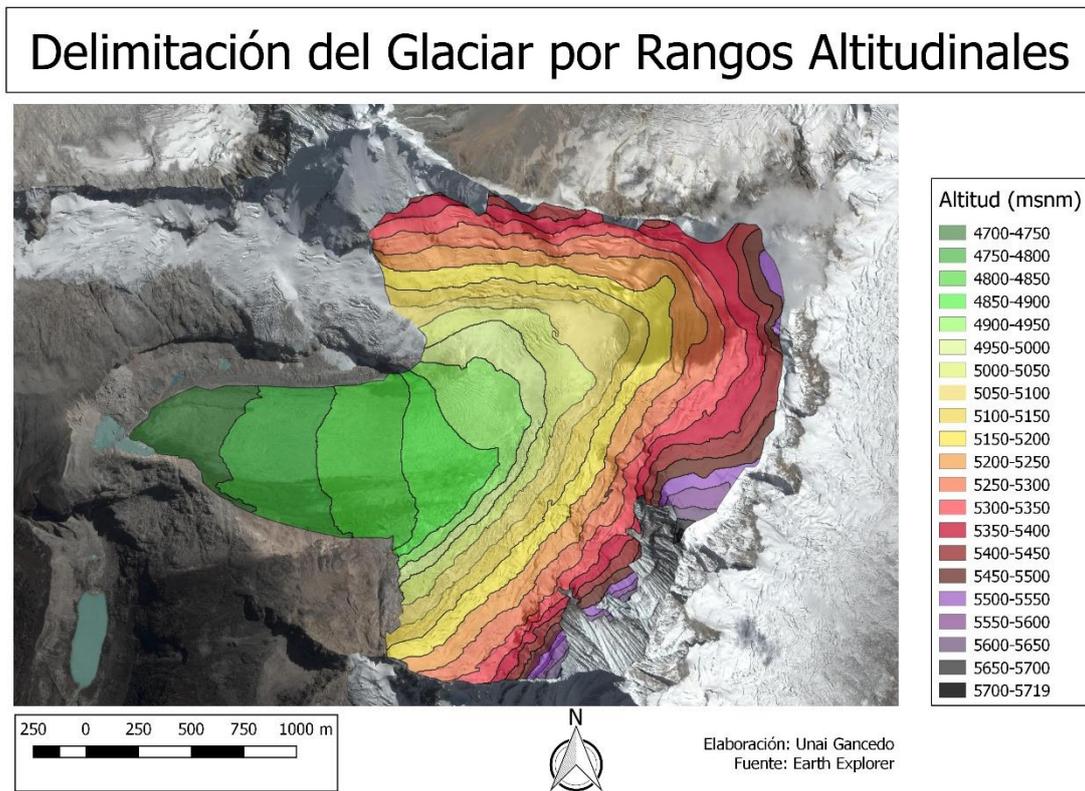
Reconocer el área que pertenece al glaciar no es una tarea del todo sencilla, ya que requiere un previo entrenamiento visual en imágenes por satélite, especialmente si se trata de superficies glaciares. Esto es debido a la dificultad que radica en saber diferenciar entre las superficies cubiertas por nieve o hielo (y por tanto las que alimentan el glaciar), y las superficies rocosas (no pertenecientes al glaciar), en muchas ocasiones con tonos y texturas muy similares en ambos casos.

Otro de los factores a tener en cuenta a la hora de delimitar el glaciar, es el de reconocer las masas de hielo que van a alimentar la lengua glaciar y las que van a fluir en otra dirección y, por tanto, no forman parte del glaciar. Para esta observación resulta clave la interpretación de las rimayas, ya que, en base a su morfología y direccionalidad, distinguiremos las vías de caída y la dirección de las masas de hielo.

2.3 Clasificación por altitudes de la superficie del glaciar (2014)

En este apartado, se va a clasificar o dividir la superficie del glaciar en intervalos hipsométricos de 50 metros para el año 2014. Para ello, se hará uso del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), imprescindible para identificar los límites de altitud. Una vez cargado el MDE en el programa QGIS, se irán creando capas para cada intervalo de 50 metros, editando y diseñando polígonos que hagan coincidir la superficie glaciar con la altitud de cada intervalo. El resultado cartografiado de esta operación puede verse en la figura 11.

Figura 11. Delimitación del Glaciar por Rangos Altitudinales



Fuente: Earth Explorer

Una vez obtenidas las capas por altitud, se procederá a realizar el cálculo de las áreas por intervalo, para este año 2014. Este será un paso muy importante, ya que este dato resultará imprescindible para el cálculo del balance de masa.

Tabla 2. Cálculo de áreas por intervalos hipsométricos (2014)

2014			
Altitud (msnm)	Área (m ²)	Altitud (msnm)	Área (m ²)
4700-4750	167.914	5250-5300	352.790
4750-4800	298.649	5300-5350	301.472
4800-4850	311.186	5350-5400	271.457
4850-4900	213.378	5400-5450	201.719
4900-4950	210.137	5450-5500	120.415
4950-5000	175.169	5500-5550	74.747
5000-5050	227.427	5550-5600	44.929
5050-5100	269.942	5600-5650	18.681
5100-5150	260.439	5650-5700	4.911
5150-5200	336.320	5700-5719	1.258
5200-5250	381.297		

Fuente: Earth Explorer

2.4 Evolución y cálculo de las superficies anuales (2004-2014)

El estudio de la evolución anual de la superficie glaciar, revelará el retroceso del mismo durante la década estudiada, además de permitir la realización de los correspondientes cálculos para la consecución del balance de masa de cada año.

Para adquirir los datos de las variaciones anuales de la superficie del glaciar, se recurrirá a la observación de imágenes por satélite para cada año a través de la herramienta Earth Explorer, de la institución de United States Geological Survey (USGS). Por otro lado, el satélite del que van a ser recogidas las imágenes va a ser el Landsat 7 ETM+.

Se escogerá una imagen de satélite para cada año, preferiblemente en una época del año similar, observando que no haya ningún obstáculo (nubes, bruma, etc.) que pueda dificultar la observación de la zona de estudio.

Para este trabajo se han escogido imágenes entre los meses de junio-septiembre, correspondientes a la estación seca peruana. Resulta adecuada esta elección, ya que, en la localización en la que se ubica el glaciar, esta estación corresponde también a la época seca, en la cual las precipitaciones disminuyen considerablemente, de igual forma que disminuyen también las masas nubosas, facilitando pues nuestra observación.

Una vez descargadas todas las imágenes de satélite para cada año, se cargarán en el programa QGIS. El satélite Landsat 7 ETM+ posee una resolución espectral de 8 bandas, por lo tanto, 8 visiones diferentes para cada imagen. Cada banda posee unas características técnicas diferentes, siendo la resolución espacial una característica fundamental para una observación a detalle como esta en cuestión. La banda con mayor resolución espacial del satélite Landsat 7 ETM+ es la llamada pancromática, con una resolución espacial de 15 metros por píxel. Esta banda será la elegida para la observación anual del glaciar.

2.5 Cálculo las ELAs anuales

Como ya se ha señalado con anterioridad, la ELA es una línea teórica que no es visible y que separa las zonas de acumulación de las zonas de ablación del glaciar, es el límite entre las áreas donde el glaciar sufre ganancias de hielo y aquellas áreas en las que experimenta pérdidas y fusión de la masa helada. Tradicionalmente la ELA se ha definido como la altitud donde el saldo neto de masa al final de la temporada de ablación (normalmente verano) es cero, pero esta definición no es del todo correcta para los glaciares tropicales, donde existe ablación durante todo el año (Benn et al., 2005).

Se trata de uno de los parámetros de los glaciares que son consecuencia directa del clima y sus variaciones. Por lo tanto, la ELA es una de las características más importantes a la hora de medir un glaciar moderno, cuando la meta es el entendimiento del clima actual (Ramage et al., 2005).

En este proyecto se va a calcular la altitud en la que se va a ubicar la ELA año por año, pudiendo observar así su evolución. Para ello, se recogerán los datos obtenidos de las balizas colocadas en diferentes puntos altitudinales sobre el glaciar, expresados en metros equivalentes de agua. Los datos de agua de cada baliza junto con su altimetría, servirán para la realización de un gráfico en una hoja de cálculo Excel, en el cual, el eje de ordenadas (Y) marcará la altitud y el eje de abscisas (X) marcará la cantidad de agua equivalente en metros.

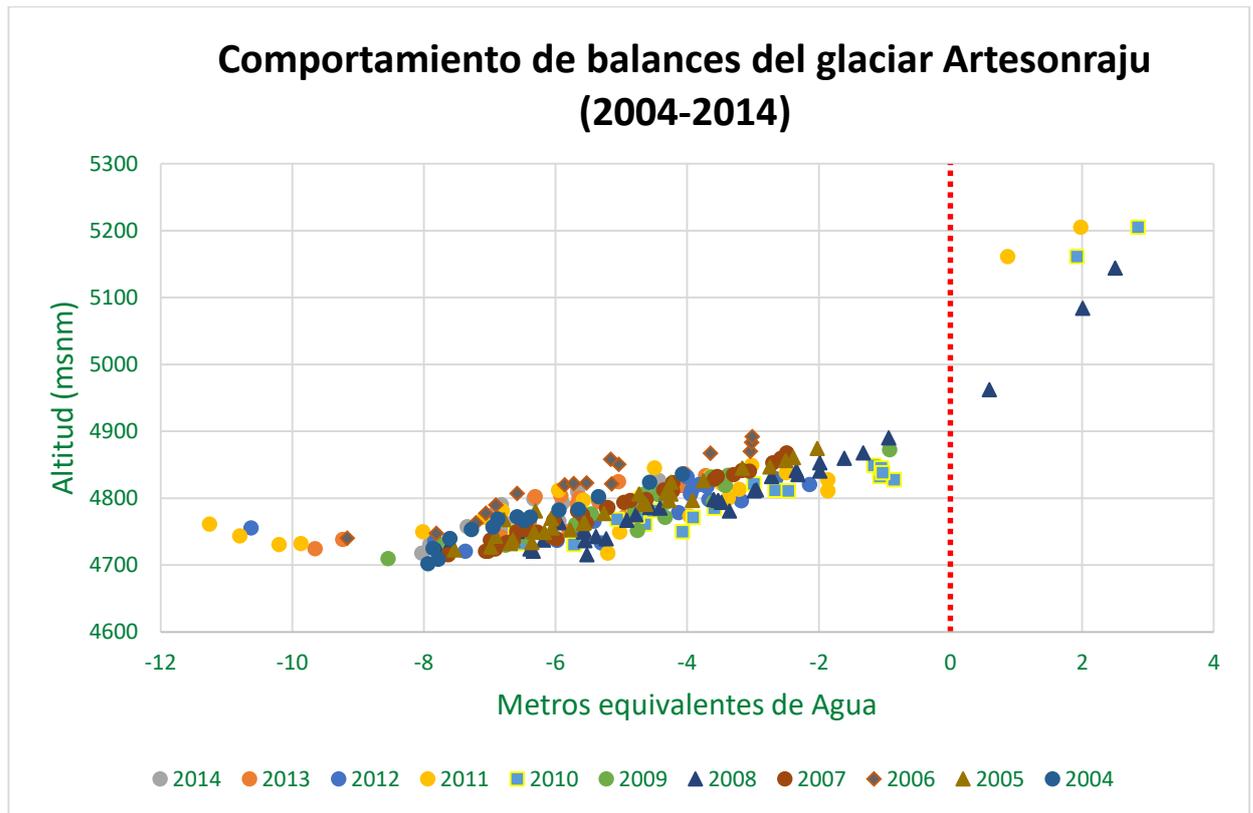
Una vez realizado el gráfico, se dibujará una **línea de tendencia**, siendo ésta un elemento indispensable no solo para la extrapolación de los datos de las balizas a todos los intervalos hipsométricos que posee el glaciar, sino también para la ubicación altitudinal de las ELAs. Las líneas de tendencia vienen determinadas por una ecuación, en base a los datos con los que se trabaja. Esta ecuación puede ser de primer o de segundo grado ¹⁰, pudiendo elegir entre una u otra en base al coeficiente de determinación que posea cada una. Este a su vez dependerá de las características del grupo de datos de las balizas (relación entre metros de agua y altitud), que serán diferentes para cada año estudiado.

Cuando la línea de tendencia cruce el valor 0 en la línea de abscisas (m. eq. de agua), recogeremos el valor de la altitud en las ordenadas, siendo éste la ELA para ese año en cuestión.

En la figura 12 se muestran los datos recogidos por todas las balizas colocadas durante los años de estudio del proyecto. Estos datos servirán después para la extrapolación de los metros de agua equivalente a todos los intervalos altitudinales que posee el glaciar, pudiendo determinar así la pérdida o ganancia de masa glaciar total para cada año.

¹⁰ Para la agrupación de los datos en base a una ecuación de primer grado, se marcará una línea de tendencia de tipo lineal, mientras que, para los agrupados en base a una ecuación de segundo grado, la línea de tendencia será de tipo polinómica.

Figura 12. Gráfico del balance de masa recogido por las balizas para el total de la década



Fuente: Unidad Glaciológica y Recursos Hídricos (URGH)

2.6 Cálculo del balance de masa anual

Como se ha recalado con anterioridad, el cálculo del balance de masa mediante el método de medición directa requiere dos condiciones fundamentales. La primera de ellas es la obtención de los datos de masa de agua (equivalente en metros) recogida de las balizas (ver anexo 1), mientras que la segunda es la delimitación del glaciar y el cálculo del área de cada uno de los intervalos hipsométricos.

Con los datos que nos concede la medición balizométrica, junto con su posición altitudinal (todos ellos introducidos en una hoja de cálculo Excel), se procederá a realizar el gráfico que marque la línea de tendencia de esas mediciones en relación a la altitud. La línea de tendencia llevará una ecuación asociada, la cual se recogerá para poder extrapolar estos datos de masa de agua en metros, a toda la superficie del glaciar donde no se tengan mediciones. Todos estos cálculos y gráficos se realizarán año por año (ver anexo 3).

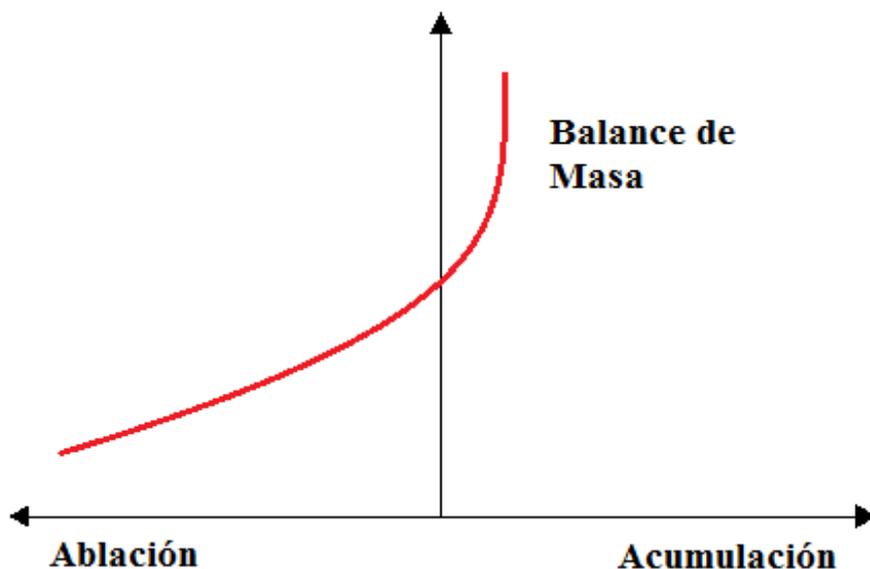
La extrapolación de los datos resulta una tarea crucial, ya que dependiendo de los pasos que se sigan para su elaboración, se pueden obtener unos resultados muy variables. El

glaciar del Nevado Artesonraju, posee una morfología con una superficie muy extensa en su área de acumulación (las partes más altas) y una superficie no tan extensa en su área de ablación. Debido a que para el cálculo del balance de masa se tienen en cuenta las áreas por altitudes, una extrapolación simple de los datos balizométricos a las áreas de acumulación se traduciría en unos resultados anómalos e irreales, con una ganancia de masa glaciar exagerada que condicionaría el cálculo total del balance del glaciar.

Es por ello que resulta necesario la realización de una corrección para la extrapolación de los datos a estas áreas, que se ha aplicado de la siguiente manera.

De los datos balizométricos recogidos en este proyecto, únicamente se tienen 7 balizas que arrojan unos resultados positivos, por tanto, que se hallan en la zona de acumulación. Como se puede ver en la figura 13, al contrario que lo que ocurre en la zona de ablación, donde la temperatura y la fusión aumentan a medida que nos alejamos de la ELA, en la zona de acumulación no ocurre lo mismo, ya que a mayor frío no hay mayor acumulación. Además, es sabido que, en los trópicos, a partir de cierta altitud la precipitación no aumenta, al contrario que ocurre en las áreas extra tropicales (Aceituno, 1999).

Figura 13. Perfil de balance de masa vertical y altitud de la ELA



Fuente: Glacier mass balance manual (UNESCO)

Basándonos en este argumento, los puntos de medición recogidos en la zona de acumulación servirán para establecer el máximo de agua acumulada para el resto de intervalos altitudinales del glaciar.

Tabla 3. Datos obtenidos de las balizas ubicadas en la zona de acumulación

Años	Altitud (msnm)	m. eq. de agua
2008	4962	0,59
	5084	2,01
	5144	2,50
2010	5161	1,92
	5205	2,85
2011	5161	0,87
	5205	1,98

Fuente: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (URGH)

Como se puede ver en la tabla 3, las mediciones en zonas de acumulación se hallan repartidas entre los años 2008, 2010, y 2011. Para estos años, se extrapolará el dato recogido en el punto de mayor altitud, mientras que, para el resto de años de estudio, se realizará un promedio con todos estos datos y se aplicará al resto de intervalos altitudinales del glaciar.

Así, por un lado, se tienen los datos de masa de agua en metros para todos los intervalos de altitud, y, por otro lado, los datos del área glaciár (también para cada intervalo) expresado en m².

La obtención del balance de masa se obtiene mediante la siguiente operación:

$$\textit{Balance de masa (m}^3\text{)} = \sum (Z_j * A_j)$$

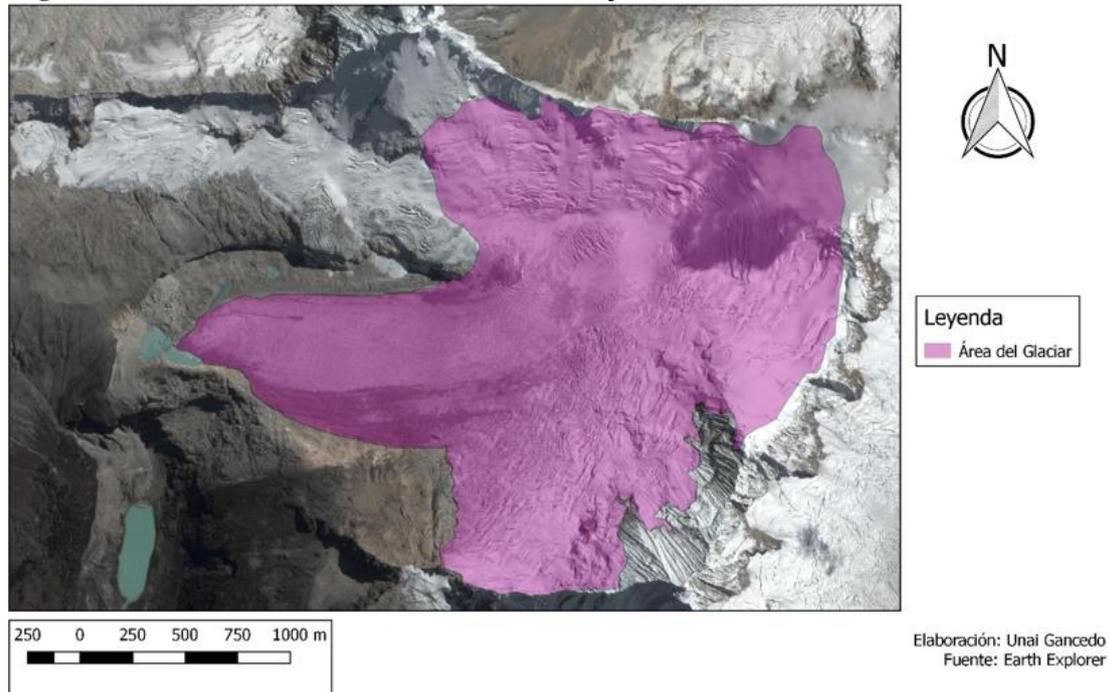
Z_j= Cantidad de agua para cada intervalo (m)

A_j= Área de cada intervalo (m²)

3. RESULTADOS

3.1 Identificación de la superficie glaciar actual (2014)

Figura 14. Delimitación del Glaciar Artesonraju (2014)



Fuente: Earth Explorer

Una vez confeccionada la capa de la superficie total para el año 2014, como se puede ver en la figura 14, se obtiene que el glaciar posee un área total de 4,24 Km². El punto de menor altitud en el glaciar se sitúa en los 4700 msnm, mientras que el punto más alto se sitúa en 5719 msnm, cubriendo por tanto un desnivel de alrededor de 1000 metros.

Como se puede ver, se trata de un glaciar de circo que consta de una zona de acumulación bastante extensa, en forma de anfiteatro y en las zonas de mayor altitud, y una lengua glaciar en las zonas más bajas, por donde circulan las masas de nieve por la acción de la gravedad. En la zona de acumulación vemos como el glaciar casi coincide con la línea de cumbres en su parte superior, salvo por las cimas más altas con cubierta rocosa.

Por otro lado, casi la totalidad de la superficie de la pirámide rocosa que conforma la cima del Nevado Artesonraju, se encuentra fuera de la zona de alimentación del glaciar, debido a la ausencia de nieve por su gran pendiente. Justo debajo del pico, nos encontramos con una bifurcación, en la que parte de la masa de nieve se dirige en acción descendente hacia la lengua glaciar, y otra parte cae hacia otra dirección, hacia el oeste del pico. Esto lo distinguimos gracias a la forma y dirección de las grietas en esta zona.

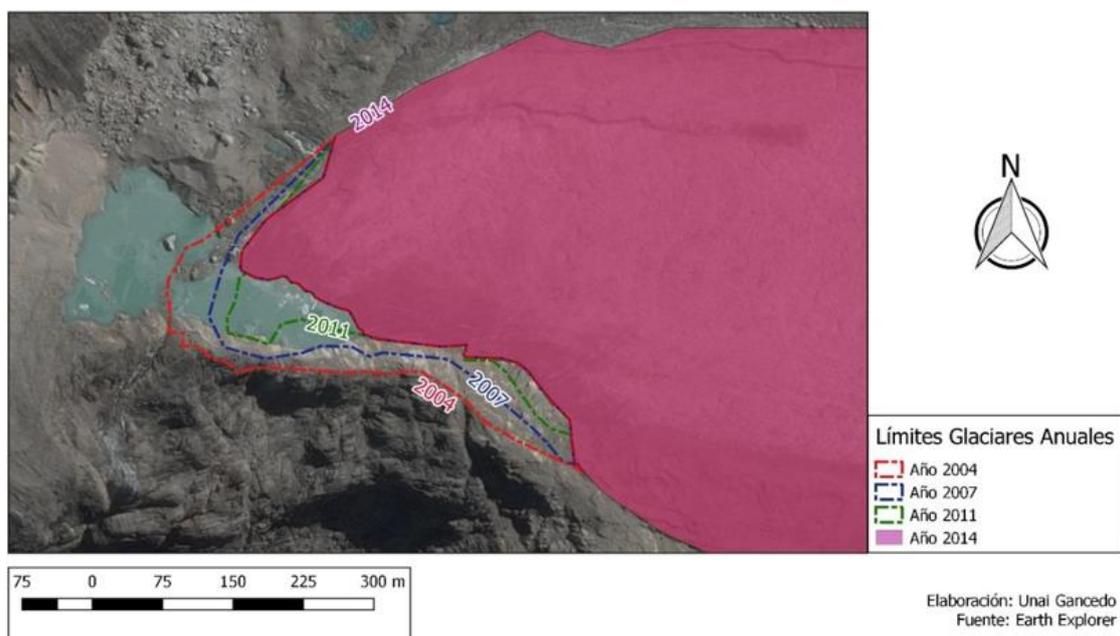
La lengua glaciar constituye la mayor parte de la zona de ablación. Esta lengua ha ido menguando a lo largo de los últimos años, viendo cómo retrocede su frente glaciar, hacia progresivamente posiciones de mayor altitud. Observamos que este retroceso ha originado la formación de un pequeño lago, resultante de la fusión progresiva de las masas de nieve y hielo, y el cual, a su vez, va a acelerar esta fusión en años venideros.

En este trabajo se va a estudiar detalladamente este proceso de retroceso del frente glaciar a lo largo de la década estudiada, siendo únicamente las zonas situadas en la lengua glaciar las que van a perder superficie, quedando intactas las zonas de acumulación en las partes más altas.

3.2 Evolución y cálculo de las superficies anuales (2004-2014)

El siguiente paso sería el de reconstruir la superficie glaciar desde 2004, pasando por cada año hasta 2014. Para ello se crearán nuevas capas, distinguidas por año y por intervalo hipsométrico. Se observa que, al no ser un periodo de tiempo extenso, no van a existir variaciones excesivamente significativas de superficie, y que éstas, únicamente se van a producir en los primeros 3 intervalos hipsométricos anteriormente marcados: 4700-4750, 4750-4800, 4800-4850. El resto de agrupaciones hipsométricas, las que se encuentran por encima de los 4850 msnm, no sufrirán variación alguna en su volumen y, por tanto, mantendrán el mismo dato de área que el calculado para el año 2014.

Figura 15. Retroceso del Frente del Glaciar Artesonraju (2004-2014)



Fuente: Earth Explorer

Otra consideración es que, a pesar de que el glaciar tenga una tendencia de pérdida de volumen, existen ciertas fluctuaciones anuales que repercuten en la superficie glaciar y le hacen avanzar respecto al año anterior, ya que algún año puntual con precipitaciones excesivas o con temperaturas más frías de lo habitual, pueden propiciar que se altere esta tendencia. En la figura 15, se puede ver de manera gráfica este retroceso del glaciar y la formación de un pequeño lago a sus pies.

A continuación, se calcularán las áreas correspondientes a los intervalos hipsométricos que sí variaron anualmente, pudiendo calcular también el área total del glaciar para cada año.

Tabla 4. Variaciones del área glaciar anual (en m²)

Año / Altitud (msnm)	4700-4750	4750-4800	4800-4850	Total Glaciar
2004	214.560	305.955	314.441	4.301.444
2005	194.963	301.204	311.186	4.273.841
2006	198.090	301.088	311.186	4.276.852
2007	185.680	301.119	311.186	4.264.468
2008	181.972	301.061	313.624	4.263.145
2009	178.049	298.649	311.186	4.254.372
2010	179.408	298.649	311.186	4.255.731
2011	176.829	298.649	311.186	4.253.152
2012	181.377	299.370	313.288	4.260.523
2013	188.005	298.929	315.486	4.268.908
2014	167.914	298.649	311.186	4.244.237

Fuente: Earth Explorer

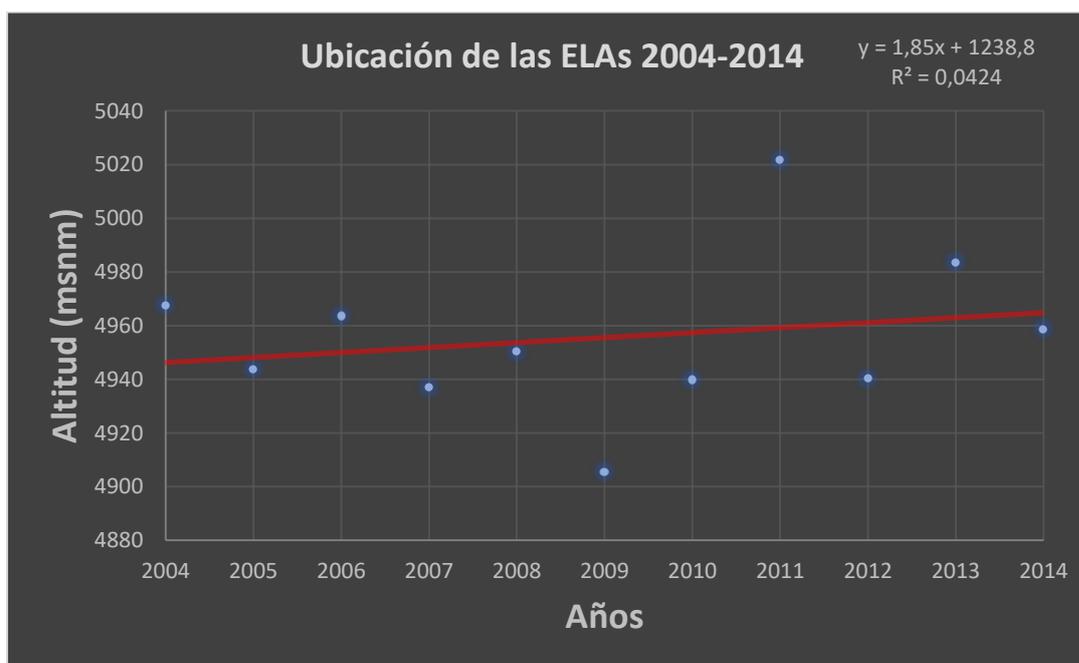
3.3 Cálculo de las ELAs anuales

Para la obtención de las altitudes de las ELAs en cada año estudiado, atenderemos a los gráficos anuales (ver anexo 2), anteriormente explicados en la metodología. El resultado será el punto de altitud en el que se produce la intersección entre la línea de tendencia y el valor 0 en las abscisas (m. eq. de agua).

Tabla 5. Altitud de las ELAs anuales

Años	Altitud ELA (msnm)
2004	4967,5
2005	4943,7
2006	4963,6
2007	4936,9
2008	4950,2
2009	4905,5
2010	4939,7
2011	5021,6
2012	4940,2
2013	4983,5
2014	4958,62

Figura 16. Gráfico de la altitud de las ELAs anuales



Como se puede ver, en la tabla 5 se resume la altitud en la que se encuentra la ELA en cada año estudiado, y en la figura 16 se hace una representación de la misma mediante un gráfico. Podemos ver cómo, a rasgos generales, la ELA posee una tendencia ascendente en estos 10 años, con algunas fluctuaciones propias de la naturaleza de este estudio¹¹.

¹¹ Las mediciones mediante las balizas son realizadas en un muy corto periodo de tiempo (año a año), por lo que los datos que nos aportan son susceptibles a una mayor variación.

La línea de tendencia nos marca que la ELA iría ascendiendo en altitud a medida que pasan los años, pasando de una altitud de 4946 metros al comienzo del periodo hasta los 4964 metros al término del mismo. Por tanto, la relación aproximada que nos marca el gráfico sería la de 18 metros de altitud por cada 10 años.

3.4 Cálculo del balance de masa anual

Una vez realizado el cálculo del balance de masa, explicado con detalle en la metodología, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 6. Resultados de Balance de Masa en metros

Años	Balance de Masa (Hm ³)
2004	-0,60
2005	0,57
2006	-1,57
2007	0,81
2008	3,26
2009	1,34
2010	3,81
2011	-1,01
2012	1,37
2013	-0,15
2014	-0,32
TOTAL	7,52

Los resultados de balance de masa obtenidos en este proyecto bajo el método glaciológico directo, arrojan unos valores en los que se alternan años en los que el glaciar gana masa con otros años en los que sufre pérdidas. En el cómputo global de la década de estudio, vemos como el balance es positivo, obteniéndose una ganancia de 7,52 Hectómetros cúbicos de masa glaciar.

Se debe tener en cuenta que este método no es del todo riguroso, ya que debido a la falta de recursos económicos y de personal, no se hace posible una medición balizométrica más exhaustiva, con un mayor número de pozos, sobre todo en la zona de acumulación del glaciar. Es por ello que, debido a esta falta de recursos, era necesario realizar la extrapolación de muchos de los datos para la zona de acumulación del glaciar, con las consiguientes imprecisiones que genera esta técnica.

Otra de las razones que explican el retroceso del glaciar, a pesar de un balance de un resultado positivo del balance de masa, se encuentra en la existencia de un lago en el frente glaciar. Esta masa de agua incide, de manera directa, en la aceleración del proceso de fusión de la masa de hielo glaciar, ya que se encuentran en contacto con el hielo. Las pérdidas de masa que genera este proceso no se ven reflejadas en la medición mediante las balizas, ya que son pérdidas sufridas en la superficie inferior del glaciar, donde las balizas no tienen acceso.

Figura 17. Vista del lago y del frente glaciar



Fuente: Ramón Pellitero

Figura 18. Vista del lago a pie del glaciar



Fuente: Ramón Pellitero

Como se puede ver tanto en la figura 17 como en la 18, el lago aflora donde comienza el frente glaciar, provocando la aceleración en la fusión del hielo. También se pueden observar bloques de hielo que se desprenden y flotan a través del lago.

4. CAMBIO CLIMÁTICO Y GESTIÓN DEL AGUA

Una vez realizado el estudio completo y ya con los resultados, en este apartado se pretende analizar las consecuencias que puede provocar este retroceso del glaciar en el callejón de Huaylas, lugar en donde se vierten las aguas fusionadas en el glaciar Artesonraju, a través de la cuenca del Río Santa. Además, se analizarán los riesgos para la población local y se tratará de analizar cuáles podrían ser las estrategias de planificación para la gestión del agua en este territorio, poniendo como ejemplo la gestión hidrográfica de la Laguna Parón, situada a los pies del glaciar.

4.1 Cambio climático

Como hemos podido comprobar con el presente trabajo, se está generando una pérdida de masa glaciar de los nevados andinos, provocada por un incremento de la temperatura a nivel global. A partir de este hecho, se estudiarán los múltiples impactos que este retroceso glaciar pueda generar en las cuencas hidrográficas asociadas, como es el caso del callejón de Huaylas.

El calentamiento global de la temperatura está propiciando que los recursos hídricos de estas cuencas se vean claramente afectados, provocando desequilibrios que afectan directamente al acceso futuro al agua potable, agua para saneamiento, riego y agricultura, operaciones mineras y generación de energía hidroeléctrica en estas regiones. El retroceso de los glaciares altera también la calidad del agua o la estacionalidad del caudal de los ríos que se alimentan de ellos (Untiveros, 2011).

Por otro lado, se prevé que los conflictos sociales, económicos y ambientales en torno a la lucha por el control del agua se verán acentuados, sobre todo en las zonas andinas, donde la escasez de agua se yuxtapone al rápido crecimiento de su demanda a causa de la presión demográfica y las actividades económicas en expansión, amenazando las prácticas tradicionales de riego y uso del agua (Vuille, 2013).

4.2 Riesgos asociados a la desglaciación

Los riesgos asociados al proceso de desglaciación en la Cordillera Blanca, afectan directamente a la población local. Las comunidades que pueblan los territorios del callejón de Huaylas, a pie de la Cordillera Blanca, han sido identificadas como poblaciones altamente vulnerables a los impactos asociados al cambio climático. El grado de riesgo que puedan generar los impactos del calentamiento global, se ha visto aumentado debido a la mayor exposición de estas comunidades frente a estos impactos, ya que habitan en condiciones socioeconómicas de pobreza y exclusión social.

El glaciar Artesonraju y otros glaciares adyacentes, son los que administran y suministran agua potable a estas comunidades. Estos glaciares, debido al proceso de pérdida de masa que están experimentando en los últimos años, promueven la formación de lagunas y glaciares “colgados”, como es el caso de la laguna Parón, en la base del Nevado Artesonraju.

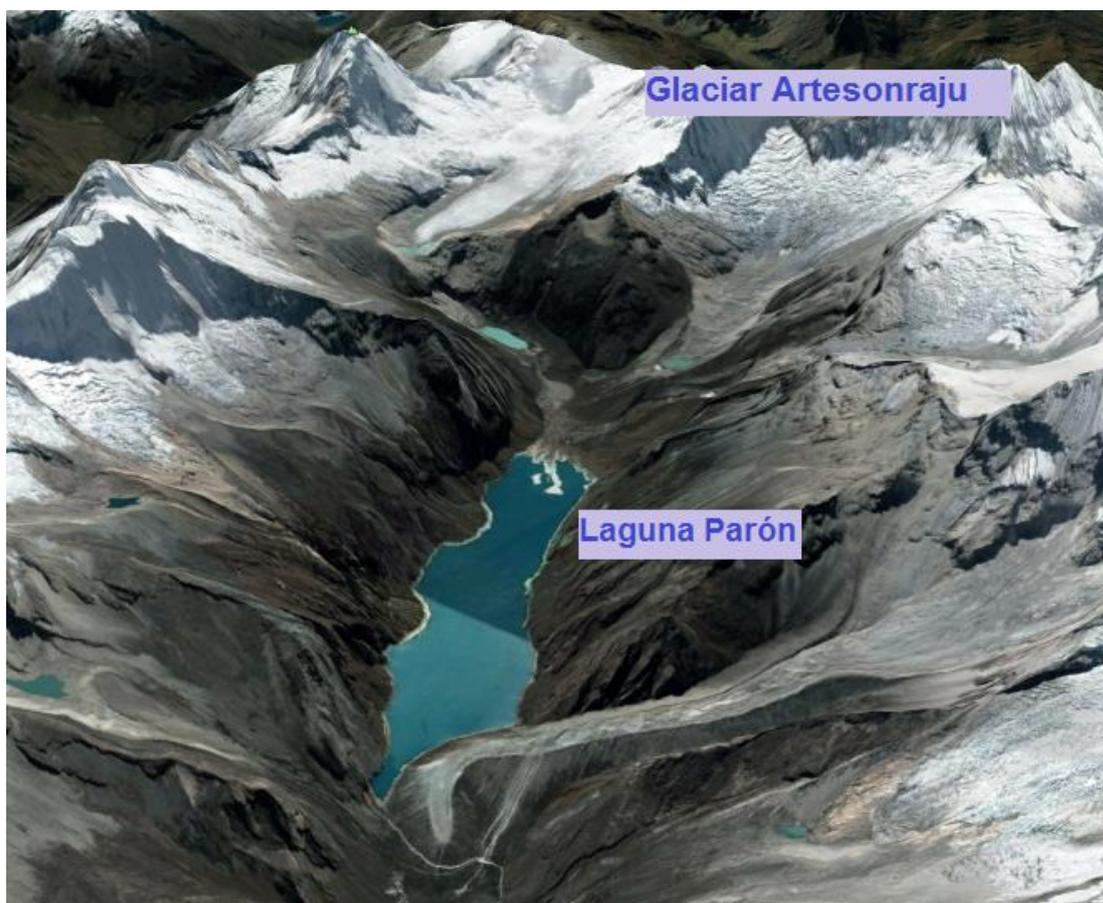
Sin embargo, el retroceso glaciar no sólo amenaza con el agotamiento de los recursos hídricos. La fusión acelerada de estos glaciares, unido a una actividad sísmica considerable propia de esta región, pueden provocar el desprendimiento de grandes bloques de hielo, que, en el caso del glaciar Artesonraju, vertería sobre los lagos en su base, con un inminente riesgo de desbordamiento. El desbordamiento de estos lagos podría tener consecuencias catastróficas para las comunidades ubicadas en el callejón de Huaylas, con aluviones y crecidas que amenazan seriamente las débiles infraestructuras de estas comunidades, pudiendo causar tanto pérdidas humanas como, por supuesto, materiales.

4.3 Gestión de los recursos hídricos

Como se ha señalado, los recursos hídricos provenientes del glaciar son vitales para los habitantes del callejón de Huaylas, pero también son objeto de un cruce de intereses, con un trasfondo económico, ejercidos por otros actores externos. Entre ellos, los intereses asociados a la explotación de energía hidroeléctrica en la Cordillera Blanca, tiene importantes repercusiones sociales y económicas.

Un ejemplo claro que repercute en este trabajo es el suceso de la **Laguna Parón** (figuras 19 y 20), pequeña reserva de agua alimentada por el glaciar Artesonraju, donde los agricultores entraron en pugna con una empresa norteamericana de energía hidroeléctrica en 2008, debido a los intereses cruzados respecto al aprovechamiento de sus aguas (Carey et al. 2012).

Figura 19. Ubicación de la Laguna Parón respecto al glaciar



Fuente: Google Earth

En la década de los 80 se construyeron un túnel y compuertas en esa laguna para regular su nivel y evitar así una inundación repentina, que podría haber amenazado a los poblados y la infraestructura ubicados en zonas más bajas. Esta construcción fue una adaptación exitosa al cambio climático, pero la posibilidad de regular el flujo natural del agua del embalse dio origen a deseos y prioridades muy distintos por parte de los diferentes agentes sociales interesados, entre los cuales estaban los agricultores de zonas rurales, los residentes urbanos, los promotores turísticos y la empresa hidroeléctrica.

Estas pugnas, que se prolongaron por décadas, propiciaron que se organizara una coalición de grupos de la comunidad local que arrebataría el control del embalse a los intereses externos.

Este suceso habla por sí sólo de la importancia que tienen para las comunidades autóctonas los recursos hídricos disponibles en el callejón de Huaylas, en donde el ciclo hidrológico depende en gran medida de la fusión de los glaciares andinos.

Figura 20. Vista de la Laguna Parón con el Nevado Artesonraju al fondo



Fuente: Untiveros, 2011.

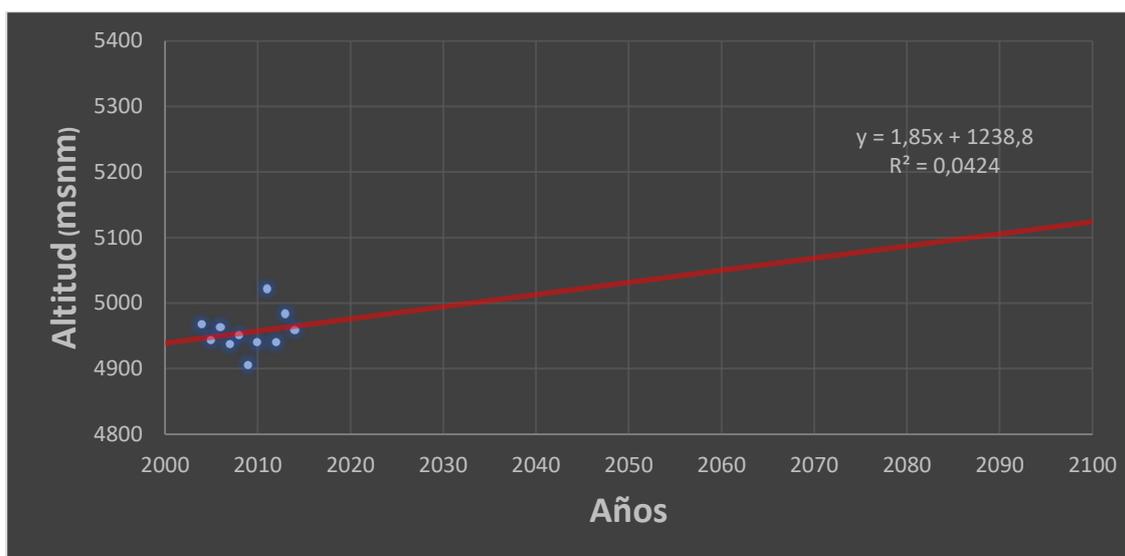
4.4 Pronóstico y posibles líneas de actuación

Los problemas actuales en torno a la disponibilidad del agua, sumados a las proyecciones de retroceso del glaciar en el futuro, las posibles reducciones en las precipitaciones y el crecimiento demográfico continuo en el callejón de Huaylas, requieren que rápidamente se apliquen estrategias de adaptación y mitigación.

La meta principal de tales iniciativas de adaptación debería ser la de reducir la vulnerabilidad de las comunidades locales, que probablemente sean las más afectadas por las repercusiones futuras del cambio climático, reflejado en el retroceso del glaciar.

A través del gráfico de la figura 21, se ha realizado una estimación de la evolución altitudinal de la ELA del glaciar Artesonraju, en base a los datos obtenidos por la medición del balance de masa. El gráfico refleja cómo podría ser su evolución hasta el año 2100, si no se realizaran acciones encaminadas a mitigar los efectos del calentamiento global. En base a esta estimación (no del todo rigurosa ya que únicamente se trabaja con datos de entre los años 2004-2014), la ELA ascendería desde los 4930 msnm en el año 2000 hasta los 5130 msnm en 2100. Esta ascensión de alrededor de 200 metros, habla de un retroceso de masa glaciar continuada, en el que la toma de medidas mitigantes se hace necesaria

Figura 21. Proyección ELA (2000-2100)



Fuente: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (URGH)

Así pues, resulta primordial fortalecer la posición institucional de las autoridades que realizan investigaciones sobre los glaciares y la ordenación del agua. No obstante, los mecanismos institucionales tendrán que incluir una participación significativa de las poblaciones locales afectadas en la ordenación de cuencas hidrográficas para evitar conflictos y la competencia por el agua entre sectores económicos (Lynch, 2012).

5. CONCLUSIONES

Como se ha puesto de manifiesto a lo largo del desarrollo del presente trabajo, los glaciares son un elemento clave en el estudio del calentamiento global, y en especial los glaciares tropicales, ya que cualquier mínima variación de las condiciones climáticas tiene una rápida respuesta en el balance de masa de los glaciares.

Estos glaciares, además de constituir una fuente de información vital del clima y su evolución, funcionan como soporte de recursos hídricos para las comunidades andinas del entorno del Artesonraju, siendo ésta su única fuente de agua. Por otro lado, constituyen también un elemento de riesgo para estas comunidades, siendo focos de desastres naturales asociados a su rápida fusión, desprendimientos de hielo y a posibles crecidas que puedan provocar.

El objetivo general del trabajo era el de evaluar los impactos del calentamiento global en el glaciar durante los años 2004-2014, mediante la realización de un cálculo balance de masa glaciar y ubicación de las ELAs, que han permitido el posterior análisis glaciar y climático y su evolución.

Las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

- La identificación y el cálculo de la superficie glaciar actual ha servido como información de base para el análisis de su evolución. Por medio de imágenes satelitales y en comparación con el resto de años del estudio, se ha podido comprobar como el glaciar ha retrocedido y, por tanto, ha tenido una pérdida de masa.
- La delimitación y el cálculo del área del glaciar por intervalos hipsométricos de 50 metros, con ayuda del MDE, ha servido para poder realizar con exactitud los cálculos del balance de masa del glaciar.
- Los cálculos de balance de masa y de ubicación altitudinal de las ELAs para cada año estudiado, han dotado de consistencia al presente trabajo. Si bien es cierto que no se arrojan unos resultados finales de pérdida para todos los años, hay que tener en cuenta que en este trabajo no se cuantifica la pérdida de hielo originada por la masa de agua sobre la que flota el glaciar, en la que su funde una cantidad considerable de masa glaciar.
- Para la realización de un estudio más completo, hubiera sido necesario la colocación de un mayor número de balizas en zonas de acumulación del glaciar, ya que en el presente trabajo se realizaron únicamente mediciones en zona de

acumulación para 3 años. La obtención de un mayor número de datos, hubiera facilitado la tarea de extrapolación para todos los intervalos hipsométricos del glaciar.

- Una vez comprobada la pérdida de masa del glaciar, se han analizado las posibles consecuencias que esta desglaciación podría acarrear, en un contexto de necesidad vital recursos hídricos para las comunidades del entorno del glaciar. Queda de manifiesto que los riesgos asociados a desastres naturales o el conflicto de intereses en torno al aprovechamiento del agua, deben ser tratados y solucionados tanto por las instituciones locales como nacionales, imponiendo medidas que protejan a la población local y mitiguen en la medida de lo posible los riesgos naturales asociados a la desglaciación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aceituno, P. (1997): *Aspectos generales del clima en el altiplano sudamericano. El Altiplano: ciencia y conciencia de Los Andes*. Actas del Segundo Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos. Santiago, Chile. pp. 63- 69.
- Benn, D. I., Owen, L. A., Osmaston, H. A., Seltzer, G. O., Porter, S. C. y Mark, B. (2005). *Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers*. Quaternary International. Amsterdam, Holanda. pp. 8–21, 138–139.
- Carey, M., A. French y E. O'Brien. (2012). *Unintended effects of technology on climate change adaptation: An historical analysis of water conflicts below Andean glaciers*. Journal of Historical Geography. Amsterdam, Holanda. pp.181–191.
- Francou, B., & Vincent, C., (2007). *Les glaciers à l'épreuve du climat*. IRD Editions et Editions Belin. Paris, Francia. p. 274.
- Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B.G., y Bradley, R.S. (2008). *Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future*. Earth- Science Reviews. París, Francia. pp. 79-96.
- Gutiérrez Elorza, M., (2001). *Geomorfología Climática*. Ediciones Omega. Barcelona.
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza. p. 104.
- Kaser, G., y Osmaston, H. (2002): *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Lynch, B. D. (2012). *Vulnerabilities, competition and rights in a context of climate change toward equitable water governance in Peru's Rio Santa Valley*. Global Environmental Change. Nueva York, EEUU. pp. 364–373.
- Mark, B.G., (2008). *Tracing tropical Andean glaciers over space and time: Some lessons and transdisciplinary implications*. Global and Planetary Change. Columbus, EEUU. pp. 101–114.

- Martín, A. (2014). *Evolución reciente de los glaciares de la vertiente Sur del Nevado Saltancay (Perú)*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Complutense. Madrid.
- Ramage, J. M., Smith, J.A., Rodbell, D. T., and Seltzer, G. O. (2005). *Comparing reconstructed Pleistocene equilibrium-line altitudes in the tropical Andes of Central Peru*. Journal of Quaternary Science. Nueva Jersey, EEUU. p. 20; pp. 777-788.
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni F., Muñoz C., Vuille, M. (2017). *Manual balance de masa glaciar*. University at Albany. Nueva York, EEUU.
- SENAMHI (2017). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Ministerio del Ambiente. Gobierno del Perú. Lima, Perú.
- Sevink J. (2014). *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). Lima, Perú.
- Sharp, M., Richards, K.S., Tranter, M. (1998). *Glacier hydrology and hydrochemistry*. Advances in Hydrological Processes. Wiley Editions. Chichester, Reino Unido.
- Úbeda, J. (2011). *El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (Cordillera Occidental de los Andes Centrales)*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense. Madrid, España.
- Untiveros M. (2011). *Balance hídrico de la Laguna Parón, herramienta para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Santa*. Tesis para la Universidad católica del Perú. Lima, Perú.
- Vuille M. (2013). *El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes Tropicales*. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, EEUU.

ANEXOS

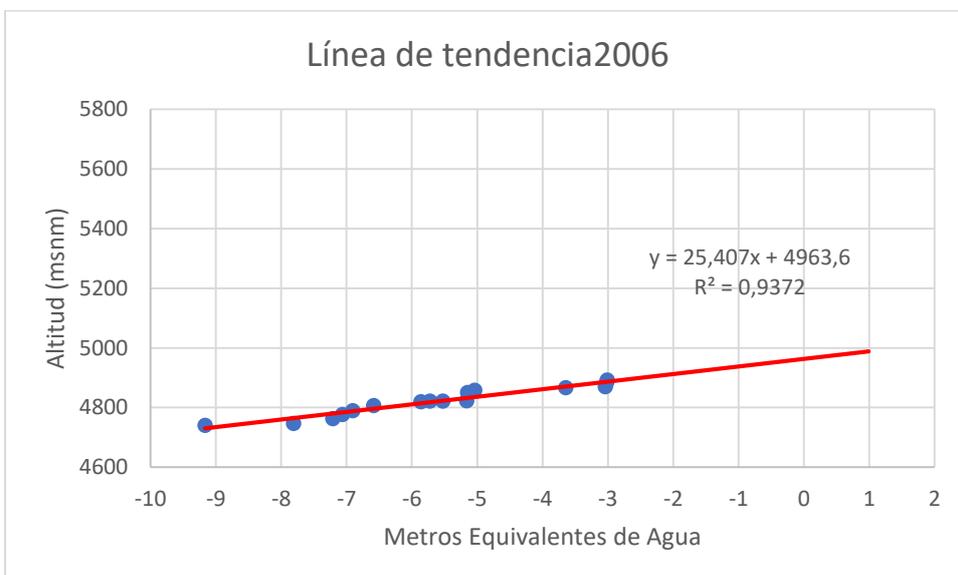
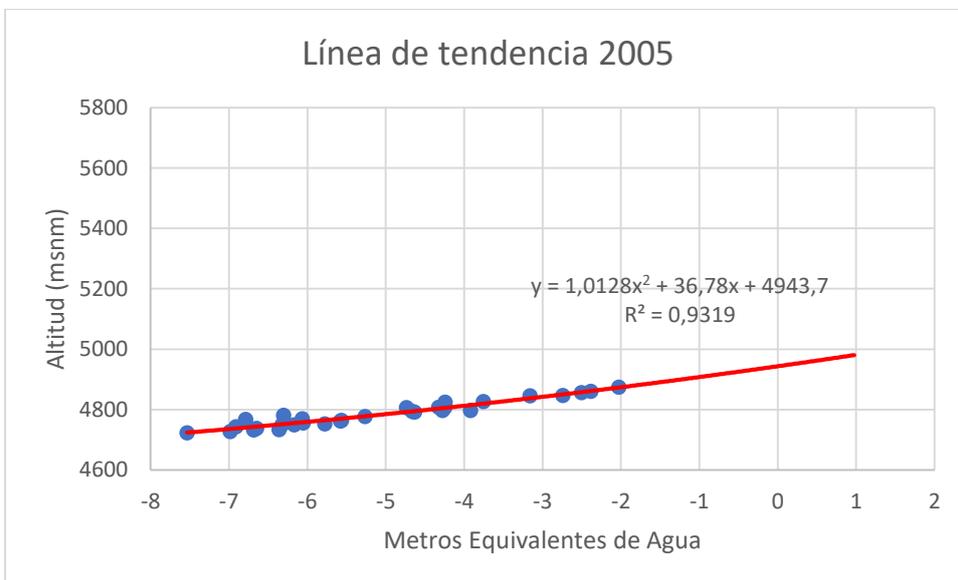
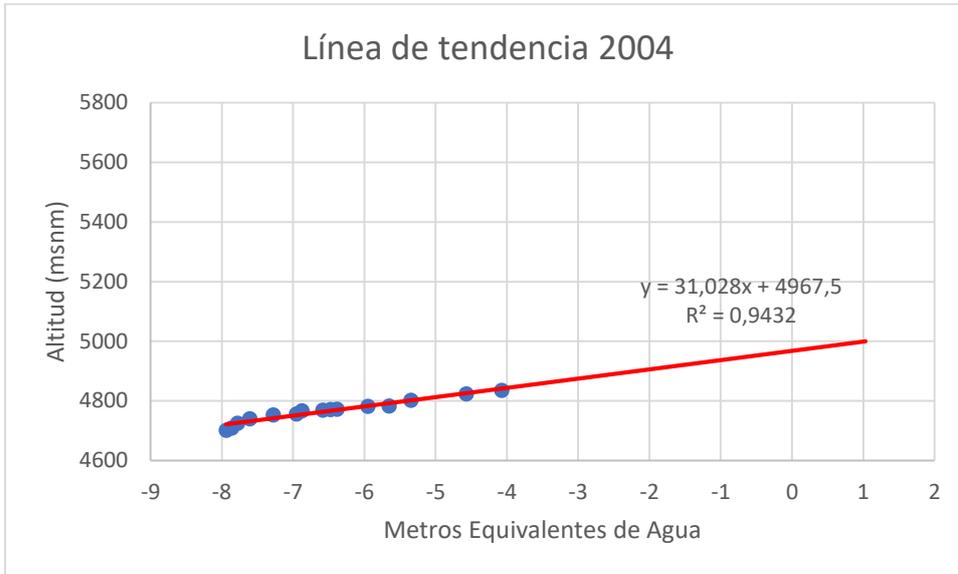
ANEXO 1. MEDICIONES RECOGIDAS DE LAS BALIZAS

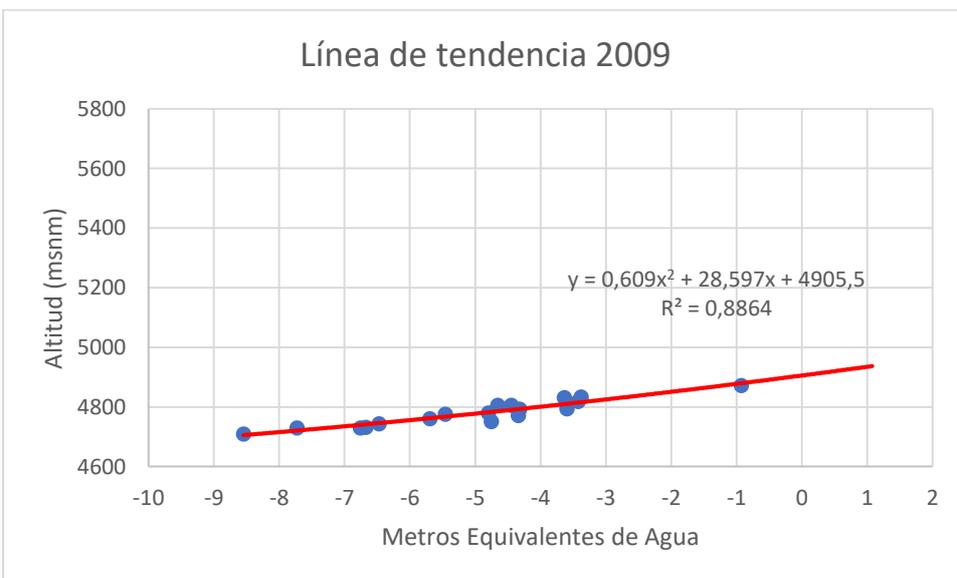
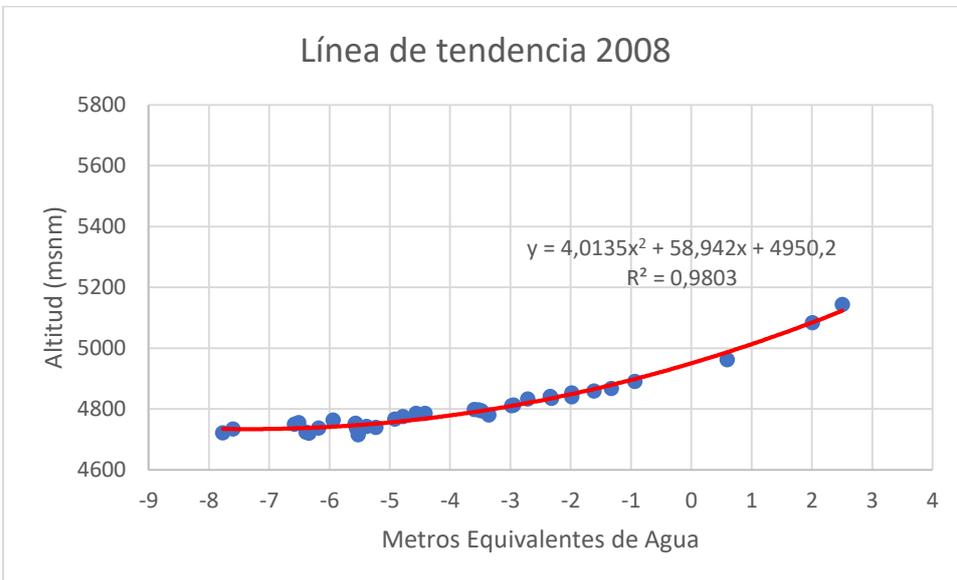
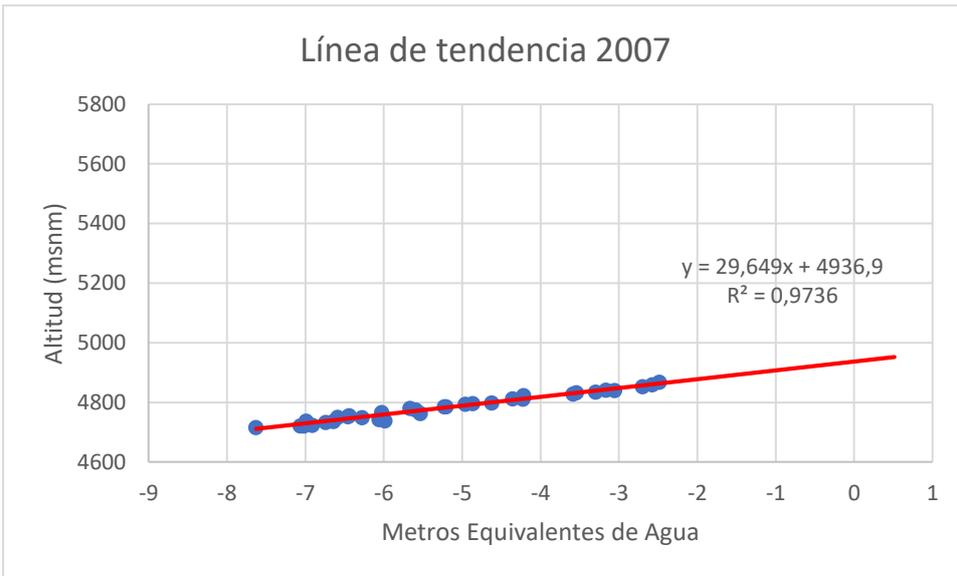
2004		2005		2006		2007	
Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)	Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)	Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)	Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)
-7,94	4702	-7,53	4722	-9,16	4740	-7,02	4721
-7,78	4709	-6,68	4732	-7,81	4747	-6,91	4724
-7,86	4725	-6,65	4737	-7,21	4763	-7,63	4716
-7,60	4740	-6,98	4727	-7,06	4777	-7,06	4721
-7,28	4753	-6,36	4733	-6,91	4790	-6,64	4736
-6,95	4757	-6,17	4749	-6,58	4807	-6,99	4737
-6,47	4767	-5,78	4752	-5,86	4820	-6,74	4733
-6,87	4769	-6,91	4743	-5,72	4822	-6,59	4750
-6,38	4772	-6,32	4749	-5,53	4823	-6,06	4743
-6,58	4772	-6,05	4756	-5,15	4822	-5,98	4739
-5,95	4782	-5,56	4764	-5,04	4850	-6,46	4753
-5,65	4783	-6,78	4768	-5,16	4858	-6,44	4755
-5,35	4802	-6,07	4770	-3,64	4867	-5,53	4763
-4,57	4824	-5,26	4777	-3,04	4870	-6,27	4750
-4,07	4836	-5,57	4762	-3,02	4884	-6,02	4767
		-6,30	4781	-3,01	4892	-5,59	4775
		-4,63	4791			-5,66	4781
		-4,66	4794			-5,23	4785
		-4,28	4797			-5,20	4786
		-3,92	4797			-4,96	4794
		-4,25	4806			-4,86	4797
		-4,32	4808			-4,62	4798
		-4,73	4806			-4,36	4812
		-3,75	4826			-4,22	4811
		-4,24	4824			-3,58	4829
		-2,74	4847			-4,22	4823
		-3,16	4845			-3,29	4835
		-2,50	4856			-3,54	4832
		-2,38	4861			-3,05	4840
		-2,02	4874			-3,17	4841
						-2,70	4853
						-2,58	4859
						-2,49	4868

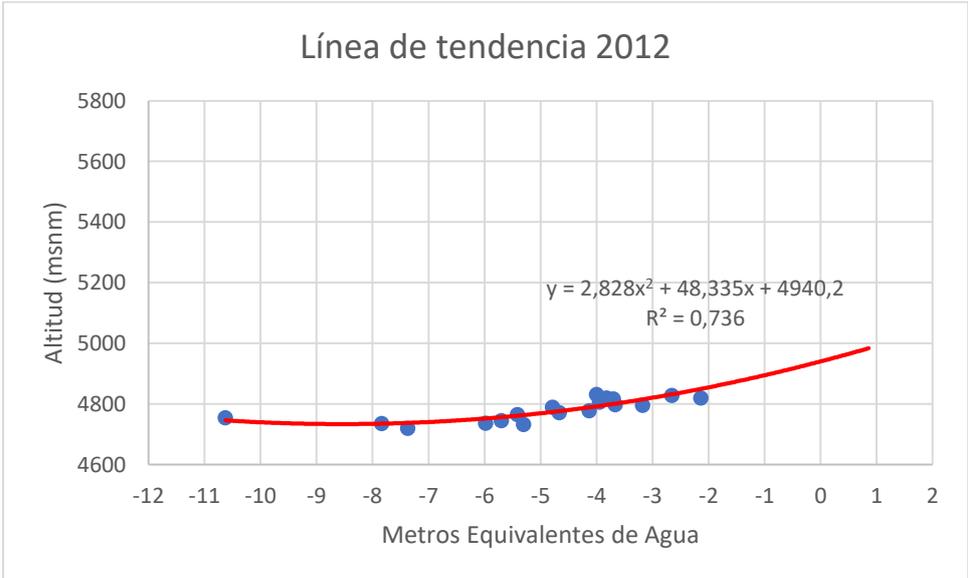
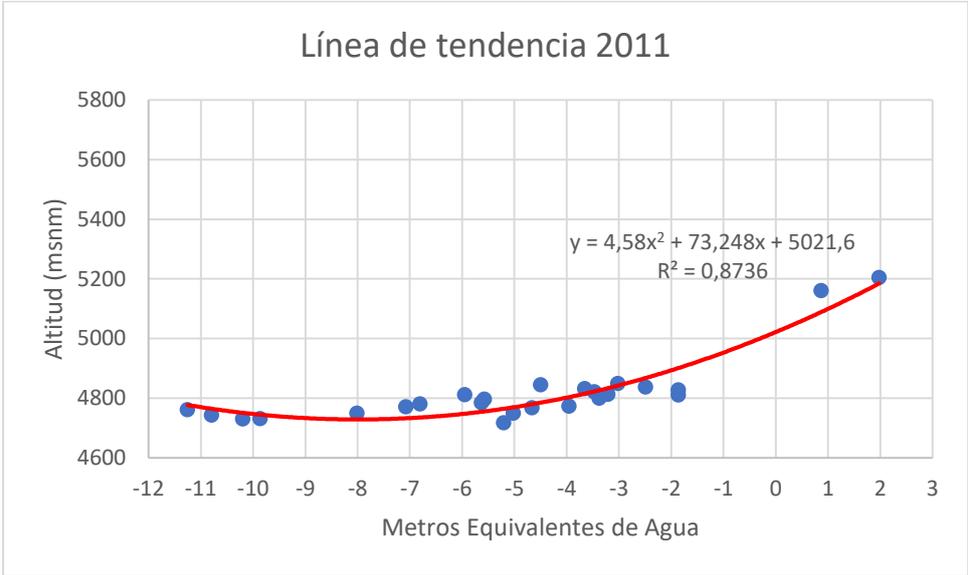
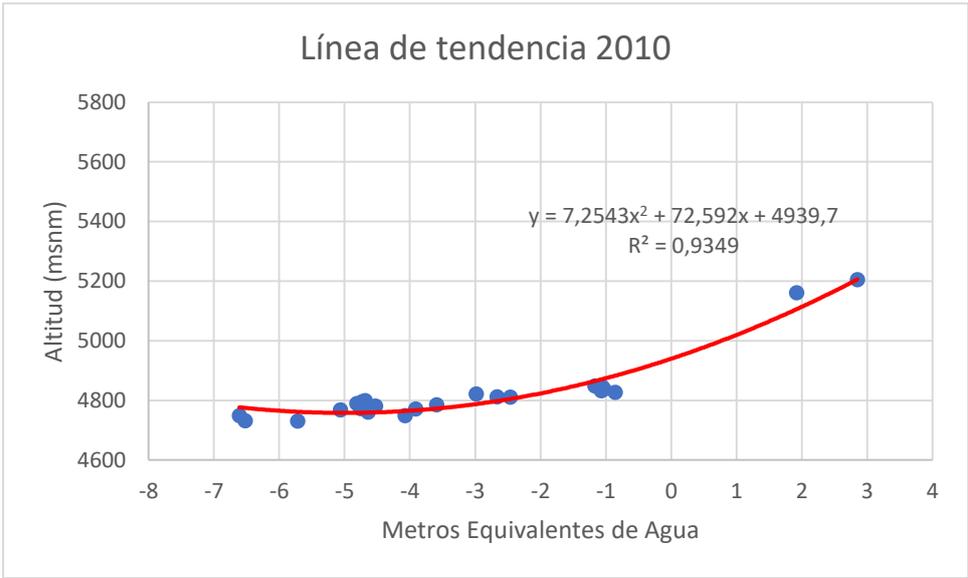
2008		2009		2010		2011	
Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)	Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)	Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)	Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)
-7,77	4721	-6,67	4733	-6,52	4732	-5,21	4718
-6,39	4724	-8,54	4710	-5,72	4731	-9,87	4732
-5,52	4716	-6,76	4730	-6,61	4749	-10,20	4731
-6,34	4721	-7,73	4731	-4,07	4750	-5,02	4749
-5,55	4736	-6,47	4743	-4,64	4761	-8,01	4750
-6,18	4737	-5,69	4761	-5,06	4768	-10,80	4744
-7,60	4733	-4,75	4752	-3,91	4771	-11,26	4761
-6,58	4750	-4,34	4771	-3,59	4785	-4,67	4768
-5,38	4743	-5,45	4776	-4,52	4781	-7,08	4771
-5,23	4739	-4,80	4780	-4,75	4773	-5,63	4785
-5,57	4753	-3,60	4795	-4,81	4790	-6,81	4781
-6,51	4755	-4,32	4794	-4,73	4797	-3,96	4773
-5,94	4763	-4,45	4806	-4,68	4800	-5,57	4797
-5,57	4750	-4,65	4806	-2,66	4812	-3,38	4800
-4,92	4767	-3,42	4819	-2,46	4811	-3,21	4813
-4,78	4775	-3,38	4834	-2,98	4822	-5,95	4812
-3,36	4781	-3,63	4831	-0,85	4828	-1,86	4811
-4,41	4785	-0,92	4872	-1,07	4832	-3,47	4822
-4,57	4786			-1,16	4849	-1,86	4828
-3,48	4794			-1,05	4845	-3,65	4832
-3,53	4797			-1,03	4838	-3,02	4849
-3,60	4798			2,85	5205	-4,50	4845
-2,95	4812			1,92	5161	-2,49	4838
-2,98	4811					1,98	5205
-2,32	4835					0,87	5161
-2,71	4832						
-1,98	4840						
-2,34	4841						
-1,98	4853						
-1,61	4859						
-1,32	4868						
-0,94	4890						
2,50	5144						
2,01	5084						
0,59	4962						

2012		2013		2014	
Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)	Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)	Balance en m. eq Agua	Altitud (msnm)
-7,37	4721	-9,65	4724	-8,03	4718
-5,30	4733	-9,23	4738	-7,91	4731
-5,98	4737	-6,83	4742	-6,72	4732
-7,83	4737	-6,03	4741	-6,83	4745
-5,70	4745	-5,79	4751	-7,34	4757
-4,67	4772	-6,46	4760	-5,95	4766
-5,41	4765	-6,40	4765	-6,75	4762
-10,63	4755	-4,94	4772	-6,91	4772
-4,13	4779	-4,75	4784	-6,92	4777
-4,79	4789	-5,67	4791	-5,90	4793
-3,67	4798	-5,34	4795	-6,82	4790
-3,18	4796	-5,92	4804	-6,33	4799
-3,95	4806	-6,31	4802	-5,66	4810
-3,93	4812	-5,64	4800	-4,43	4827
-3,70	4817	-4,09	4819		
-4,00	4832	-5,04	4824		
-2,65	4829	-4,05	4837		
-2,14	4820	-3,72	4834		
-3,82	4820	-4,01	4826		

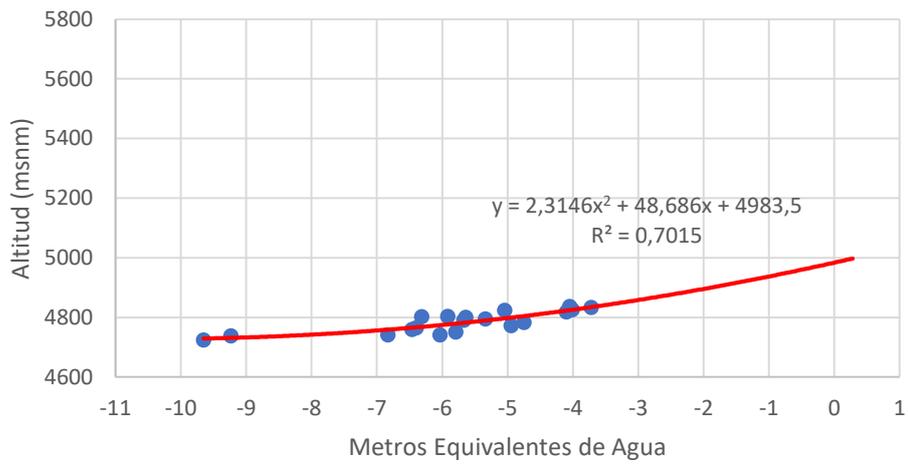
ANEXO 2. GRÁFICOS ANUALES Y LÍNEAS DE TENDENCIA



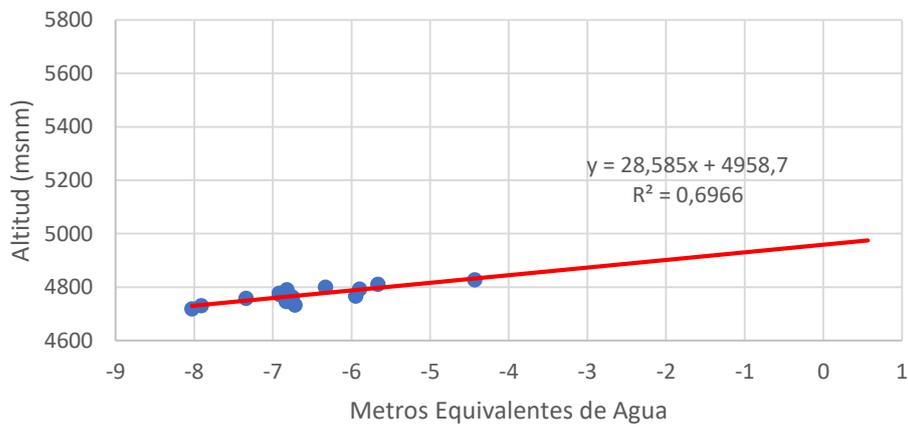




Línea de tendencia 2013



Línea de tendencia 2014



ANEXO 3. CÁLCULOS DE BALANCE DE MASA ANUALES

*Datos de balizas en azul: Mediciones reales.

*Datos de balizas en verde: Mediciones extrapoladas

2004					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m ²)	Balance en m ³
4700	-8,621	-7,960	4700-4750	214.560	- 1.707.990,35
4702,024	-7,937				
4708,927	-7,779				
4724,997	-7,860				
4739,906	-7,605				
4753,233	-7,276	-6,517	4750-4800	305.955	- 1.993.931,91
4756,948	-6,950				
4766,629	-6,474				
4769,035	-6,874				
4771,872	-6,381				
4772,053	-6,583				
4782,173	-5,949				
4783,372	-5,650				
4802,191	-5,345	-4,661	4800-4850	314.441	- 1.465.661,44
4823,592	-4,568				
4836,096	-4,070				
4850	-3,052	-	4850-4900	213.378	- 434.200,01
4900	-2,035	-	4900-4950	210.137	- 213.802,47
4950	-1,017	-	-	-	-
4967,5	0,000	-	-	-	-
5000	0,400	-	4950-5000	175.169	70.114,25
5050	0,801	-	5000-5050	227.427	182.062,72
5100	1,201	-	5050-5100	269.942	324.146,05
5150	1,601	-	5100-5150	260.439	416.979,81
5200	2,001	-	5150-5200	336.320	673.087,79
5250	2,001	-	5200-5250	381.297	763.101,68
5300	2,001	-	5250-5300	352.790	706.049,72
5350	2,001	-	5300-5350	301.472	603.345,39
5400	2,001	-	5350-5400	271.457	543.275,43
5450	2,001	-	5400-5450	201.719	403.706,58
5500	2,001	-	5450-5500	120.415	240.990,33
5550	2,001	-	5500-5550	74.747	149.593,52
5600	2,001	-	5550-5600	44.929	89.917,82
5650	2,001	-	5600-5650	18.681	37.386,87
5700	2,001	-	5650-5700	4.911	9.828,54
5719	2,001	-	5700-5719	1.258	2.517,67
					- 599.482,00

ELA

2005					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m²)	Balance en m³
4700	-8,760				
4722,41	-7,534				
4726,74	-6,982				
4732,31	-6,683				
4733,46	-6,359	-6,929	4700-4750	194.963	-1.350.971,782
4737,17	-6,647				
4742,98	-6,908				
4749,02	-6,168				
4749,43	-6,324				
4752,45	-5,775				
4755,74	-6,052				
4762,05	-5,575				
4763,67	-5,562				
4767,69	-6,785				
4769,73	-6,066	-5,406	4750-4800	301.204	-1.628.191,982
4776,95	-5,264				
4780,88	-6,303				
4791,07	-4,630				
4794	-4,662				
4796,57	-4,277				
4796,57	-3,918				
4806,25	-4,246				
4806,25	-4,732				
4807,76	-4,323				
4823,93	-4,241	-3,885	4800-4850	311.186	-1.209.006,444
4826,21	-3,754				
4844,94	-3,159				
4846,68	-2,740				
4856,09	-2,500				
4860,51	-2,383	-2,303	4850-4900	213378	-491332,4334
4874,43	-2,025				
4900	-1,012	-	4900-4950	210.137	- 212.716,22
4943,7	0,000	-	-	-	0
4950	0,335	-	4900-4950	210.137	70.420,96
5000	0,670	-	4950-5000	175.169	117.405,02
5050	1,005	-	5000-5050	227.427	228.645,52
5100	1,340	-	5050-5100	269.942	361.851,08
5150	1,676	-	5100-5150	260.439	436.390,66
5200	2,011	-	5150-5200	336.320	676.243,91
5250	2,011	-	5200-5250	381.297	766.679,87
5300	2,011	-	5250-5300	352.790	709.360,39
5350	2,011	-	5300-5350	301.472	606.174,49

ELA

5400	2,011	-	5350-5400	271.457	545.822,85
5450	2,011	-	5400-5450	201.719	405.599,56
5500	2,011	-	5450-5500	120.415	242.120,33
5550	2,011	-	5500-5550	74.747	150.294,97
5600	2,011	-	5550-5600	44.929	90.339,45
5650	2,011	-	5600-5650	18.681	37.562,18
5700	2,011	-	5650-5700	4.911	9.874,62
5719	2,011	-	5700-5719	1.258	2.529,48
					565.096,477

2006					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m ²)	Balance en m ³
4700	-10,375				
4740,482	-9,165	-9,116	4700-4750	198.090	- 1.805.833,896
4747,272	-7,809				
4763,112	-7,210				
4777,232	-7,059	-7,058	4750-4800	301.088	- 2.125.044,368
4789,892	-6,905				
4807,112	-6,582				
4819,852	-5,859				
4821,542	-5,526	-5,767	4800-4850	311.186	- 1.794.760,27
4822,052	-5,148				
4822,822	-5,722				
4850,392	-5,162				
4858,162	-5,038				
4867,202	-3,645				
4870,262	-3,038	-3,819	4850-4900	213.378	- 814.822,81
4883,632	-3,019				
4891,942	-3,010				
4900	-2,006				
4950	-1,003	-	4900-4950	210.137	- 210.819,28
4963,6	0,000	0,200	4950-5000	175.169	35.084,06
5000	0,401				
5050	0,801	-	5000-5050	227.427	182.202,61
5100	1,202	-	5050-5100	269.942	324.395,11
5150	1,602	-	5100-5150	260.439	417.300,20
5200	2,003	-	5150-5200	336.320	673.604,97
5250	2,003	-	5200-5250	381.297	763.688,02
5300	2,003	-	5250-5300	352.790	706.592,23
5350	2,003	-	5300-5350	301.472	603.808,98
5400	2,003	-	5350-5400	271.457	543.692,87
5450	2,003	-	5400-5450	201.719	404.016,77
5500	2,003	-	5450-5500	120.415	241.175,50
5550	2,003	-	5500-5550	74.747	149.708,46

ELA

5600	2,003	-	5550-5600	44.929	89.986,91
5650	2,003	-	5600-5650	18.681	37.415,60
5700	2,003	-	5650-5700	4.911	9.836,09
5719	2,003	-	5700-5719	1.258	2.519,61
					- 1.566.252,624

2007					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m ²)	Balance en m ³
4700	-7,990				
4715,53	-7,629				
4720,86	-7,063				
4720,89	-7,020				
4724,00	-6,912				
4733,48	-6,742	-6,846	4700-4750	185.675	-1.271.061,463
4736,40	-6,640				
4737,30	-6,989				
4739,05	-5,983				
4742,62	-6,059				
4749,55	-6,274				
4750,20	-6,588				
4752,82	-6,458				
4755,42	-6,440				
4763,11	-5,533				
4766,84	-6,024				
4774,92	-5,591	-5,598	4750-4800	301.119	-1.685.539,511
4780,63	-5,663				
4785,11	-5,226				
4785,91	-5,204				
4793,85	-4,958				
4796,55	-4,863				
4797,95	-4,623				
4811,02	-4,224				
4812,33	-4,355				
4823,12	-4,215				
4828,58	-3,584	-3,680	4800-4850	311.186	-1.145.052,675
4832,43	-3,542				
4835,03	-3,295				
4840,37	-3,055				
4841,23	-3,167				
4852,92	-2,696				
4859,49	-2,577	-2,586	4850-4900	213.378	- 551.821,82
4867,71	-2,486				
4900	-1,243				
4936,9	0,000	-	-	-	-
					ELA

4950	0,336	-	4900-4950	210.137	70.514,86
5000	0,671	-	4950-5000	175.169	117.561,58
5050	1,007	-	5000-5050	227.427	228.950,41
5100	1,342	-	5050-5100	269.942	362.333,60
5150	1,678	-	5100-5150	260.439	436.972,57
5200	2,013	-	5150-5200	336.320	677.145,65
5250	2,013	-	5200-5250	381.297	767.702,21
5300	2,013	-	5250-5300	352.790	710.306,30
5350	2,013	-	5300-5350	301.472	606.982,80
5400	2,013	-	5350-5400	271.457	546.550,69
5450	2,013	-	5400-5450	201.719	406.140,41
5500	2,013	-	5450-5500	120.415	242.443,19
5550	2,013	-	5500-5550	74.747	150.495,38
5600	2,013	-	5550-5600	44.929	90.459,91
5650	2,013	-	5600-5650	18.681	37.612,27
5700	2,013	-	5650-5700	4.911	9.887,79
5719	2,013	-	5700-5719	1.258	2.532,85
					811.117,000

2008					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m ²)	Balance en m ³
4700	-4,441	-6,153	4700-4750	181.972	- 1.119.629
4715,533	-5,523				
4720,859	-6,337				
4720,888	-7,767				
4724,000	-6,386				
4733,475	-7,597				
4736,404	-5,551				
4737,303	-6,182				
4739,053	-5,228				
4742,617	-5,383				
4749,551	-5,575				
4750,198	-6,579	-4,769	4750-4800	301.061	- 1.435.661
4752,818	-5,567				
4755,420	-6,510				
4763,105	-5,938				
4766,837	-4,917				
4774,916	-4,779				
4780,634	-3,355				
4785,105	-4,414				
4785,913	-4,565				
4793,845	-3,477				
4796,553	-3,529				
4797,953	-3,595				

4811,020	-2,979				
4812,332	-2,947				
4832,434	-2,714	-2,546	4800-4850	313.624	- 798.523,659
4835,032	-2,317				
4840,372	-1,981				
4841,226	-2,338				
4852,924	-1,981				
4859,492	-1,610	-1,462	4850-4900	213.378	- 312.042,29
4867,707	-1,323				
4890,046	-0,935				
4900	-0,908				
4950	-0,003	-	4900-4950	210.137	- 713,19
4950,2	0,000	-			ELA
4962	0,594	0,594	4950-5000	175.169	103.964,55
5000	1,065				
5050	1,537	-	5000-5050	227.427	349.634,90
5084	2,009	2,009	5050-5100	269.942	542.386,36
5100	2,256				
5144	2,503	2,503	5100-5150	260.439	651.982,99
5150	2,503				
5200	2,503	-	5150-5200	336.320	841.943,49
5250	2,503	-	5200-5250	381.297	954.538,91
5300	2,503	-	5250-5300	352.790	883.174,49
5350	2,503	-	5300-5350	301.472	754.705,00
5400	2,503	-	5350-5400	271.457	679.565,45
5450	2,503	-	5400-5450	201.719	504.983,34
5500	2,503	-	5450-5500	120.415	301.446,91
5550	2,503	-	5500-5550	74.747	187.121,64
5600	2,503	-	5550-5600	44.929	112.475,26
5650	2,503	-	5600-5650	18.681	46.766,02
5700	2,503	-	5650-5700	4.911	12.294,20
5719	2,503	-	5700-5719	1.258	3.149,28
					3.263.563,596

2009					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m²)	Balance en m³
4700	-8,856				
4709,664	-8,544				
4729,934	-6,758	-7,504	4700-4750	178.049	- 1.336.096,656
4730,503	-7,727				
4732,666	-6,671				
4743,426	-6,468				
4751,547	-4,753				
4760,888	-5,692				
4771,447	-4,336				
4776,44	-5,455	-4,707	4750-4800	298.649	- 1.405.617,224
4780,405	-4,797				
4793,594	-4,318				
4794,623	-3,596				
4805,704	-4,448				
4805,999	-4,654				
4818,85	-3,420	-3,907	4800-4850	311.186	- 1.215.652,652
4831,405	-3,633				
4834,131	-3,378				
4872,256	-0,923	-0,923	4850-4900	213.378	- 197.006,15
4900	-0,462				
4905,5	0,000		-	-	-
4950	0,338		4900-4950	210.137	70.948,48
5000	0,675		4950-5000	175.169	118.284,49
5050	1,013		5000-5050	227.427	230.358,29
5100	1,351		5050-5100	269.942	364.561,68
5150	1,688		5100-5150	260.439	439.659,63
5200	2,026		5150-5200	336.320	681.309,60
5250	2,026		5200-5250	381.297	772.423,01
5300	2,026		5250-5300	352.790	714.674,16
5350	2,026		5300-5350	301.472	610.715,30
5400	2,026		5350-5400	271.457	549.911,58
5450	2,026		5400-5450	201.719	408.637,88
5500	2,026		5450-5500	120.415	243.934,04
5550	2,026		5500-5550	74.747	151.420,82
5600	2,026		5550-5600	44.929	91.016,17
5650	2,026		5600-5650	18.681	37.843,56
5700	2,026		5650-5700	4.911	9.948,59
5719	2,026		5700-5719	1.258	2.548,43
					1.343.823,032

ELA

2010					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m²)	Balance en m³
4700	-2,173	-5,729	4700-4750	179.408	-1.027.806,455
4730,63	-5,718				
4731,9	-6,518				
4749,43	-6,608				
4749,72	-4,072				
4761,37	-4,639	-4,501	4750-4800	298.649	-1.344.340,214
4768,27	-5,061				
4771,43	-3,911				
4773,28	-4,753				
4781,11	-4,522				
4785,24	-3,587				
4790,3	-4,810				
4796,84	-4,729				
4800	-4,684	-1,660	4800-4850	311.186	- 516.499,910
4811,06	-2,463				
4811,97	-2,661				
4821,55	-2,985				
4827,6	-0,854				
4832,35	-1,070				
4838	-1,029				
4845,43	-1,052				
4849,04	-1,164				
4850	-0,800				
4900	-0,581	-0,581	4850-4900	213.378	- 123.882,222
4939,7	0,000	0,160	4900-4950	210.137	33.621,92
4950	0,320	-	4950-5000	175.169	112.108,16
5000	0,640				
5050	0,960	-	5000-5050	227.427	218.329,92
5100	1,280	-	5050-5100	269.942	345.525,76
5150	1,600	-	5100-5150	260.439	416.702,40
5160,969	1,920	1,920	5150-5200	336.320	645.734,40
5200	2,850	2,850	5200-5250	381.297	1.086.696,45
5205,25	2,850				
5250	2,850	-	5250-5300	352.790	1.005.451,50
5300	2,850	-	5300-5350	301.472	859.195,20
5350	2,850	-	5350-5400	271.457	773.652,45
5400	2,850	-	5400-5450	201.719	574.899,15
5450	2,850	-	5450-5500	120.415	343.182,75

ELA

5550	2,850	-	5500-5550	74.747	213.028,95
5600	2,850	-	5550-5600	44.929	128.047,65
5650	2,850	-	5600-5650	18.681	53.240,85
5700	2,850	-	5650-5700	4.911	13.996,35
5719	2,850	-	5700-5719	1.258	3.585,30
					3.814.470,359

2011					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m²)	Balance en m³
4700	-5,492	-8,184	4700-4750	176.829	- 1.447.150,264
4717,9	-5,205				
4730,63	-10,199				
4731,9	-9,867				
4743,67	-10,797				
4749,43	-5,021				
4749,72	-8,015				
4761,37	-11,255	-6,423	4750-4800	298.649	- 1.918.328,547
4768,27	-4,666				
4771,43	-7,080				
4773,28	-3,956				
4781,11	-6,805				
4785,24	-5,628				
4796,84	-5,574				
4800	-3,376	-3,335	4800-4850	311.186	- 1.037.740,134
4811,06	-1,861				
4811,97	-5,951				
4813,23	-3,209				
4821,55	-3,470				
4827,6	-1,861				
4832,35	-3,654				
4838	-2,490				
4845,43	-4,495	-	4850-4900	213.378	- 386.722,873
4849,04	-3,021				
4850	-2,417	-	4900-4950	210.137	- 253.899,291
4900	-1,812				
4950	-1,208	-	4950-5000	175.169	- 105.824,498
5000	-0,604				
5021,6	0,000	-	-	-	0
5050	0,218	-	5000-5050	227.427	49.465,373
5100	0,435	-	5050-5100	269.942	117.424,770

ELA

5150	0,653	-	5100-5150	260.439	169.936,448
5160,969	0,870	0,870	5150-5200	336.320	292.598,400
5200	1,980				
5205,246	1,980	1,980	5200-5250	381.297	754.968,060
5250	1,980				
5300	1,980	-	5250-5300	352.790	698.524,200
5350	1,980	-	5300-5350	301.472	596.914,560
5400	1,980	-	5350-5400	271.457	537.484,860
5450	1,980	-	5400-5450	201.719	399.403,620
5500	1,980	-	5450-5500	120.415	238.421,700
5550	1,980	-	5500-5550	74.747	147.999,060
5600	1,980	-	5550-5600	44.929	88.959,420
5650	1,980	-	5600-5650	18.681	36.988,380
5700	1,980	-	5650-5700	4.911	9.723,780
5719	1,980	-	5700-5719	1.258	2.490,840
					- 1.008.362,137

2012					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m ²)	Balance en m ³
4700	-5,095	-6,438	4700-4750	181.377	- 1.167.690,398
4720,656	-7,372				
4733,086	-5,304				
4736,537	-7,835				
4737,107	-5,978				
4745,328	-5,701				
4755,422	-10,626	-5,210	4750-4800	299.370	- 1.559.590,938
4765,452	-5,412				
4771,906	-4,666				
4778,54	-4,131				
4789,339	-4,786				
4796,029	-3,178				
4798,017	-3,668	-3,455	4800-4850	313.288	- 1.082.526,180
4806,24	-3,947				
4812,415	-3,929				
4817,465	-3,699				
4820,439	-2,140				
4820,439	-3,821				
4829,023	-2,652	-2,667	4850-4900	213.378	- 284.543,12
4831,954	-4,001				
4850	-2,667				
4900	-1,334	-	4850-4900	213.378	- 284.543,12

4940,2	0,000	-	-	-	-	ELA
4950	0,335	-	4900-4950	210.137	70.469,29	
5000	0,671	-	4950-5000	175.169	117.485,60	
5050	1,006	-	5000-5050	227.427	228.802,45	
5100	1,341	-	5050-5100	269.942	362.099,43	
5150	1,677	-	5100-5150	260.439	436.690,17	
5200	2,012	-	5150-5200	336.320	676.708,04	
5250	2,012	-	5200-5250	381.297	767.206,07	
5300	2,012	-	5250-5300	352.790	709.847,26	
5350	2,012	-	5300-5350	301.472	606.590,53	
5400	2,012	-	5350-5400	271.457	546.197,48	
5450	2,012	-	5400-5450	201.719	405.877,94	
5500	2,012	-	5450-5500	120.415	242.286,51	
5550	2,012	-	5500-5550	74.747	150.398,12	
5600	2,012	-	5550-5600	44.929	90.401,45	
5650	2,012	-	5600-5650	18.681	37.587,96	
5700	2,012	-	5650-5700	4.911	9.881,40	
5719	2,012	-	5700-5719	1.258	2.531,22	
1.366.710,287						

2013					
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m ²)	Balance en m ³
4700	-7,071	-7,936	4700-4750	188.005	- 1.492.077,618
4724,302	-9,653				
4738,486	-9,233				
4741,276	-6,032				
4742,113	-6,828				
4750,930	-5,790	-5,621	4750-4800	298.929	- 1.680.221,575
4760,457	-6,459				
4764,847	-6,396				
4772,290	-4,945				
4783,891	-4,747				
4791,223	-5,669				
4794,994	-5,340				
4800,391	-5,637				
4802,454	-6,311	-4,847	4800-4850	315.486	- 1.529.076,644
4803,792	-5,915				
4819,135	-4,095				
4824,486	-5,043				
4826,015	-4,010				
4833,655	-3,717				
4836,841	-4,046				
4850	-3,034				

4900	-2,023	-	4850-4900	213.378	-	431.610,35	
4950	-1,011	-	4900-4950	210.137	-	212.527,31	
4983,5	0,000	-	-	-	-	-	ELA
5000	0,399	-	4950-5000	175.169		69.893,23	
5050	0,798	-	5000-5050	227.427		181.488,81	
5100	1,197	-	5050-5100	269.942		323.124,25	
5150	1,596	-	5100-5150	260.439		415.665,37	
5200	1,995	-	5150-5200	336.320		670.966,04	
5250	1,995	-	5200-5250	381.297		760.696,17	
5300	1,995	-	5250-5300	352.790		703.824,06	
5350	1,995	-	5300-5350	301.472		601.443,48	
5400	1,995	-	5350-5400	271.457		541.562,88	
5450	1,995	-	5400-5450	201.719		402.433,98	
5500	1,995	-	5450-5500	120.415		240.230,66	
5550	1,995	-	5500-5550	74.747		149.121,96	
5600	1,995	-	5550-5600	44.929		89.634,37	
5650	1,995	-	5600-5650	18.681		37.269,02	
5700	1,995	-	5650-5700	4.911		9.797,56	
5719	1,995	-	5700-5719	1.258		2.509,74	
						-	145.851,911

2014						
Altitud balizas	m. agua	Promedio	altitud	área (m²)	Balance en m³	
4700	-9,05					
4717,922	-8,03					
4730,677	-7,91	-7,71	4700-4750	167.914	-	1.294.117,52
4732,136	-6,72					
4745,459	-6,83					
4757,236	-7,34					
4762,436	-6,75					
4765,567	-5,95					
4771,676	-6,91	-6,61	4750-4800	298.649	-	1.975.322,97
4776,869	-6,92					
4790,388	-6,82					
4792,597	-5,90					
4798,953	-6,33					
4809,855	-5,66					
4826,676	-4,43	-5,05	4800-4850	311.186	-	1.570.831,14
4850	-3,32					
4900	-2,22	-	4850-4900	213.378	-	472.853,12
4950	-1,11	-	4900-4950	210.137	-	232.835,47
4958,62	0,00	-	-	-	-	ELA
5000	0,40	-	4950-5000	175.169		70.236,90
5050	0,80	-	5000-5050	227.427		182.381,22

5100	1,20	-	5050-5100	269.942	324.713,10
5150	1,60	-	5100-5150	260.439	417.709,26
5200	2,005	-	5150-5200	336.320	674.265,28
5250	2,005	-	5200-5250	381.297	764.436,63
5300	2,005	-	5250-5300	352.790	707.284,87
5350	2,005	-	5300-5350	301.472	604.400,87
5400	2,005	-	5350-5400	271.457	544.225,82
5450	2,005	-	5400-5450	201.719	404.412,81
5500	2,005	-	5450-5500	120.415	241.411,91
5550	2,005	-	5500-5550	74.747	149.855,22
5600	2,005	-	5550-5600	44.929	90.075,12
5650	2,005	-	5600-5650	18.681	37.452,28
5700	2,005	-	5650-5700	4.911	9.845,73
5719	2,005	-	5700-5719	1.258	2.522,08
				-	320.731