UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”

FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

“RELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y LA FUSIÓN GLACIAR DE LA ZONA DE ABLACIÓN Y ACUMULACIÓN DEL GLACIAR ARTESONRAJU Y LA ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA APORTADO A LA MICROCUENCA, PARA LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2004 AL 2016”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR
Bach. **DENNYS DANIEL ROJAS TOLEDO**

ASESOR
Ing. **RICARDO RAY VILLANUEVA RAMÍREZ**

Huaraz, Ancash, Perú

Abril, 2018

UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”

FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

“RELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y LA FUSIÓN GLACIAR DE LA ZONA DE ABLACIÓN Y ACUMULACIÓN DEL GLACIAR ARTESONRAJU Y LA ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA APORTADO A LA MICROCUENCA, PARA LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2004 AL 2016”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR
Bach. **DENNYS DANIEL ROJAS TOLEDO**

ASESOR
Ing. **RICARDO RAY VILLANUEVA RAMÍREZ**

Huaraz, Ancash, Perú

Abril, 2018

ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS

Los Miembros del Jurado en pleno que suscriben, reunidos en la fecha, en el Auditórium de la FCAM-UNASAM, de conformidad a la normatividad vigente conducen el Acto Académico de Sustentación y Defensa de la Tesis **RELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y LA FUSIÓN GLACIAR DE LA ZONA DE ABLACIÓN Y ACUMULACIÓN DEL GLACIAR ARTESONRAJU Y LA ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA APORTADO A LA MICROCUENCA, PARA LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2004 AL 2016**, que presenta el Bachiller **DENNYS DANIEL ROJAS TOLEDO** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental**.

En seguida, después de haber atendido la exposición oral y escuchada las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, lo declaramos:

APROBADO

con el calificativo de: Dieciseis (16)

En consecuencia, el Bachiller **DENNYS DANIEL ROJAS TOLEDO** queda expedito para que el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" apruebe el otorgamiento de su **Título Profesional de Ingeniero Ambiental** de conformidad al Art. 113 numeral 113.9 del Reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario Nº 399-2015-UNASAM), el Art. 48º del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario – Rector Nº 761-2017-UNASAM) y el Art. 160º del Reglamento de Gestión de la Programación, Ejecución y Control de las Actividades Académicas (Resolución de Consejo Universitario – Rector Nº 232-2017-UNASAM).

Huaraz, 17 de Abril de 2018

MSc. **ALFREDO WALTER REYES NOLASCO**
Presidente
Jurado de Sustentación

Ing. **FRIDA MÓNICA CABALLERO BEDRIÑANA**
Secretario
Jurado de Sustentación

Ing. **HELDER EDEGARDO MALLQUI MEZA**
Vocal
Jurado de Sustentación

Ing. **RICARDO RAY VILLANUEVA RAMIREZ**
Asesor de Tesis
Ausente

DEDICATORIA

A mi madre, por ser un manantial lleno de sabiduría.

A mis amigos, por haberme ayudado a descubrir mis fortalezas y mis debilidades, lo cual me ayudó a ser una mejor persona.

A mis colegas, por ayudarme a potenciar mis conocimientos en Ingeniería Ambiental, especialmente en estudios de impacto ambiental y seguridad y salud ocupacional.

A todos ellos porque sin su ayuda no lo hubiera podido concretar.

Dennys Daniel Rojas Toledo

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por haberme inculcado amor, valores, ética, profesionalismo, disciplina, perseverancia y optimismo.

A mi tía Antonieta Toledo Rodríguez y a mi tío Colombino Ardiles Figueroa por apoyarme de manera incondicional durante toda la etapa de la tesis.

A mi hermano, por enseñarme a valorar aún lo poco que uno consigue en la vida.

A mis dos colegas de la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua, Rolando Cruz Encarnación y Juan Carlos Zegarra Vargas, quienes generosamente me ayudaron con los trámites de los datos de las variables meteorológicas y de balance neto de masa.

Al Ing. Alejo Cochachin Rapre, quien me autorizó la utilización de los datos meteorológicos y de balance neto de masa con fines de investigación.

Al Ing. Met. Rafael Ramón Figueroa Tauquino y al Ing. Ricardo Ray Villanueva Ramírez, quienes de manera incondicional me asesoraron durante todas las etapas del presente proyecto.

Al Vocalista y Estadista del grupo musical ALIGOL César Aponte Aranda, por apoyarme en toda la parte estadística del proyecto de investigación.

A mis tres jurados, quienes fueron muy críticos y minuciosos, para que el presente trabajo de investigación quede de manera impecable.

Finalmente, debo agradecer a Dios por darme la oportunidad de vencer dos pruebas previas antes de la aprobación del presente proyecto de investigación.

RESUMEN

El presente estudio de investigación tuvo como objetivo determinar una relación simple entre cada una de las variables meteorológicas con la fusión glaciar (relación expresada en balance neto de masa, a escala anual), y una relación múltiple entre dos o más variables meteorológicas con la fusión glaciar dependiendo de la data disponible, y por último una estimación del volumen total de agua aportado a la microcuenca Parón debido a la fusión glaciar.

Para el desarrollo de la investigación se trabajó con cinco variables meteorológicas (variables independientes) y una variable de balance neto de masa (variable dependiente), y para relacionar ambas se utilizó la metodología de una regresión simple y una regresión lineal múltiple.

Los resultados obtenidos fueron, primero, el de quince ecuaciones de regresiones simples donde el coeficiente de determinación R^2, que tuvo un valor más cercano a 1 fue en una regresión simple polinomial de grado seis, en comparación con las demás regresiones simples (lineal o logarítmica); segundo, se obtuvo una ecuación de regresión lineal múltiple, donde la fusión glaciar se explica de manera conjunta con las cinco variables meteorológicas, cuyo coeficiente de determinación fue de $R^2 = 0.516$. Y por último se obtuvo el volumen estimado de agua aportado a la microcuenca para el periodo 2004 al 2016, el cual fue de 58, 992, 682.00 m^3 de agua.

Palabras claves: Variables meteorológicas, fusión glaciar, regresión simple, regresión lineal múltiple.

ABSTRACT

The objective of this research study was to determine a simple relation between each of the meteorological variables with glacial fusion (expressed as a net mass balance, on an annual scale), and a multiple relationship between two or more meteorological variables with glacial fusion depending on the available data, and finally an estimate of the total volume of water contributed to the Parón microbasin due to glacial fusion.

For the development of the research we worked with five meteorological variables (independent variables) and a net mass balance variable (dependent variable), and to relate both we used the methodology of a simple regression and a multiple linear regression.

The results obtained were first that of fifteen simple regression equations where the determination coefficient R^2 that had a value closer to 1 was in a simple polynomial regression of grade six, in comparison with the other simple regressions (linear or logarithmic), the second one obtained a multiple linear regression equation, where the glacial fusion is explained in conjunction with the five meteorological variables, whose coefficient of determination was R^2 = 0.516. And finally, the estimated volume of water contributed to the microbasin for the period 2004 to 2016 was obtained, which was 58, 992, 682.00 m3 of water.

Keywords: Meteorological variables, glacial melting, simple regression, multiple linear regression.

ÍNDICE

CONTENIDO	Pág.
ACTA DE SUSTENTACIÓN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE GRÁFICAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS o SIGLAS o SÍMBOLOS	xi
CAPÍTULO I	**1**
INTRODUCCIÓN	**1**
1.1. Planteamiento del problema	3
1.1.1. Formulación del problema	3
1.2. Hipótesis	4
1.2.1. Hipótesis general	4
1.2.2. Hipótesis específicas	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Fundamentación	5
1.4.1. Justificación	5
1.4.2. Importancia	6
1.4.3. Contribución científica	6
CAPÍTULO II	**7**
MARCO REFERENCIAL	**7**
2.1. Antecedentes	7
2.2. Bases teóricas	11
2.2.1. Variables meteorológicas y fusión glaciar	11
2.2.2. Temperatura del aire y fusión glaciar	11
2.2.3. Humedad relativa (HR) y fusión glaciar	12

2.2.4. Precipitación y fusión glaciar 13
2.2.5. Radiación solar y fusión glaciar 13
2.2.6. Velocidad del viento y fusión glaciar 14
2.2.7. Fenómeno de EL NIÑO y LA NIÑA 14
2.2.8. Regresión simple y múltiple 15
2.2.9. Correlación 15
2.2.10. Coeficiente de correlación *r* ó *R* 15
2.2.11. Coeficiente de determinación r^2 o R^2 17
2.2.12. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk 18
2.3. Definición de términos 18
2.3.1. Temperatura del aire 18
2.3.2. Humedad relativa 19
2.3.3. Precipitación 19
2.3.4. Radiación solar 19
2.3.5. Velocidad del viento 20
2.3.6. Nieve 20
2.3.7. Fusión de nieve 20
2.3.8. Fusión glaciar 21
2.3.9. Acumulación 21
2.3.10. Ablación 21
2.3.11. Línea de equilibrio 21
2.3.12. Balance de masa 22
2.3.13. Equivalente nieve agua *SWE* 22
2.3.14. Régimen anual 22
2.3.15. Año hidrológico 23
2.3.16. Advección 23
2.3.17. Albedo 23

CAPÍTULO III 24
METODOLOGÍA 24
3.1. Ubicación del glaciar Artesonraju 24
3.1.1. Ubicación política 24
3.1.2. Ubicación geográfica 26
3.1.3. Ubicación satelital 26
3.2. Ubicación de estaciones meteorológicas 28
3.3. Limitaciones 30
3.4. Diseño 31

3.4.1. Insumos para regresiones simples 31
3.4.2. Insumos para regresión lineal múltiple 32
3.4.3. Insumos para la estimación del volumen de agua aportado a la microcuenca Parón 32
3.5. Pretratamiento de datos 32
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos 33
3.6.1. Procesamiento 33
3.6.2. Análisis 36

CAPÍTULO IV 38
RESULTADOS Y DISCUSIONES 38
4.1. Resultados 38
4.1.1. Regresiones simples 38
4.1.2. Regresión lineal múltiple 47
4.1.3. Balance neto de masa (fusión glaciar) observado y estimado 49
4.1.4. Volumen de agua estimado aportado a la microcuenca Parón 50
4.2. Discusión de resultados 51
4.2.1. Regresiones simples 51
4.2.2. Humedad relativa y fusión glaciar 52
4.2.3. Precipitación y fusión glaciar 52
4.2.4. Velocidad del viento y fusión glaciar 53
4.2.5. LA NIÑA y el balance neto de masa 53
4.2.6. Regresión lineal múltiple 53
4.2.7. Balance neto de masa (fusión glaciar) observado y estimado 54
4.2.8. Volumen de agua aportado a la microcuenca Parón 54

CAPÍTULO V 55
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 55
5.1. Conclusiones 55
5.2. Recomendaciones 57

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 59

ANEXOS 62
PANEL FOTOGRÁFICO 62

LISTA DE TABLAS

CONTENIDO **Pág.**

Tabla 1	Data disponible de variables meteorológicas y de balance neto de masa	30
Tabla 2	Tipos de regresiones simples aplicadas a las 2 variables	31
Tabla 3	Insumos para regresión lineal múltiple y relación resultante	32
Tabla 4	Insumos para la estimación del volumen de agua aportado a la microcuenca Parón	32
Tabla 5	Data completada con la Función Pronóstico Software Excel 2017	33
Tabla 6	Artificio de logaritmo natural a la radiación solar incidente	34
Tabla 7	Áreas del glaciar Artesonraju por cada año hidrológico	35
Tabla 8	Balance neto de masa expresado en “m eq agua” por cada año hidrológico	36
Tabla 9	Resumen de resultados de regresiones simples	46
Tabla 10	Resultados de prueba de normalidad	47
Tabla 11	Resultado de las constantes que acompañan a cada variable en la ecuación de regresión lineal múltiple, y coeficiente de determinación	48
Tabla 12	Balance neto de masa (fusión glaciar) observado y estimado	49
Tabla 13	Volumen de agua estimado aportado a la microcuenca Parón por año hidrológico	50

LISTA DE FIGURAS

CONTENIDO **Pág.**

Figura 1	Ejemplos de correlación positiva, correlación negativa y ninguna	17
Figura 2	Ubicación política del glaciar Artesonraju	25
Figura 3	Zona de ablación y acumulación del glaciar Artesonraju	27
Figura 4	Mapa de estaciones meteorológicas	29

LISTA DE GRÁFICAS

CONTENIDO **Pág.**

Gráfica 1	Balance observado y calculado	9
Gráfica 2	Regresión Simple Lineal entre la Temperatura Mínima y el Balance Neto de masa (Fusión Glaciar)	38
Gráfica 3	Regresión Simple Logarítmica entre la Temperatura Mínima y el Balance Neto de masa (Fusión Glaciar)	39
Gráfica 4	Regresión Simple Polinomial entre la Temperatura Mínima y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	39
Gráfica 5	Regresión Simple Lineal entre la Humedad Relativa Máxima y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	40
Gráfica 6	Regresión Simple Logarítmica entre la Humedad Relativa Máxima y el balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	40
Gráfica 7	Regresión Simple Polinomial entre la Humedad Relativa Máxima y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	41
Gráfica 8	Regresión Simple Lineal Entre la Precipitación y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	41
Gráfica 9	Regresión Simple Logarítmica entre la Precipitación y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	42
Gráfica 10	Regresión Simple Polinomial entre la Precipitación y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	42
Gráfica 11	Regresión Simple Lineal entre la Radiación Solar Incidente y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	43
Gráfica 12	Regresión Simple Logarítmica entre la Radiación Solar Incidente y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	43
Gráfica 13	Regresión Simple Polinomial entre la Radiación Solar Incidente y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	44
Gráfica 14	Regresión Simple Lineal entre la Velocidad del Viento y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	44
Gráfica 15	Regresión Simple Logarítmica entre la Velocidad del Viento y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	45
Gráfica 16	Regresión Simple Polinomial entre la Velocidad del Viento y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar)	45
Gráfica 17	Balance neto de masa (fusión glaciar) observado y estimado	49

LISTA DE ABREVIATURAS o SIGLAS o SIMBOLOS

ANA Autoridad Nacional del Agua.

ELA Altitud de la línea de equilibrio (*equilibrium line altitude*).

ENSO El Niño. Oscilación del Sur.

RS Regresión Simple.

RSI Radiación Solar Incidente.

RLM Regresión Lineal Múltiple.

UGRH Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los glaciares de montaña son uno de los componentes de la criósfera y son conocidos por su alta sensibilidad a los cambios climáticos a escala aproximada de diez años. Dada su rapidez de respuesta a estos cambios, se los podría calificar de "centinelas del clima". La razón principal proviene del origen de los volúmenes de hielo que forman y que son el resultado de las precipitaciones sólidas. Los glaciares registran sus variaciones de un año para otro. La segunda razón proviene de la ablación, proceso por el cual el glaciar pierde nieve y hielo. La ablación depende directamente del balance de energía en la superficie, el cual es el vínculo físico existente entre el glaciar y el clima. (Francou *et al*, 2000)

Los glaciares constituyen un sistema muy dinámico dirigido por el balance de masa. La pérdida o ganancia de masa está en relación con la acumulación anual, esto es, con las precipitaciones (precipitación nival) y las temperaturas, que hacen variar anualmente la Altitud de la Línea de Equilibrio glaciar (ELA). La ELA señala la altitud a la cual el balance de masa es igual a 0, y también indica que el glaciar pasa de la dinámica de acumulación a la de ablación (zona del glaciar donde sucede la fusión) (Serrano, 2005).

La zona de estudio fue el glaciar Artesonraju, el cual políticamente se encuentra ubicado en el distrito de Caraz, provincia de Huaylas, del departamento de Ancash. Geográficamente, se encuentra a 8° 57.48' Latitud Sur y a 77° 37.58' Longitud Oeste, forma parte de la subcuenca del río Llullán, el que a su vez drena sus aguas al Río Santa, y cuenta con una superficie glaciar de 5.70 Km^2, y su altitud promedio es de 5,400 msnm. Para el estudio glaciológico del glaciar Artesonraju, se cuenta con una red de balizas instaladas sobre su superficie la zona de ablación, cuatro estaciones meteorológicas, dos ubicadas en las morrenas del glaciar Artesonraju, denominadas

AP1 y AP2, las cuales registran datos de precipitación y humedad relativa respectivamente; una estación meteorológica ubicada en la entrada de la laguna Parón, denominada estación Artesoncocha, que registra datos de temperatura; y una estación meteorológica ubicada en la zona de ablación del glaciar Artesonraju, que registra datos de radiación solar y velocidad del viento; también se cuenta con una red de control topográfico de precisión que permite evaluar los movimientos de la superficie del glaciar. La fusión del glaciar Artensonraju se determina por medio de un balance neto de masa entre la zona de ablación donde se han instalado 24 balizas distribuidas en un rango altitudinal de 4,700 a 5,600 msnm, y la zona de acumulación donde se realizaron 3 pozos de acumulación distribuidos en un rango altitudinal de 5,081 a 5,236 msnm. El glaciar Artesonraju para el año hidrológico 2004 – 2005 experimentó una pérdida de masa glaciar de -1,547.51 mm eq agua (milímetros equivalentes de agua, unidad de medida del balance neto de masa, con el cual se expresa la fusión glaciar) y su tendencia en las mediciones de los siguientes años hidrológicos es por lo general negativa, es decir, siempre se pierde masa glaciar debido a la fusión (ANA-UGRH-HUARAZ, 2014).

A su vez, Rosenzweig, *et al,* (2007) menciona que con el cambio climático se está experimentando un retroceso glaciar a gran escala (producto de la fusión glaciar) en toda la Cordillera Blanca en los últimos 5,000 años, y esto se evidencia con la formación y crecimiento, cada vez más acelerado, de lagunas en las últimas décadas.

La consecuencia final de la fusión glaciar es un aporte adicional de agua y aumento del caudal de las aguas que se vierten a la microcuenca Parón. La ecuación que se obtuvo de manera estadística, donde la fusión glaciar se explica por medio de 5 variables meteorológicas, permitirá estimar el volumen de agua adicional que se vierte a la microcuenca Parón, para que de esa manera se tomen medidas preventivas debido a un incremento del caudal de las aguas de la microcuenca Parón.

El presente trabajo de investigación, tuvo como objetivo determinar una relación entre las variables meteorológicas y la fusión glaciar, del glaciar Artesonraju, para los años hidrológicos 2004 al 2016, para lo cual se relacionó de manera lineal, logarítmica y polinómica la temperatura del aire, la humedad relativa, la precipitación, la radiación solar y la velocidad del viento, con la fusión glaciar, mediante regresiones simples; y una relación de todas las variables meteorológicas de manera conjunta con la fusión glaciar, mediante una regresión lineal múltiple. Y como consecuencia de la fusión glaciar se estimó el volumen de agua aportado a la microcuenca Parón.

1.1. Planteamiento del problema

Según la ANA-UGRH-HUARAZ, (2014) en su informe anual, menciona que la fusión del glaciar Artesonraju expresada en balance neto de masa, casi siempre tiene un valor negativo, indicando esto, que siempre se pierde masa glaciar por fusión en cada año hidrológico (1^{ero} de setiembre al 31 de agosto), debido principalmente a la influencia de las variables meteorológicas. Concordante con este tema, Orosco (2014) menciona que las distintas variables meteorológicas (principalmente precipitación, temperatura, radiación, humedad relativa y viento) condicionan de forma muy marcada la persistencia de la nieve y la sucesión de diversos ciclos de fusión a lo largo del año, en un determinado glaciar.

La consecuencia final de la fusión glaciar es la contribución hídrica a la cuenca o microcuenca. Al respecto, Torres, Brenning, & García (2013) mencionan que hay una contribución de agua de millones de m^3, generada por la pérdida de masa glaciar (producto de la fusión glaciar).

Los dos problemas mencionados en los párrafos anteriores, plantean los siguientes temas de investigación: primero que existe un vínculo (relación) entre la fusión glaciar y las variables meteorológicas, y segundo que la contribución hídrica se puede estimar en función de la fusión glaciar (expresada en balance neto de masa). Estos dos temas de investigación fueron los objetivos del presente trabajo de investigación.

1.1.1. Formulación del problema

Formulación general

¿Cuál es la relación existente entre las variables meteorológicas y la fusión glaciar, cuánto es su coeficiente de determinación R^2, y cuántos m^3 de agua se aporta a la microcuenca Parón producto de la fusión glaciar?

Formulaciones específicas

¿Cuál es la relación entre la temperatura mínima del aire y la fusión glaciar, y cuánto es su coeficiente de determinación R^2?

¿Cuál es la relación entre la humedad relativa máxima y la fusión glaciar, y cuánto es su coeficiente de determinación R^2?

¿Cuál es la relación entre la precipitación acumulada y la fusión glaciar, y cuánto es su coeficiente de determinación R^2?

¿Cuál es la relación entre la radiación solar incidente y la fusión glaciar, y cuánto es su coeficiente de determinación R^2?

¿Cuál es la relación entre la velocidad del viento y la fusión glaciar, y cuánto es su coeficiente de determinación R^2?

¿Cuánto es el volumen de agua estimado que se aporta a la microcuenca Parón?

1.2. Hipótesis

1.2.1. Hipótesis general

La relación entre las variables meteorológicas y la fusión glaciar es lineal múltiple con un coeficiente de determinación $R^2 > 0.50$. Y el volumen estimado de agua aportado a la microcuenca Parón sobrepasa el millón de m^3 por cada año hidrológico.

1.2.2. Hipótesis específicas

La relación entre la temperatura mínima del aire y la fusión glaciar es no lineal, con un coeficiente de determinación $R^2 > 0.50$.

La relación entre la humedad relativa máxima y la fusión glaciar es no lineal, con un coeficiente de determinación $R^2 > 0.50$.

La relación entre la precipitación acumulada y la fusión glaciar es no lineal, con un coeficiente de determinación $R^2 > 0.50$.

La relación entre la radiación solar incidente y la fusión glaciar es no lineal, con un coeficiente de determinación $R^2 > 0.50$.

La relación entre la velocidad del viento y la fusión glaciar es no lineal, con un coeficiente de determinación $R^2 > 0.50$.

El volumen de agua estimado aportado a la microcuenca es mayor a 1 millón de m^3 por cada año hidrológico.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Relacionar las variables meteorológicas con la fusión glaciar de la zona de ablación y acumulación del Glaciar Artesonraju, y estimar el volumen de agua aportado a la microcuenca Parón para los años hidrológicos 2004 al 2016.

1.3.2. Objetivos específicos

Relacionar la temperatura mínima con la fusión glaciar y determinar su coeficiente de determinación R^2.

Relacionar la humedad relativa máxima con la fusión glaciar y determinar su coeficiente de determinación R^2.

Relacionar la precipitación acumulada con la fusión glaciar y determinar su coeficiente de determinación R^2.

Relacionar la radiación solar incidente con la fusión glaciar y determinar su coeficiente de determinación R^2.

Relacionar la velocidad del viento con la fusión glaciar y determinar su coeficiente de determinación R^2.

Estimar el volumen de agua aportado a la microcuenca Parón.

1.4. Fundamentación

1.4.1. Justificación

Científica:

El presente trabajo de investigación se realizó porque al determinar una ecuación, mediante una regresión (simple y lineal múltiple) de las variables meteorológicas: temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, radiación solar incidente y velocidad del

viento; con la fusión glaciar, se podría estimar la fusión glaciar en función de dichas variables meteorológicas.

Ambiental:

El presente trabajo de investigación se realizó porque al estimar el volumen de agua aportado a la microcuenca Parón, se podrá obtener un dato cuantificado de volumen de agua estimado que puede ser aprovechado (potabilizado) para el consumo humano.

1.4.2. Importancia

Ya que una de las consecuencias finales de la fusión glaciar es el aporte de agua líquida a la microcuenca Parón, entonces el presente trabajo de investigación se realizará para que se pueda tomar medidas preventivas debido a un aumento del caudal del cauce principal de la microcuenca Parón, debido al aporte de agua producto de la fusión glaciar.

1.4.3. Contribución científica

La contribución científica es la estimación del volumen de agua aportado a la microcuenca Parón, Volumen de agua que puede ser aprovechado para consumo humano. También el aporte científico es una ecuación explicativa donde la fusión glaciar se explica por medio de la influencia de cinco variables meteorológicas: temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes

En un contexto global:

Según López (2009) menciona, la pérdida de nieve y de hielo glaciar por fusión, es una consecuencia directa del calentamiento. Se suele hablar de retroceso glaciar, al retraimiento de los frentes del hielo en sus márgenes, pero este retraimiento no es el único efecto que se produce, también hay disminución de grosor del hielo y, en definitiva, una pérdida de volumen. Las consecuencias del calentamiento se dejan sentir de manera más drástica en las masas de hielo de pequeño tamaño que en los grandes casquetes polares, cuya inercia es mayor.

Según Bórquez (2007) manifiesta, el calentamiento global ha causado un aumento de las temperaturas a nivel mundial, lo que ha tenido efecto sobre los glaciares, ya que este aumento ha provocado un incremento de la altitud de la isoterma cero (altitud donde la temperatura es 0°C) y de la línea de nieve, generando que la temperatura de fusión se ubique a una altura superior provocando el derretimiento de nieve a mayor altura.

En un contexto internacional:

Por su parte, Herrero (2007) llega al resultado de que la nieve en Sierra Nevada (España) se ve muy influenciada por las variables meteorológicas, debido a la interacción de un clima montañoso y semiárido.

Según Rivera, Casassa, Acuña, & Lange, (2000) mencionan que los glaciares de Chile están retrocediendo, con tasas variables pero significativas, que el balance de masa acumulado es negativo y que los cambios de espesor detectados son negativos, lo más probable es que el factor climático (en sus distintas variables meteorológicas) sea la principal causa que explica dichos procesos. También Rivera *et al,* (2000) llegaron al resultado de que la mayoría de las fluctuaciones de los glaciares de Chile, son generadas por los aumentos de temperatura y anomalías pluviométricas extremas, registradas en las distintas estaciones meteorológicas en las últimas tres décadas, ocasionadas principalmente por el fenómeno del Niño, el cual ha tenido un rol significativo en la variabilidad interanual de las precipitaciones y temperaturas, generando respuestas distintas a nivel regional.

Según Torres, Brenning & García (2013) descubrieron que, debido al calentamiento climático en Chile Central, la superficie del glaciar Pirámide (4.6 Km^2 de área de superficie) ha descendido una altura total de -9.69 m, en tan solo 35 años (1965 a 2000), obteniéndose siempre un balance neto de masa negativo promedio anual de -0.129 m equivalentes de agua por año, o una pérdida de 40 millones de m^3 de agua (en un intervalo de confianza de 40 al 95%).

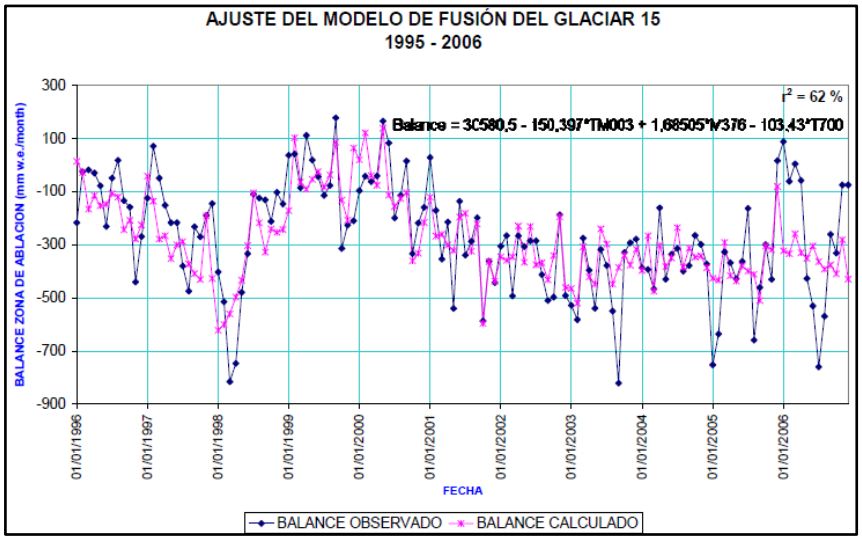
Por otro lado, Cadier *et al,* (2014) obtuvieron un modelo regional del balance de masa en función de la temperatura y la pluviometría, mediante una regresión lineal múltiple, donde el balance de masa (variable con la cual se expresa la fusión glaciar) se explica mediante 3 variables: Temperatura de la estación de Izobamba **M003**, la pluviometría de la estación de Pilahuin-Tungurahua **M376**, y un reanálisis de la temperatura a 700 hPa (hecto pascales) denominada **T700**, ambas estaciones ubicadas en Ecuador; dicha ecuación se muestra a continuación:

$$\boldsymbol{Bal = 30580 - 150.4 * TM003 + 1.7 * M376 - 103.4 * T700}$$

$$\boldsymbol{R^2 = 0.62}$$

Dónde: **Bal**, es el balance de masa (fusión glaciar); **TM003**, es la temperatura de la estación **M003**; **M376** es la pluviometría de dicha estación (**M376**); y **T700**, es un reanálisis de la temperatura de la estación de Izobamba a 700 hPa.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.62$ encontrado, indica un buen ajuste, tal y como lo menciona Rojo (2007), el coeficiente de determinación R^2 es bueno cuando es mayor a 0.50; este buen ajuste indica que las variables independientes (**TM003, M376, T700**) explican en un **62%** a la variable dependiente (**balance de masa o fusión glaciar**). Así mismo Cadier *et al,* (2014) con dicha ecuación reconstruyeron el balance de masa estimado y lo compararon con el observado, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Gráfica 1: Balance observado y calculado.

Fuente: Modelling melting in low latitude Andean glaciers according to global, regional and local climate variations, *Cadier et al,* (2014), pág. 8.

Por otra parte, Francou, Ribstein, Semiond, Portocarrero & Rodríguez (1995) encontraron una muy buena correlación (muy buen ajuste) entre el balance de masa (fusión glaciar) "**Y**" del glaciar Uruashraju y las temperaturas máximas $\mathbf{T_x}$ y mínimas $\mathbf{T_n}$, para el periodo 1977 a 1992, y la ecuación resultante es la siguiente:

$$Y = 25,273 - 1,959T_x - 2,192T_n$$

$$R^2 = 0.83$$

En un contexto local:

Según Dávila (2015), vinculó 3 variable meteorológicas (precipitación Pp, humedad relativa HR y temperatura T) con el balance de masa (fusión glaciar) del glaciar Artesonraju mediante una regresión lineal múltiple, para el periodo 1995 al 2010, obteniendo la siguiente ecuación:

$$Bal_{_glaciar\ Artesonraju} = -0.082 - 0.00719Pp + 0.000417HR - 0.0001975T$$

$$R^2 = 0.0371$$

Así mismo vinculó las 3 variables meteorológicas de manera individual con el balance de masa (fusión glaciar) mediante regresiones simples de tipo polinomial de grado 6, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$Y = 3 * 10^{-11}X^6 - 2 * 10^{-8}X^5 + 5 * 10^{-6}X^4 - 0.004X^3 - 0.0033X^2 + 0.7483X - 70.365$$

$$R^2 = 0.0758$$

Dónde: **Y,** es el balance de masa (fusión glaciar); **X,** es la precipitación.

$$Y = 1 * 10^{-9}X^6 - 5 * 10^{-7}X^5 + 9 * 10^{-5}X^4 - 0.0085X^3 + 0.4625X^2 - 13.267X + 156.04$$

$$R^2 = 0.0225$$

Dónde: **Y,** es el balance de masa (fusión glaciar); **X,** es la humedad relativa.

$$Y = 0.0329X^6 - 0.456X^5 + 2.5064X^4 - 6.9496X^3 + 10.185X^2 - 7.4087X + 1.9742$$

$$R^2 = 0.0622$$

Dónde: **Y,** es el balance de masa (fusión glaciar); **X,** es la temperatura.

Observándose siempre, tanto en su regresión lineal múltiple como en sus regresiones simples de tipo polinomial de grado 6, un coeficiente de determinación R^2 **muy malo**, tal y como lo menciona Rojo (2007): un R^2 es considerado **muy malo** (muy mal ajuste) cuando $R^2 < 0.3$.

Según la ANA-UGRH-HUARAZ (2014) menciona, el glaciar Artesonraju para el periodo hidrológico 2013 – 2014, ha registrado una pérdida de masa glaciar de -341.03 mm equivalente de agua, el símbolo negativo nos indica que hay pérdida de masa glaciar por fusión y sublimación; la ubicación de la Línea de Equilibrio (ELA) de 5,043.2 msnm, nos indica que por debajo de esta línea el glaciar pierde masa de hielo y, por encima el glaciar se recupera por la precipitación nival, pero en los últimos años se han obtenido resultados negativos; en consecuencia, el frente glaciar retrocede y la capa de hielo disminuye; para el período 2013-2014 el retroceso registrado fue de -3.41 m (este valor indica que el frente glaciar ha retrocedido 3.41 m, de su posición

inicial); todo esto debido a la influencia de la temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Variables meteorológicas y fusión glaciar

Según Orosco (2014), las distintas variables meteorológicas (principalmente precipitación, temperatura, radiación, humedad relativa y viento) condicionan de forma muy marcada la persistencia de la nieve y la sucesión de diversos ciclos de fusión a lo largo del año.

Según Kling, Fürst & Nachtnebel (2006) la alta variabilidad espacial y temporal de la fusión glaciar se debe a la distribución de las precipitaciones, temperaturas y los efectos orográficos (elevaciones existentes). Asimismo, Barros & Lettenmaier (1993) señalan que esta variabilidad está fuertemente influenciada por los efectos de la elevación, la pendiente, la topografía, la vegetación, la rugosidad de la superficie, la radiación y los intercambios de energía entre la nieve y el aire.

Por otro lado, Nolin & Stroeve (1997) señalan que las variaciones en las temperaturas y precipitaciones causadas por el cambio climático, han provocado en las cuencas del río Bravo (ubicada al suroeste de los E.E.U.U. y México) variaciones importantes en la acumulación y la fusión de nieve.

2.2.2. Temperatura del aire y fusión glaciar

Según Sicart, Hock & Six (2008) existe una metodología para determinar la fusión glaciar en función de la temperatura denominada grado-día (modelo degree-day), pero solo es aplicable para glaciares no tropicales (por encima del trópico de Cáncer o por debajo del trópico de Capricornio); para glaciares tropicales (aquellos que se encuentran entre el trópico de Cáncer y Capricornio) los factores más influyentes sobre la fusión glaciar son la radiación solar y el estado de la superficie del glaciar, tal y como lo mencionan Favier, Wagnon, Charazin, Maisincho & Coudrain (2004): si un glaciar se encuentra cubierto de

nieve fresca, la mayor parte de la energía será reflejada, mientras que otra parte será absorbida por la misma para generar la fusión.

Según Hock (2003), quien usó la metodología grado-día, señala que existe una muy buena correlación entre la temperatura del aire y la ablación anual de un glaciar no tropical, por lo que la temperatura es tomada como indicador para calcular la fusión del hielo o la nieve.

2.2.3. Humedad relativa (HR) y fusión glaciar

Matsuo & Sasyo (1980) sostienen que a una humedad relativa del 100%, la fusión comienza justo por debajo del nivel de congelación y el diámetro del copo de nieve disminuye rápidamente pasando a gotas de lluvia. Con humedad relativa de 80% y 90%, el diámetro del copo de nieve disminuye gradualmente por sublimación hasta que comienza la fusión. Cuando la fusión comienza, el diámetro del copo de nieve disminuye rápidamente y éste se funde hasta convertirse en gota de lluvia.

Matsuo & Sasyo (1980) indican que debajo del nivel de congelamiento en un entorno subsaturado (HR<100), el copo de nieve pasa por tres subcapas en las cuales ocurren diferentes procesos que van a determinar el estado físico que tendrá dicha precipitación.

Subcapa I. En esta capa ocurre la sublimación de los copos de nieve, cuyo consumo de energía es mayor que el suministrado por el entorno, lo que produce el enfriamiento del copo de nieve, permitiéndole existir en un entorno mayor a 0°C. En esta capa no hay fusión de los copos de nieve.

Subcapa II. En esta capa, la energía que suministra el entorno es mayor que la requerida para la sublimación, lo cual provoca la fusión de los copos de nieve. El agua recién fusionada al estar en un entorno subsaturado se evapora y provoca el enfriamiento del copo de nieve, lo cual evita que se funda por completo.

Subcapa III. En esta capa, el calor del entorno y el calor producido por la condensación del vapor de agua funden por completo el copo de nieve.

Según Herrero (2007), la permanencia de la nieve en la superficie supone una exposición constante a las fuerzas evaporativas, es decir a menor humedad relativa la permanencia de nieve será menor (mayor fusión); la aparición de un solo episodio de viento con baja humedad relativa puede provocar una fuerte evaporación con repercusión en el balance anual (fusión glaciar).

2.2.4. Precipitación y fusión glaciar

El calor transferido a la nieve por el agua de lluvia, es la diferencia entre su energía contenida antes de caer sobre la nieve y su contenido de energía al alcanzar el equilibrio térmico en el manto de nieve. Esta transferencia de energía es lo que causa la fusión de la nieve. Existen dos casos en el intercambio de calor: a) precipitación sobre un manto de nieve donde la lluvia no se congela y habrá un flujo de calor por advección y b) precipitación sobre un manto de nieve con temperatura por debajo de los 0ºC, donde la lluvia se congela y por lo tanto se libera calor latente de fusión. Ambos casos provocan la fusión de nieve (Male & Gray, 1981).

Según Herrero (2007), el poder de fusión de la lluvia líquida no es muy grande debido a su bajo contenido energético comparado con otros flujos energéticos actuantes sobre la nieve. Este autor, cuantificó que una lluvia de 100 mm a una temperatura de 10ºC constituye un aporte positivo de energía para el manto de nieve igual a $4.2x10^6$ J/m^2, que es el equivalente a la energía absorbida por una nieve madura en un día soleado a principios de primavera a 37º de latitud y que es capaz de fundir 12.6 mm de nieve.

2.2.5. Radiación solar y fusión glaciar

La radiación puede llegar a fundir partes de la superficie de la nieve que se infiltra hacia el interior de la columna de nieve donde, si existe un déficit de energía, vuelve a recongelarse. (Herrero, 2007)

Armstrong y Brun (2008), por su parte, sostienen que la parte de la radiación que logra llegar a la capa de nieve, una parte es absorbida y otra es reflejada y devuelta a la atmósfera producto de la reflectividad

o albedo de la nieve, la radiación que es absorbida es la que causa la fusión de la nieve.

Para Dingman (2002), la radiación de onda corta tiene una penetración máxima en la nieve, y el autor propone un valor de 10 cm.

La radiación solar de onda corta tiene una energía, la cual solo puede penetrar los primeros centímetros de la columna de nieve. Por otro lado, para capas de nieve con espesores menores a 10 cm., la radiación puede alcanzar el suelo subyacente y calentar la nieve por conducción, acelerando mucho el proceso de fusión en sus últimos momentos (Herrero, 2007).

2.2.6. Velocidad del viento y fusión glaciar

Herrero (2007) informa que el viento actuando sobre la nieve aún no consolidada (precipitada en la superficie del glaciar) puede producir transporte del material superficial entre zonas de ablación y zonas de acumulación. Estas zonas son fácilmente detectables en campo sobre todo durante la fusión. Su principal efecto, por tanto, es la modificación de la distribución espacial de la nieve originada por las condiciones ambientales locales.

Liston & Sturm (1998) afirman que existe una fuerte influencia de la velocidad del viento en la distribución de la nieve.

La altura equivalente de agua (con la cual se mide la fusión glaciar) se ve afectada por el viento (Gustafson, 2008).

2.2.7. Fenómeno de EL NIÑO y LA NIÑA

El NIÑO

Por lo general durante la fase de El Niño, el incremento de la temperatura favorece la ocurrencia de las lluvias en los Andes Centrales a 5,100 y 5,300 msnm, lo cual, junto con una ligera disminución de la nubosidad, mantiene bajos valores del albedo; como consecuencia, aumenta la fusión del glaciar produciéndose pérdida de masa (Francou & Pouyaud, 2008).

La NIÑA

Durante La Niña, se mantienen condiciones climáticas opuestas siendo la temperatura del aire más baja y la isoterma 0°C (ELA) desciende de altitud, esto provoca que existan precipitaciones sólidas a altitudes bajas incrementándose el albedo; así el balance de masa puede estabilizarse o presentar valores positivos (ganancia de masa) (Favier *et al,* 2004).

2.2.8. Regresión simple y múltiple

Proceso de estimación de una variable independiente en función de una (regresión simple) o más variables (regresión múltiple) independientes (Spiegel, 1991).

2.2.9. Correlación

La correlación es el grado de interconexión entre variables, que intenta determinar con qué precisión describe o explica la relación entre variables en una ecuación lineal o de otro tipo (logarítmica, polinomial, potencial, etc). Si todas las variables satisfacen una ecuación exactamente, se dice que las variables están perfectamente relacionadas o que hay una correlación perfecta entre ellas (Spiegel, 1991).

2.2.10. Coeficiente de correlación *r* ó *R*

El coeficiente de correlación mide la calidad del ajuste entre la ecuación adoptada y los datos. A menos que se especifique lo contrario, el término coeficiente de correlación se usará para el coeficiente de correlación lineal. Dicho coeficiente de correlación lineal se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{r} = \frac{\boldsymbol{N} * \sum(\boldsymbol{XY}) - \sum(\boldsymbol{X}) * \sum(\boldsymbol{Y})}{\sqrt{[\boldsymbol{N} * \sum(\boldsymbol{X})^2 - ((\sum \boldsymbol{X}))^2] * [\boldsymbol{N} * \sum(\boldsymbol{Y})^2 - ((\sum \boldsymbol{Y}))^2]}}$$

Dónde: X es la variable independiente, Y la variable dependiente y N es el número de datos que interviene en el análisis (Spiegel, 1991).

Según Pita & Díaz (1997) el coeficiente de correlación varía entre -1 y +1, estos signos se usan para las correlaciones negativas o positivas respectivamente. El coeficiente de correlación r es una cantidad adimensional, es decir, no depende de las unidades empleadas, pero *sí* se ve alterado ante la presencia de un valor extremo. Frente a esta situación es conveniente realizar un artificio o transformación de datos, lo cual cambia la escala de medición y modera el efecto de valores extremos (como por ejemplo la transformación logarítmica).

Mientras más cercano a 1 o -1 sea el valor del coeficiente de correlación, en cualquier dirección, más fuerte será la asociación entre las dos variables. Mientras más cercano a cero sea el coeficiente de correlación indicará que más débil es la asociación entre ambas variables. Si es igual a cero se concluirá que no existe relación lineal entre ambas variables, esto no quiere decir que no pueda existir ningún tipo de relación entre las variables (Spiegel, 1991).

Si Y tiende a aumentar a medida que X aumenta, como en la figura 1-a), se dice que la correlación es una correlación positiva o directa. Si Y tiende a disminuir a medida que X aumenta, como en la figura 1-b), se dice que es una correlación negativa o inversa. Si todos los puntos parecen encontrarse en una curva, esta correspondencia se llama no lineal; en dicho caso, lo apropiado para la regresión es una ecuación no lineal. Si no parece haber relación entre las variables, como en la figura 1-c), se dice que no hay relación entre ellas (es decir, están descorrelacionadas). (Spiegel & Sthepens, 2009, p.345)

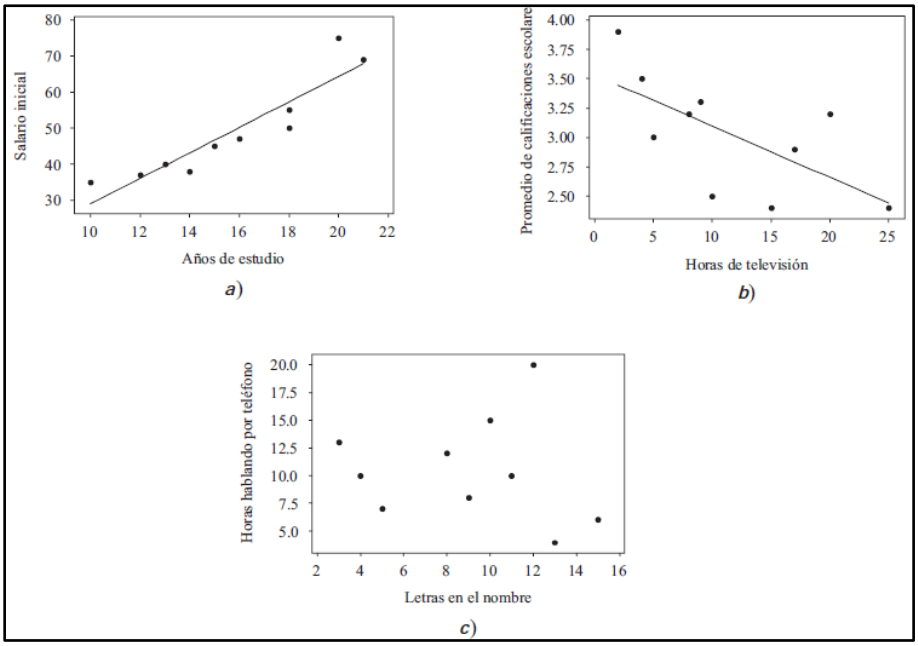


Figura 1: Ejemplos de correlación positiva, correlación negativa y ninguna.

Nota: a) El salario inicial y los años de estudio se correlacionan en forma positiva;
b) El promedio de las calificaciones escolares y las horas que se pasa viendo la televisión se correlacionan negativamente;
c) Entre la cantidad de horas que se habla por teléfono y el número de letras que tiene el nombre de una persona no hay correlación.

Fuente: Libro de estadística, Murray R. Spiegel & Larry J. Sthephens, 2009, p. 346.

2.2.11. Coeficiente de determinación r^2 o R^2

Según Rojo (2007) **el coeficiente de determinación r^2 o R^2** es un coeficiente construido de manera estadística, el cual mide la bondad de ajuste del modelo, es decir permite cuantificar el grado de ajuste entre las observaciones realizadas y la salida del modelo, su valor oscila entre 0 y 1 (siempre es positivo) y representa el porcentaje de varianza en los datos observados explicado por el modelo. Se determina de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{VE}{VT}$$

Dónde: **VE** es la varianza explicada; **VT** varianza total.

Asimismo, Rojo (2007) menciona unas categorías en rangos para el coeficiente de determinación:

$\boldsymbol{R^2 < 0.30}$	**Muy Malo**
$\boldsymbol{0.3 \leq R^2 < 0.40}$	**Malo**
$\boldsymbol{0.4 \leq R^2 < 0.50}$	**Regular**
$\boldsymbol{0.5 \leq R^2 < 0.85}$	**Bueno**
$\boldsymbol{0.85 \leq R^2}$	**Muy bueno**

2.2.12. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

Según Romero (2016) menciona que cuando el tamaño maestral es igual o inferior a 50, la prueba de contraste de bondad de ajuste a una distribución normal, es la prueba de Shapiro-Wilk. Si los datos de una variable se someten a una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y el valor de p es mayor a 0.05, entonces se dice que los datos de dicha variable siguen una distribución normal, donde p es la significancia estadística.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Temperatura del aire

La temperatura es una de las magnitudes más utilizadas para describir el estado de la atmósfera. La temperatura del aire varía entre el día y la noche, entre una estación y otra, y también entre una ubicación geográfica y otra (Rodríguez, Benito, & Portela, 2004).

Temperatura ambiente

Es la temperatura del aire registrada en el instante de la lectura.

Punto de rocío

El punto de rocío o temperatura de rocío es la temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire, produciendo rocío, neblina, cualquier tipo de nube o, en caso de que la temperatura sea lo suficientemente baja, escarcha.

Temperatura máxima

Es la mayor temperatura registrada en un día, y que se presenta entre las 14:00 y las 16:00 horas.

Temperatura mínima

Es la menor temperatura registrada en un día, y se puede observar en entre las 06:00 y las 08:00 horas.

2.3.2. Humedad relativa

La humedad relativa es el porcentaje de la humedad de saturación, que se calcula normalmente en relación con la densidad de vapor de saturación (Rodríguez, Benito, & Portela, 2004).

2.3.3. Precipitación

Según Cuadrat y Pita (2004) al hablar de la precipitación se expresa todas las formas de humedad caídas directamente sobre el suelo en estado líquido y sólido, pero sólo la lluvia y la nieve desprendidas de las masas nubosas contribuyen de modo significativo a los totales pluviométricos.

2.3.4. Radiación solar

La energía transferida por el Sol a la Tierra es lo que se conoce como energía radiante o radiación. Ésta viaja a través del espacio en forma de ondas que llevan asociada una determinada cantidad de energía (Rodríguez, Benito, & Portela, 2004).

Radiación solar directa

Se conoce como radiación solar directa, o rayo, a la radiación recibida del sol que no ha sido absorbida ni dispersada. Sin embargo, cuando los rayos del sol cruzan la atmósfera, una parte de ellos son absorbidos o dispersados y el resto logra tocar la superficie terrestre de manera directa.

Radiación solar difusa

Es la radiación solar recibida en la superficie terrestre después que su dirección ha sido cambiada por la dispersión en la atmósfera. La radiación que incide sobre una superficie también consiste de radiación solar dispersa proveniente del cielo y posiblemente la radiación solar reflejada por la Tierra.

2.3.5. Velocidad del viento

Según Rodríguez, Benito & Portela (2004), el viento consiste en el movimiento de aire desde una zona hasta otra. Existen diversas causas que pueden provocar la existencia del viento, pero normalmente se origina cuando entre dos puntos se establece una cierta diferencia de presión o de temperatura. Para medir la velocidad del viento se utiliza un instrumento llamado Anemómetro y para determinar su dirección se utiliza un instrumento llamado Veleta. La dirección, depende directamente de la distribución de las presiones, pues aquel tiende a soplar desde la región de altas presiones hacia la de presiones más bajas.

2.3.6. Nieve

El origen de la nieve hay que buscarlo en las regiones sobresaturadas de la atmósfera donde las condiciones son favorables para el inicio de la condensación de las partículas gaseosas de agua. Cuando la temperatura se encuentra por debajo del punto de congelación del agua, lo que normalmente serían gotas de lluvia crecen en realidad como cristales de hielo fruto de un doble cambio de fase del agua. En este estado de suspensión, los cristales de hielo crecen delineando copos de nieve con bellas formas geométricas muy variadas y de baja densidad (Gartska, 1964).

Según Langlois *et al*, (2008) la nieve es una mezcla de hielo, aire y agua.

2.3.7. Fusión de nieve

Es el resultado de la interacción entre ciertos flujos de energía, conocido y cuantificable entre la atmósfera, la nieve y el suelo subyacente. Estos flujos externos que actúan sobre la unidad de columna de nieve, junto con la posterior transmisión interna del calor dentro de la misma son los causantes del proceso de fusión en términos de energía. (Dingman, 2002).

2.3.8. Fusión glaciar

Proceso mediante el cual la nieve y/o el hielo se derrite de un determinado glaciar, debido a una interacción entre el sol, la atmósfera y la roca madre con el glaciar (Asenjo, 2009).

2.3.9. Acumulación

Según la ANA-UGRH-HUARAZ (2014) la acumulación incluye todos los procesos porque el material se agrega al glaciar. Este material normalmente es adicionado como nieve y transformado lentamente a hielo. Las avalanchas, formación de escarcha y la formación de hielo por recongelación de agua fusionada que se percola son algunos otros procesos de acumulación. La acumulación generalmente toma lugar en las partes altas y muy cerca de la superficie del glaciar.

2.3.10. Ablación

Según la ANA-UGRH-HUARAZ (2014) la ablación incluye todos los procesos porque la nieve y hielo se pierden del glaciar pudiendo ser por fusión, evaporación, sublimación o la nieve que es removida por el viento. La nieve o hielo fusionado que fue recongelado en otra parte del glaciar no es ninguna ablación porque el glaciar no pierde masa. Prácticamente todos los procesos de ablación tienen lugar en la superficie o en casi todos los casos en el término o frente del glaciar. Algunos glaciares pueden perder el hielo fundiendo sus bases (contacto hielo y roca madre), pero la cantidad perdida es despreciable comparada con la ablación que se produce en la superficie.

2.3.11. Línea de equilibrio

Según la ANA-UGRH-HUARAZ la línea de equilibrio es el nivel en el cual el balance de masas es nulo, es la línea que divide la zona de acumulación y ablación. Por encima de esta línea hay una ganancia neta de masas durante el año hidrológico; por debajo de la línea de equilibrio hay una pérdida neta, hay cierta cantidad de nieve por debajo de la línea de equilibrio que se considera despreciable, ya que en los días siguientes se fusiona. Esta línea separa la zona de acumulación (donde Ac>Ab) y la zona de ablación (donde Ac<Ab). La altura de la

línea de equilibrio del glaciar (*Equilibrium Line Altitud*-ELA) en msnm, varía cada año con el valor del balance según una relación lineal. Después de unos años, cuando esta relación lineal está bien establecida, se puede identificar el valor de la ELA (llamada entonces ELA0) para un balance equilibrado (Bn = 0).

2.3.12. Balance de masa

Según la ANA-UGRH-HUARAZ (2014) el balance de masa es una medición directa de las ganancias o pérdidas de masa del glaciar, generalmente expresada como un equivalente de volumen de agua en milímetros. Así como la línea de equilibrio, ésta depende de las condiciones climáticas del año. La medición del balance es importante porque es una medida que permite aproximar la relación que los glaciares mantienen con el clima y está relacionado directamente con el tema de recurso hídrico.

El balance de masa constituye la información básica más importante para el estudio de los glaciares; es el cambio de masa (medido como un volumen de agua equivalente), ocurrido durante un periodo de tiempo, normalmente la duración del año hidrológico. El balance de masa anual se denota bajo su forma específica en milímetros de agua equivalente por año. Son principales variables a medir: la acumulación neta y la ablación. (Francou & Pouyaud, 2004)

2.3.13. Equivalente nieve agua *SWE*

Según Cornwell (2002) esta equivalencia representa la altura de lámina de agua generada (H) si un volumen de nieve con una densidad (de densidad ρs) dada es derretido completamente, convirtiéndose en agua líquida (ρw). El SWE es usado para cuantificar el volumen de agua en forma de nieve existente en un área determinada.

2.3.14. Régimen anual

Según la ANA-UGRH-HUARAZ (2014) la acumulación ocurre solamente en temporada de lluvias, de setiembre a abril aproximadamente. Mientras que la ablación ocurre todo el año siendo mayor en la temporada de estiaje.

2.3.15. Año hidrológico

Según la ANA-UGRH-HUARAZ (2014) es el año que contempla las épocas de estiaje y de avenidas, comienza el 01 de setiembre de un año y culmina el 31 de agosto del siguiente año.

2.3.16. Advección

Transporte horizontal de una propiedad de la atmósfera (humedad, concentración de contaminantes, temperatura, etc.) por la acción del viento.

2.3.17. Albedo

Designa el poder que tiene un cuerpo para reflejar la radiación de onda corta que recibe. El albedo llega a 1 cuando toda la radiación se refleja, o al valor de 0 cuando se absorbe toda la radiación, que es el caso de los cuerpos negros perfectos (cuerpo negro de Planck). En la superficie de un glaciar, el albedo se sitúa generalmente entre 0,8 (el de la nieve fresca en el Trópico) y 0,4 (el del hielo no cubierto de residuos).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Ubicación del glaciar Artesonraju

El glaciar Artesonraju, se encuentra ubicado al pie de los Nevados Artesonraju, Pirámide, y el Nevado Parón, en la cabecera de la quebrada Parón, vertiente occidental de la Cordillera Blanca. Este glaciar forma parte de la subcuenca del río Llullán, el que a su vez drena sus aguas al río Santa.

3.1.1. Ubicación política

El proyecto de investigación políticamente se encuentra ubicado en:

Distrito : Caraz
Provincia : Huaylas
Región : Ancash

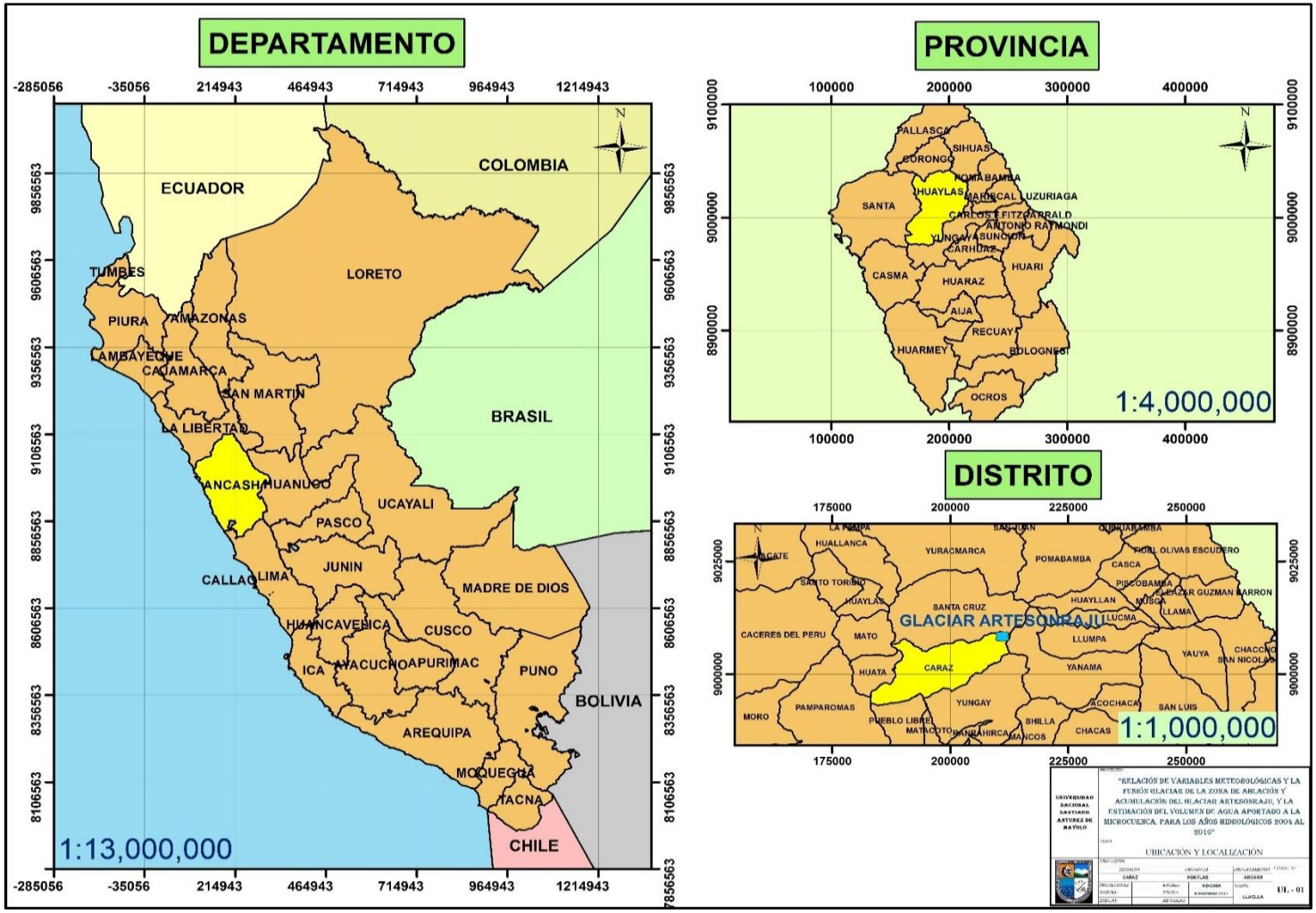


Figura 2: Ubicación política del glaciar Artesonraju.

3.1.2. Ubicación geográfica

Geográficamente el centro del glaciar se encuentra en la latitud y longitud siguiente:

Latitud **:** 8° 57' 48" Sur
Longitud **:** 77° 37' 58" Oeste
Rango altitudinal **:** 4,710 – 6,000 msnm.

3.1.3. Ubicación satelital

Esta ubicación muestra 2 zonas importantes del glaciar Artesonraju donde se hacen las perforaciones para calcular los procesos de acumulación y de fusión glaciar.

Zona de acumulación: Representada de la franja **anaranjada** hacia la derecha, en esta zona se da la precipitación nival, lo cual trae consigo el proceso de acumulación de nieve.

Zona de ablación: Representada de la franja **anaranjada** hacia la izquierda, en esta zona el glaciar pierde masa por fusión glaciar.

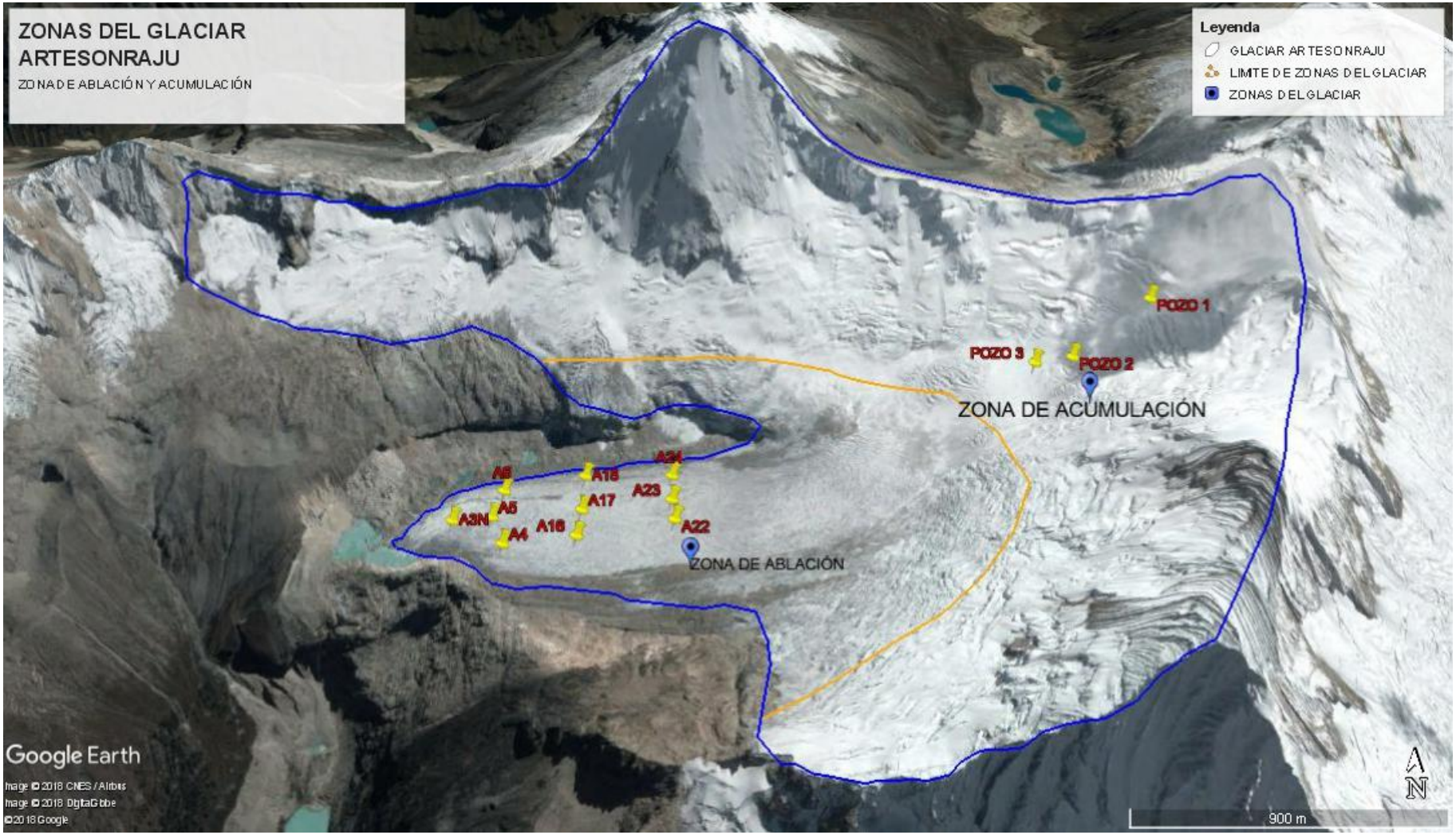


Figura 3: Zona de ablación y acumulación del glaciar Artesonraju.

3.2. Ubicación de estaciones meteorológicas

Los datos de las 5 variables meteorológicas que se utilizaron en el presente trabajo de investigación se extrajeron de 4 estaciones meteorológicas:

Estación Meteorológica Artesoncocha

Este: 209, 210.00 m.
Norte: 9, 006, 589.00 m.
Altitud: 4,310 msnm.
Datos extraídos: Temperatura mínima.

Estación Meteorológica Artesonraju AP1

Este: 210, 013.00 m.
Norte: 9, 007, 400.00 m.
Altitud: 4,826 msnm.
Datos extraídos: Precipitación.

Estación Meteorológica Artesonraju AP2

Este: 209, 188.00 m.
Norte: 9, 008, 207.00 m.
Altitud: 4,916 msnm.
Datos extraídos: Humedad relativa máxima.

Estación Meteorológica Artesonraju Glaciar

Este: 210,021.00 m.
Norte: 9, 007, 923.00 m.
Altitud: 4,836 msnm.
Datos extraídos: Radiación solar incidente y velocidad del viento.

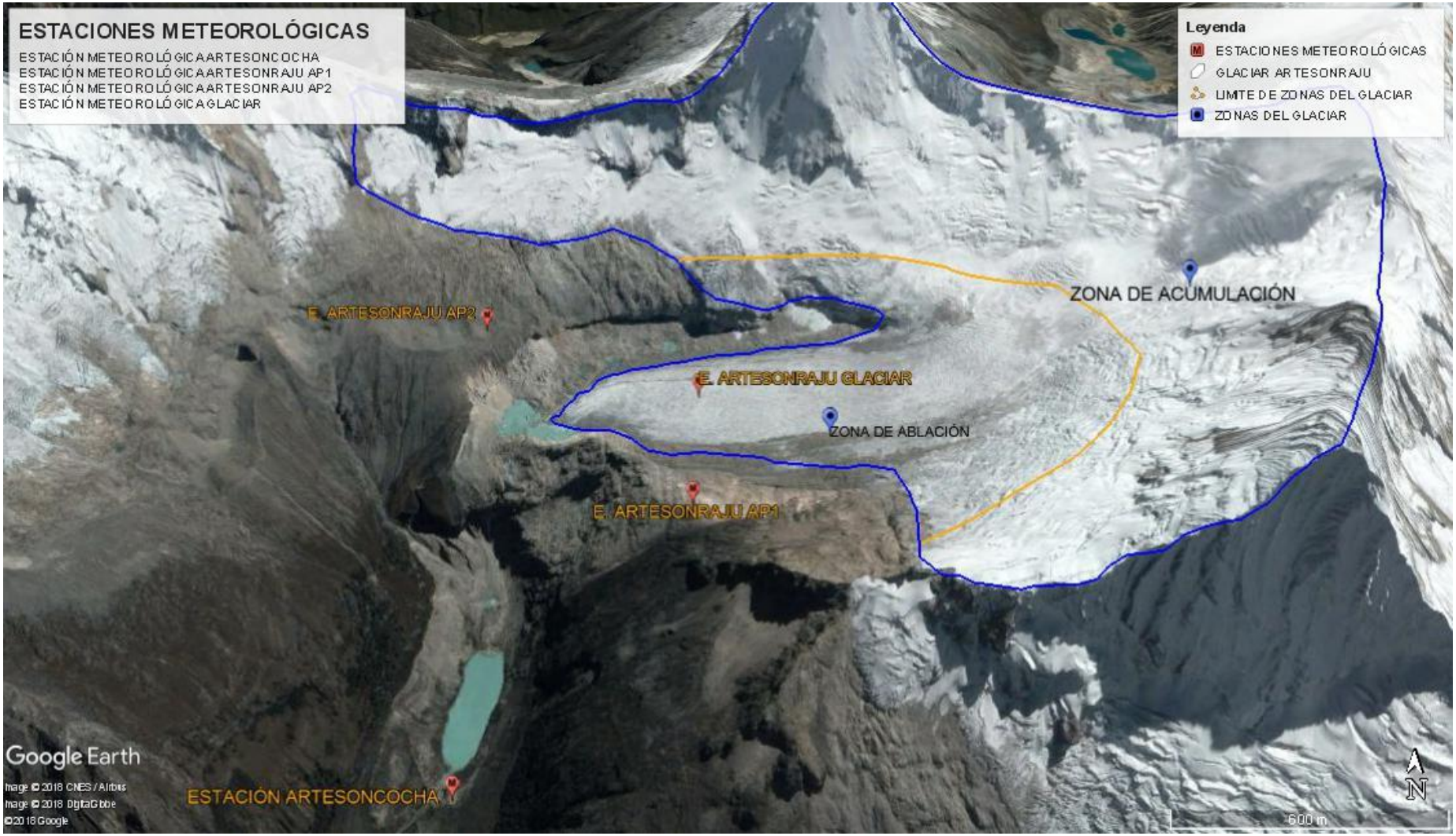


Figura 4: Mapa de estaciones meteorológicas.

3.3. Limitaciones

El presente proyecto de investigación tuvo como limitación la data disponible de las variables meteorológicas, lo cual era determinante para el proceso de regresión lineal múltiple; por lo tanto, la data disponible tuvo que entrar a un pretratamiento (con la función pronóstico del software Excel 2017), para obtener finalmente una data más completa y así poder ingresarlo al proceso de regresión lineal múltiple.

Data de variables meteorológicas y de balance neto de masa, ambas variables organizadas a escala anual. Dicha data fue suministrada por la Autoridad Nacional del Agua Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de Huaraz (ANA-UGRH-HUARAZ). Se ilustra a continuación lo que se mencionó anteriormente:

Tabla 1: Data disponible de variables meteorológicas y de balance neto de masa

AÑOS HIDROLÓGICOS	AÑOS PARA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	FUSIÓN GLACIAR EXPRESADO EN Balance Neto de Masa (mm eq agua)	T mín. (°C)	H.R. máx. (%)	PP (mm)	R.S. Incidente (W/m^2)	VV (m/s)
Código de variables		**Y**	**X1**	**X2**	**X3**	**X4**	**X5**
2004 - 2005	1	-1,547.51	6.95				
2005 - 2006	2	-1,529.33	6.86				
2006 - 2007	3	-1,304.68	6.81				
2007 - 2008	4	470.59	6.66				
2008 - 2009	5	-657.79	6.93				
2009 - 2010	6	-1,048.14	7.85				
2010 - 2011	7	-516.57	6.47		1,174.60		
2011 - 2012	8	-349.06	9.27		612.80		
2012 - 2013	9	-448.46	9.23		558.20		
2013 - 2014	10	-341.03	7.36	92.57	29.60	361,836.77	2.63
2014 - 2015	11	-861.75	3.48	90.98	849.20	665,898.68	2.44
2015 - 2016	12	-1,598.14	4.08	89.13	393.40	108,265.29	2.91

Nota: T mín., es Temperatura mínima; H.R. máx., es Humedad relativa máxima; PP, es Precipitación; RS incidente, es Radiación solar incidente; VV, es Velocidad del viento.

Fuente: ANA-UGRH-HUARAZ.

3.4. Diseño

El diseño de la investigación es de tipo descriptivo correlacional, de corte transversal. Para ello se empleó el diseño muestra No Experimental con seis observaciones (cinco variables meteorológicas y fusión glaciar) para determinar la correlación entre ambas variables.

3.4.1. Insumos para regresiones simples

Tabla 2: Tipos de regresiones simples aplicadas a las 2 variables

INSUMOS PARA REGRESIONES SIMPLES (RS)	CÓDIGO DE VARIABLES	TIPO DE REGRESIÓN SIMPLE	RELACIÓN RESULTANTE
Fusión glaciar expresada en balance neto de masa Temperatura mínima	Y X1	Lineal Logarítmica Polinomial	$Y = a(X1)+b$ $Y = aLn(X1)+b$ $Y = a(X1)^6+b(X1)^5+c(X1)^4+d(X1)^3+e(X1)^2+f(X1)+g$
Fusión glaciar expresada en balance neto de masa Humedad relativa máxima	Y X2	Lineal Logarítmica Polinomial	$Y = a(X2)+b$ $Y = aLn(X2)+b$ $Y = a(X2)^6+b(X2)^5+c(X2)^4+d(X2)^3+e(X2)^2+f(X2)+g$
Fusión glaciar expresada en balance neto de masa Precipitación	Y X3	Lineal Logarítmica Polinomial	$Y = a(X3)+b$ $Y = aLn(X3)+b$ $Y = a(X3)^6+b(X3)^5+c(X3)^4+d(X3)^3+e(X3)^2+f(X3)+g$
Fusión glaciar expresada en balance neto de masa Radiación solar incidente	Y X4	Lineal Logarítmica Polinomial	$Y = a(X4)+b$ $Y = aLn(X4)+b$ $Y = a(X4)^6+b(X4)^5+c(X4)^4+d(X4)^3+e(X4)^2+f(X4)+g$
Fusión glaciar expresada en balance neto de masa Radiación solar incidente	Y X5	Lineal Logarítmica Polinomial	$Y = a(X5)+b$ $Y = aLn(X5)+b$ $Y = a(X5)^6+b(X5)^5+c(X5)^4+d(X5)^3+e(X5)^2+f(X5)+g$

3.4.2. Insumos para regresión lineal múltiple

Tabla 3: Insumos para regresión lineal múltiple y relación resultante

INSUMOS PARA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE (RLM)	CÓDIGO DE VARIABLES	RELACIÓN RESULTANTE
Fusión glaciar expresada en balance neto de masa	Y	
Temperatura mínima	X1	
Humedad relativa máxima	X2	Y = a(X1)+b(X2)+c(X3)+d(X4)+e(X5)+f
Precipitación	X3	
Radiación solar incidente	X4	
Velocidad del viento	X5	

3.4.3. Insumos para la estimación del volumen de agua aportado a la microcuenca Parón

Tabla 4: Insumos para la estimación del volumen de agua aportado a la microcuenca Parón

FUSIÓN GLACIAR EXPRESADA EN BALANCE NETO DE MASA (DE FORMA POSITIVA) 2004 AL 2016	ÁREA DEL GLACIAR ARTESONRAJU POR CADA AÑO HIDROLÓGICO	VOLUMEN ESTIMADO DE AGUA APORTADO A LA MICROCUENCA PARÓN
Y1	A1	V1 = Y1 * A1
Y2	A2	V2 = Y2 * A2
Y3	A3	V3 = Y3 * A3
Y4	A4	V4 = Y4 * A4
Y5	A5	V5 = Y5 * A5
Y6	A6	V6 = Y6 * A6
Y7	A7	V7 = Y7 * A7
Y8	A8	V8 = Y8 * A8
Y9	A9	V9 = Y9 * A9
Y10	A10	V10 = Y10 * A10
Y11	A11	V11 = Y11 * A11
Y12	A12	V12 = Y12 * A12
SUMATORIA		**Vtotal**

Nota: Vtotal, representa el volumen de agua estimado que se ha aportado a la microcuenca Parón para el periodo hidrológico 2004 al 2016.

3.5. Pretratamiento de datos

Los datos de la Tabla 1 se sometieron a un pretratamiento para completar datos con la Función Pronóstico del Software Excel 2017. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5: Data completada con la Función Pronóstico Software Excel 2017

AÑOS HIDROLÓGICOS	AÑOS PARA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	FUSIÓN GLACIAR EXPRESADA EN Balance Neto de Masa (mm eq agua)	T mín. (°C)	H.R. máx. (%)	PP (mm)	R.S. Incidente (W/m^2)	VV (m/s)
Código de variables		**Y**	**X1**	**X2**	**X3**	**X4**	**X5**
2004 - 2005	1	-1,547.51	6.95	108.09	1,507.71	1,646,524.31	1.26
2005 - 2006	2	-1,529.33	6.86	106.37	1,401.27	1,519,738.57	1.40
2006 - 2007	3	-1,304.68	6.81	104.65	1,294.83	1,392,952.83	1.54
2007 - 2008	4	470.59	6.66	102.93	1,188.39	1,266,167.09	1.68
2008 - 2009	5	-657.79	6.93	101.21	1,081.95	1,139,381.35	1.82
2009 - 2010	6	-1,048.14	7.85	99.49	975.51	1,012,595.61	1.96
2010 - 2011	7	-516.57	6.47	97.77	1,174.60	885,809.87	2.10
2011 - 2012	8	-349.06	9.27	96.05	612.80	759,024.13	2.24
2012 - 2013	9	-448.46	9.23	94.33	558.20	632,238.39	2.38
2013 - 2014	10	-341.03	7.36	92.57	29.60	361,836.77	2.63
2014 - 2015	11	-861.75	3.48	90.98	849.20	665,898.68	2.44
2015 - 2016	12	-1,598.14	4.08	89.13	393.40	108,265.29	2.91

Nota 1: T mín., es Temperatura mínima; H.R. máx., es Humedad relativa máxima; PP, es Precipitación; RS incidente, es Radiación solar incidente; VV, es Velocidad del viento.

Nota 2: Los datos de color azul fueron estimados con la Función Pronóstico del Software Excel 2017.

3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.6.1. Procesamiento

Los valores de la radiación solar incidente (RS Incidente) de la Tabla 5, son de muchas cifras enteras en comparación con las demás variables; esto interferirá en el proceso de regresión lineal múltiple y se excluirá esta variable; por lo tanto, para evitar la exclusión de dicha variable se tuvo que realizar el artificio de logaritmo natural (Ln) de los valores de la radiación solar incidente mostrados en el Tabla 5, para recién ingresarlo en el proceso de regresión lineal múltiple, con lo cual se tendría la siguiente data final:

Tabla 6: Artificio de logaritmo natural a la radiación solar incidente

AÑOS HIDROLÓG.	AÑOS PARA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	FUSIÓN GLACIAR EXPRESADA EN Balance Neto de Masa (mm eq agua)	T mín. (°C)	H.R. máx. (%)	PP (mm)	Ln (R.S. Incid.) (W/m^2)	VV (m/s)
Código de variables		**Y**	**X1**	**X2**	**X3**	**X'4**	**X5**
2004 - 2005	1	-1,547.51	6.95	108.09	1,507.71	14.31	1.26
2005 - 2006	2	-1,529.33	6.86	106.37	1,401.27	14.23	1.40
2006 - 2007	3	-1,304.68	6.81	104.65	1,294.83	14.15	1.54
2007 - 2008	4	470.59	6.66	102.93	1,188.39	14.05	1.68
2008 - 2009	5	-657.79	6.93	101.21	1081.95	13.95	1.82
2009 - 2010	6	-1,048.14	7.85	99.49	975.51	13.83	1.96
2010 - 2011	7	-516.57	6.47	97.77	1,174.60	13.69	2.10
2011 - 2012	8	-349.06	9.27	96.05	612.80	13.54	2.24
2012 - 2013	9	-448.46	9.23	94.33	558.20	13.36	2.38
2013 - 2014	10	-341.03	7.36	92.57	29.60	12.80	2.63
2014 - 2015	11	-861.75	3.48	90.98	849.20	13.41	2.44
2015 - 2016	12	-1,598.14	4.08	89.13	393.40	11.59	2.91

Nota: X'4 es el Logaritmo natural de la radiación solar incidente Ln (RS Incidente) de la Tabla 5.

Una vez ordenados y completados los datos, tal y como se muestra en el Tabla 6 se realizaron los siguientes procesos:

- **Regresión Simple,** para cada variable meteorológica de manera individual con la fusión glaciar, ya sea lineal, logarítmica o polinomial.

- **Regresión Lineal Múltiple**, para todas las variables meteorológicas de manera conjunta con la fusión glaciar. Previa a este proceso se tuvo que realizar la prueba de normalidad de las variables y posteriormente recién la regresión lineal múltiple.

Los cuadros de estas regresiones (simple y múltiple) ya se mostraron en la Tabla 2 y 3.

Para calcular el volumen de agua aportado a la microcuenca se necesita del área del glaciar Artesonraju. Esta fue suministrada por la Unidad de Inventario de Glaciares de la Autoridad Nacional del Agua - ANA – Huaraz; y solo se registran 2 datos:

Año 2002: 5.95 Km^2 Equivalente a 5, 950, 000.00 m^2.
Año 2012: 5.45 Km^2 Equivalente a 5, 450, 000.00 m^2.

Por lo tanto, para años mayores o iguales al año 2012 se considerará el valor de 5.95 Km^2 y para años menores al año 2012 se considerará el valor de 5.45 Km^2, para el año hidrológico 2011 – 2012 se tomó un promedio de ambas áreas, pues dicho año hidrológico utiliza meses tanto del año 2011 como meses del año 2012. Las áreas resultantes se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 7: Áreas del glaciar Artesonraju por cada año hidrológico

AÑOS HIDROLÓGICOS	ÁREA DEL GLACIAR ARTESONRAJU (m^2)
2004 - 2005	5,950,000.00
2005 - 2006	5,950,000.00
2006 - 2007	5,950,000.00
2007 - 2008	5,950,000.00
2008 - 2009	5,950,000.00
2009 - 2010	5,950,000.00
2010 - 2011	5,950,000.00
2011 - 2012	5,700,000.00
2012 - 2013	5,450,000.00
2013 - 2014	5,450,000.00
2014 - 2015	5,450,000.00
2015 - 2016	5,450,000.00
PROMEDIO	**5,762,500.00**

También para calcular el volumen de agua aportado a la microcuenca es necesario expresar el balance neto de masa en “m eq agua”, es decir dividir entre 1000 los valores de “mm eq agua” y expresarlos todos en forma positiva. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 8: Balance neto de masa expresado en “m eq agua” por cada año hidrológico

AÑOS HIDROLÓGICOS	FUSIÓN GLACIAR EXPRESADA EN Balance Neto de Masa (mm eq agua)	FUSIÓN GLACIAR EXPRESADA EN Balance Neto de Masa (m eq agua)
2004 - 2005	-1,547.51	1.54751
2005 - 2006	-1,529.33	1.52933
2006 - 2007	-1,304.68	1.30468
2007 - 2008	470.59	0.47059
2008 - 2009	-657.79	0.65779
2009 - 2010	-1,048.14	1.04814
2010 - 2011	-516.57	0.51657
2011 - 2012	-349.06	0.34906
2012 - 2013	-448.46	0.44846
2013 - 2014	-341.03	0.34103
2014 - 2015	-861.75	0.86175
2015 - 2016	-1,598.14	1.59814

Para el año hidrológico 2007-2008 de la Tabla 8 no hubo aporte de agua como balance neto a la microcuenca Parón, porque se tuvo un balance neto de masa positivo de 470.59 mm eq agua; cabe resaltar que en todo el año hidrológico siempre hay fusión y por lo tanto aporte hídrico, pero como balance neto no hubo aporte ese año hidrológico (2007-2008).

Teniendo ambos datos tanto los de la Tabla 7 como de la 8 se procedió a multiplicar ambos, para estimar el volumen de agua aportado a la microcuenca Parón, y los resultados se muestran en el capítulo de resultados.

3.6.2. Análisis

Para las regresiones lineales simples

Se escogió la regresión simple (lineal, logarítmica o polinómica) cuyo coeficiente de determinación fue el más cercano a 1 (R^2 más cercano a 1).

Luego se graficó cada una de las regresiones simples de cada una de las 5 variables meteorológicas. Por último, se describió e interpretó cada gráfica resultante.

Para la regresión lineal múltiple

Se determinó el coeficiente de determinación de la regresión lineal múltiple (R^2). Y se explicó la relación resultante donde la fusión glaciar se explica por una influencia de las variables meteorológicas.

Para el volumen de agua aportado a la microcuenca

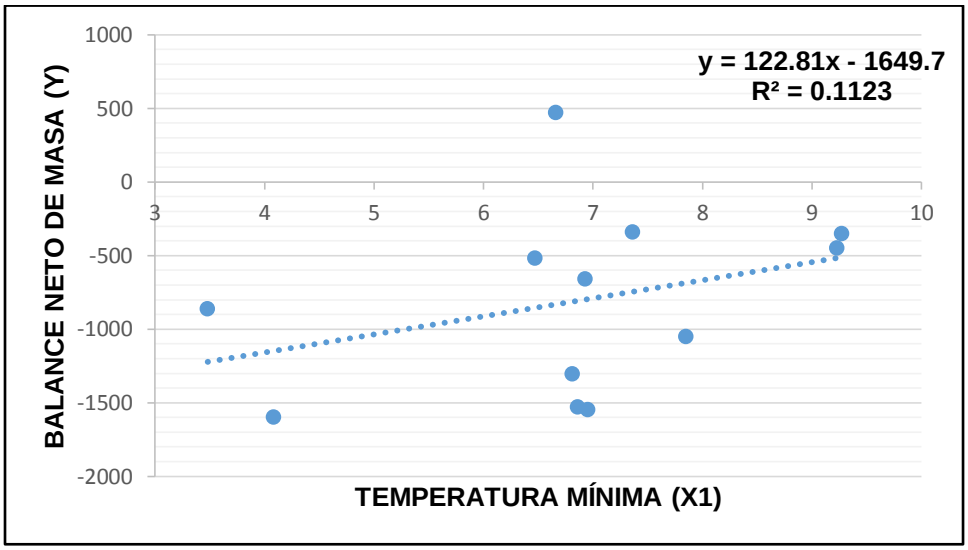
Se determinó la cantidad de m^3 de agua aportados a la microcuenca Parón producto de la fusión glaciar, por cada año hidrológico. Y se explicó la variación de ese volumen por cada año hidrológico.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

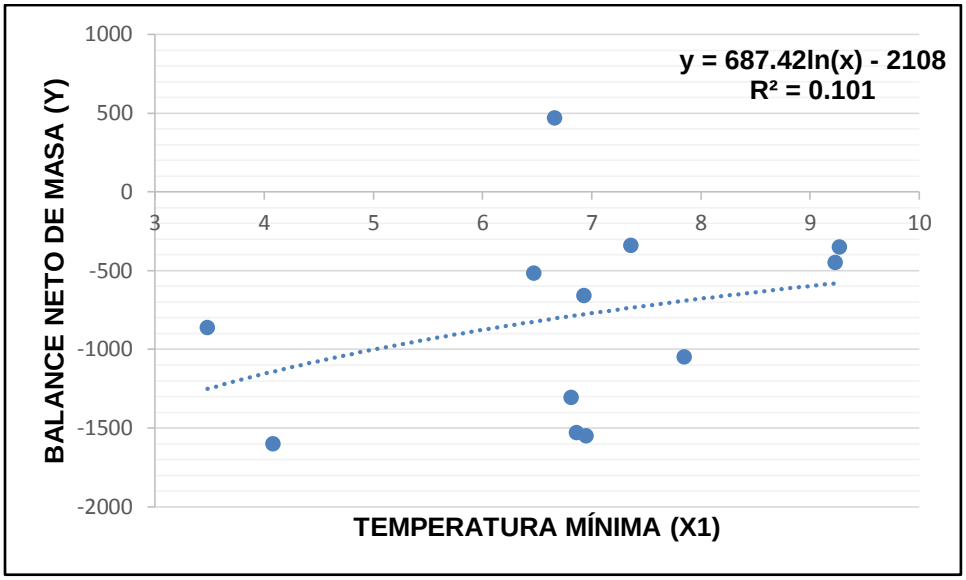
4.1. Resultados

4.1.1. Regresiones simples



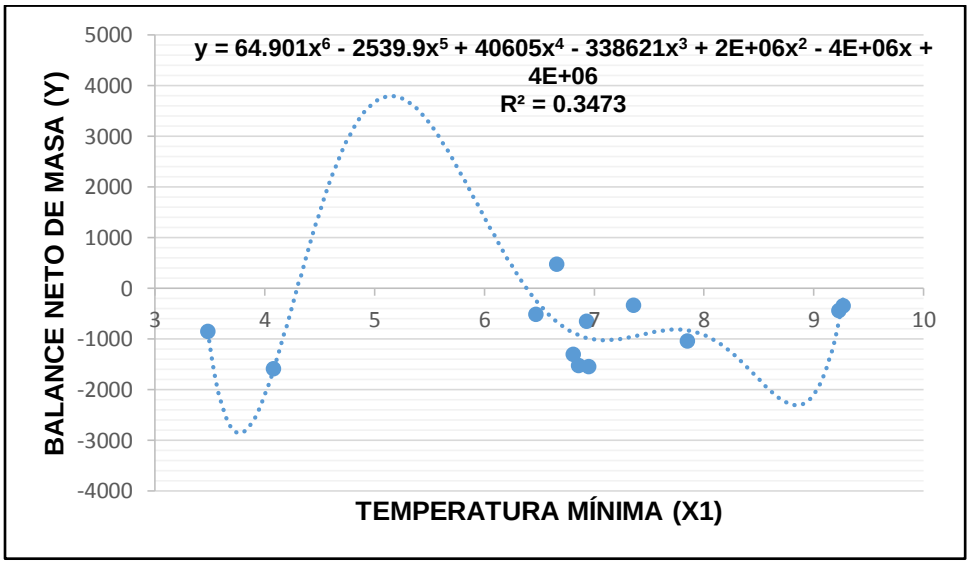
Gráfica 2: Regresión Simple Lineal entre la Temperatura Mínima y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

$$\boldsymbol{Y = 122.81 * (X1) - 1649.7} \qquad \boldsymbol{R^2 = 0.1123}$$



Gráfica 3: Regresión Simple Logarítmica entre la Temperatura Mínima y el balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

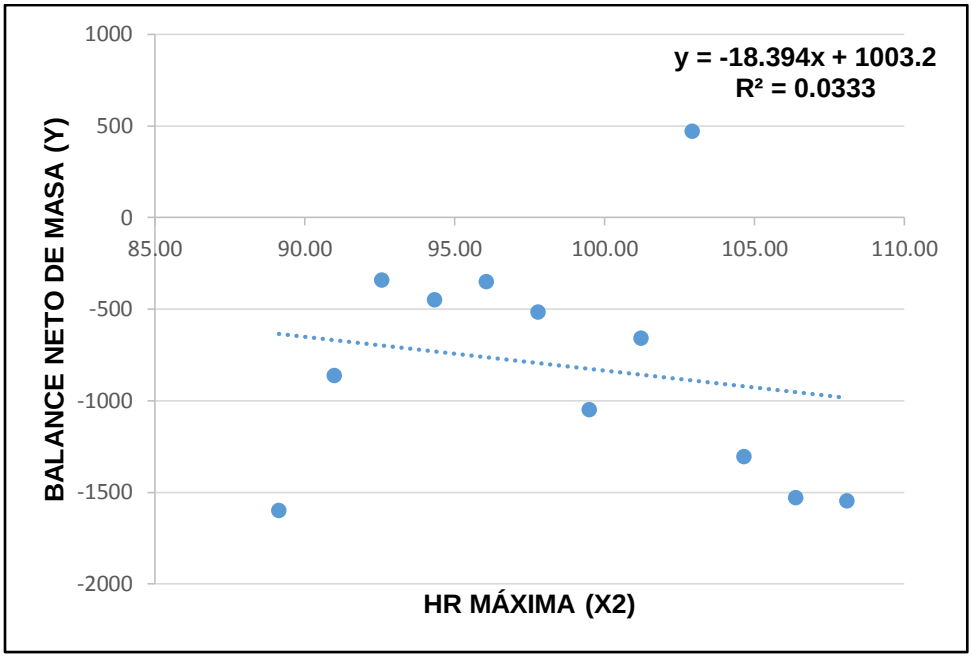
$$\boldsymbol{Y = 687.42 * Ln(X1) - 2108 \qquad R^2 = 0.101}$$



Gráfica 4: Regresión Simple Polinomial entre la Temperatura Mínima y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

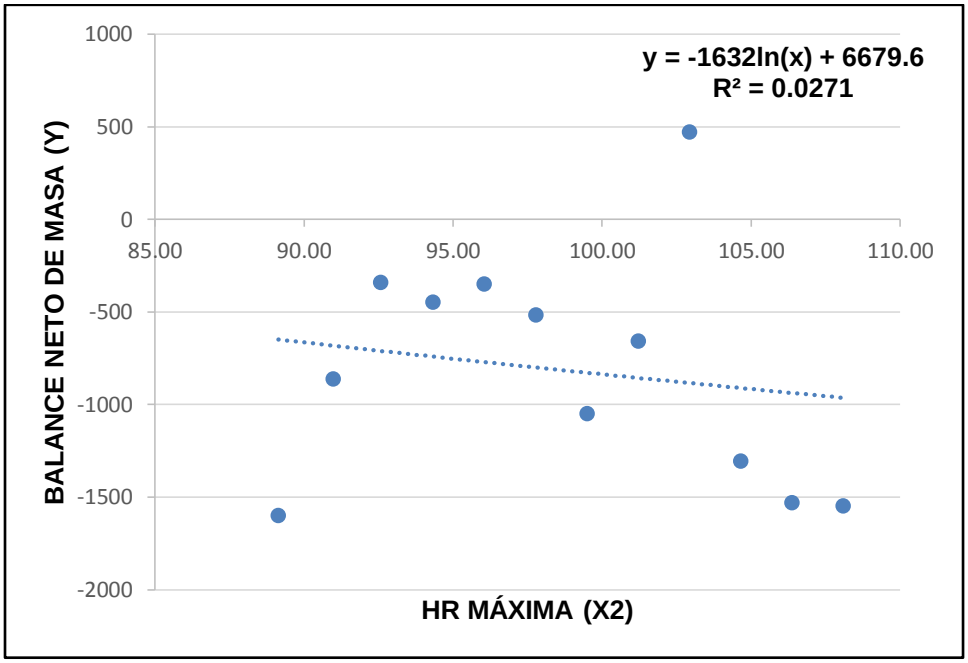
$$\boldsymbol{Y = 64.901 * (X1)^6 - 2539.9 * (X1)^5 + 40605 * (X1)^4 - 338621 * (X1)^3 + 2 * 10^6 * (X1)^2 - 4 * 10^6 * (X1) + 4 * 10^6}$$

$$\boldsymbol{R^2 = 0.3473}$$



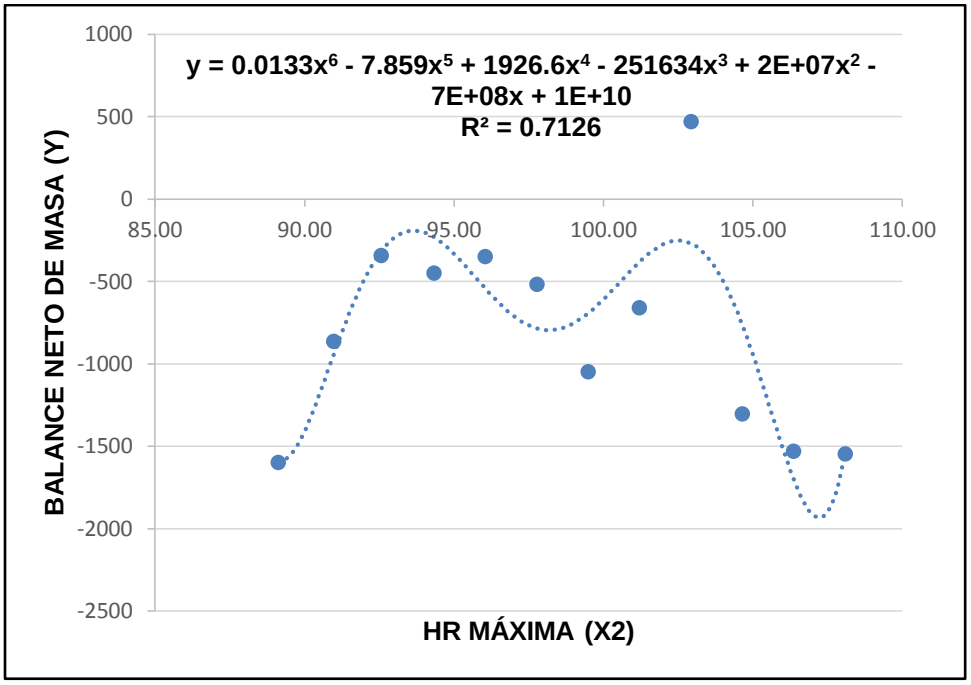
Gráfica 5: Regresión Simple Lineal entre la Humedad Relativa Máxima y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

$$\boldsymbol{Y = -18.394 * (X2) + 1003.2 \qquad R^2 = 0.0333}$$



Gráfica 6: Regresión Simple Logarítmica entre la Humedad Relativa Máxima y el balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

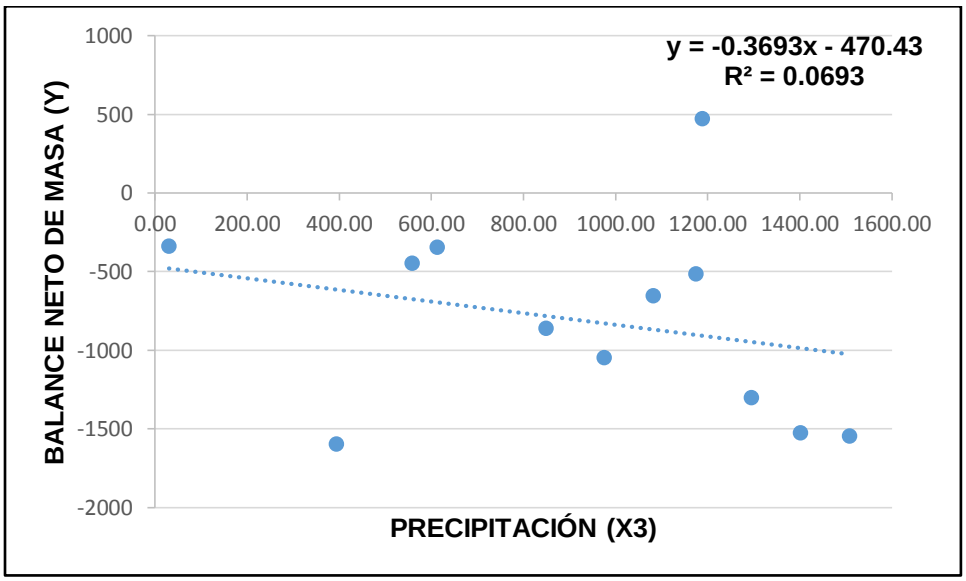
$$\boldsymbol{Y = -1632 * Ln(X2) + 6679.6 \qquad R^2 = 0.0271}$$



Gráfica 7: Regresión Simple Polinomial entre la Humedad Relativa Máxima y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

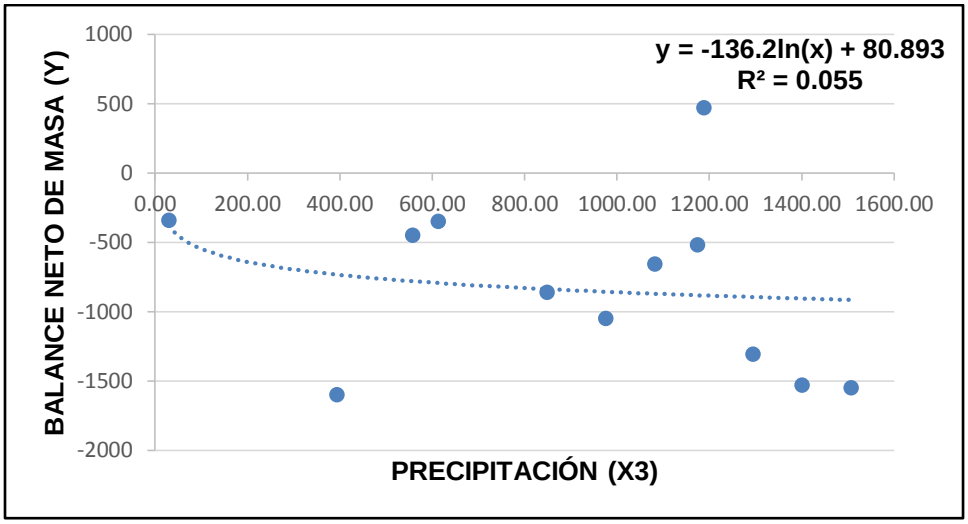
$$Y = 0.0133 * (X2)^6 - 7.859 * (X2)^5 - 1926.6 * (X2)^4 - 251634 * (X2)^3 + 2 * 10^7 * (X2)^2 - 7 * 10^8 * (X2) + 1 * 10^{10}$$

$$R^2 = 0.7126$$



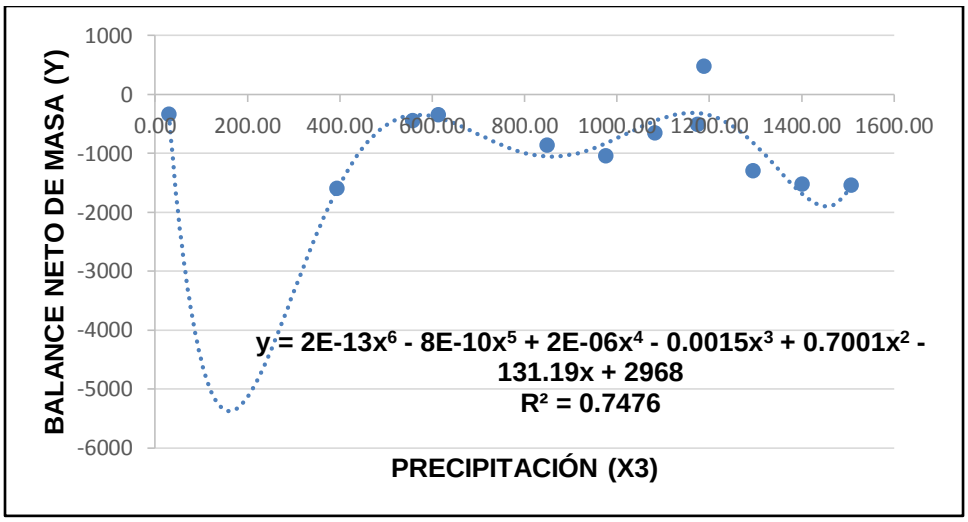
Gráfica 8: Regresión Simple Lineal Entre la Precipitación y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

$$Y = -0.3693 * (X3) - 470.43 \qquad R^2 = 0.0693$$



Gráfica 9: Regresión Simple Logarítmica entre la Precipitación y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

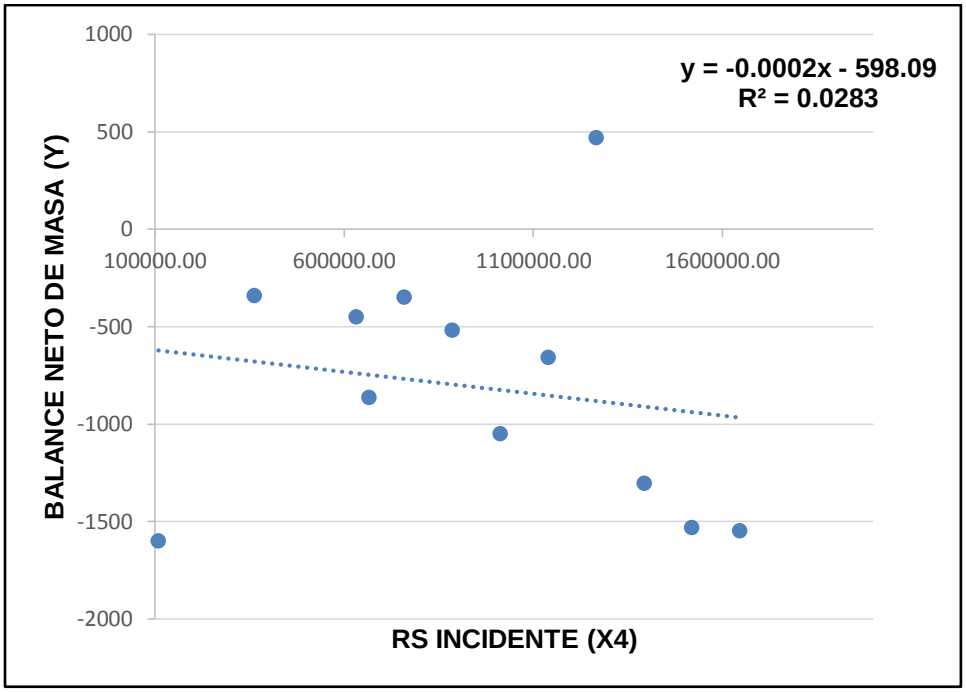
$$Y = -136.2 * Ln(X3) + 80.893 \qquad R^2 = 0.055$$



Gráfica 10: Regresión Simple Polinomial entre la Precipitación y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

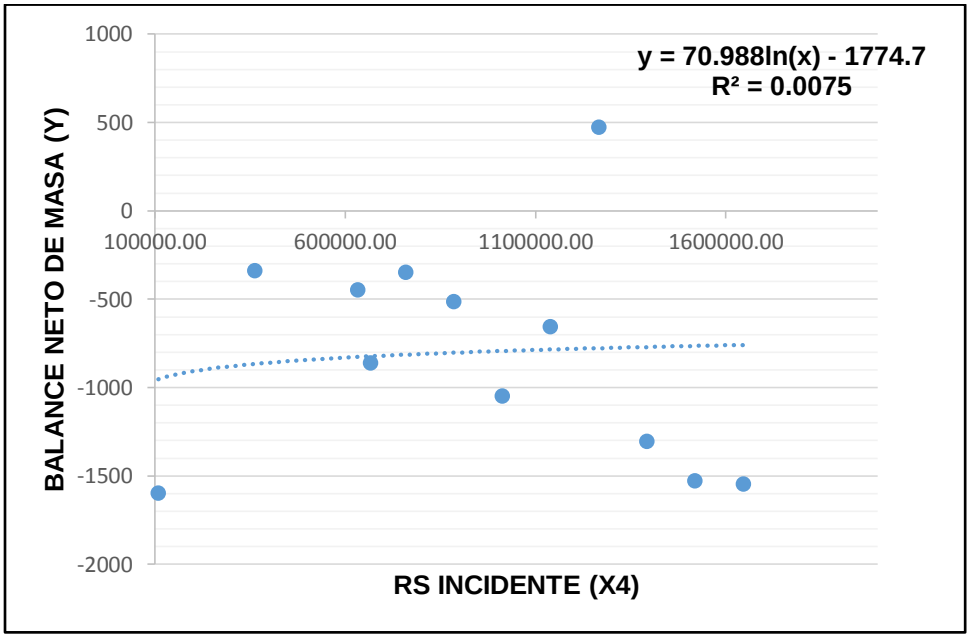
$$Y = 2 * 10^{-13} * (X3)^6 - 8 * 10^{-10} * (X3)^5 + 2 * 10^{-6} * (X3)^4 - 0.0015 * (X3)^3 + 0.7001 * (X3)^2 - 131.19 * (X3) + 2968$$

$$R^2 = 0.7476$$



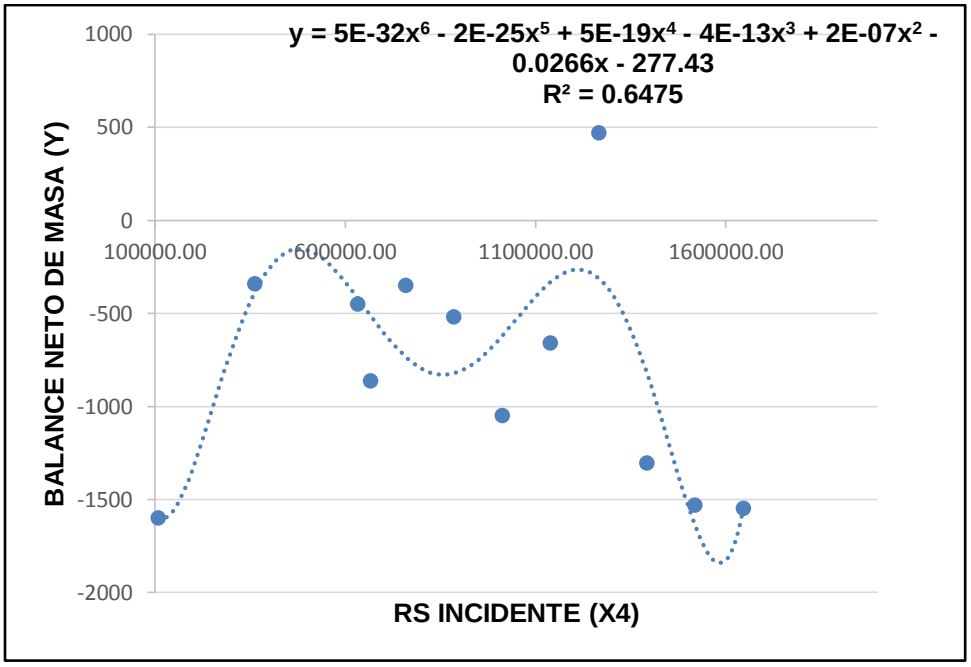
Gráfica 11: Regresión Simple Lineal entre la Radiación Solar Incidente y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

$$\boldsymbol{Y = -0.0002 * (X4) - 598.09 \qquad R^2 = 0.0283}$$



Gráfica 12: Regresión Simple Logarítmica entre la Radiación Solar Incidente y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

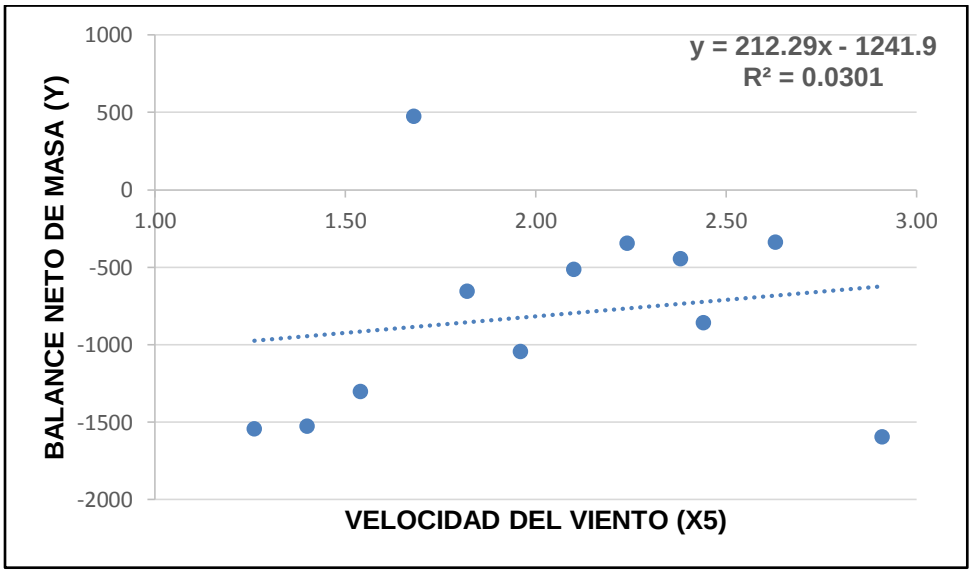
$$\boldsymbol{Y = 70.988 * Ln(X4) - 1774.7 \qquad R^2 = 0.0075}$$



Gráfica 13: Regresión Simple Polinomial entre la Radiación Solar Incidente y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

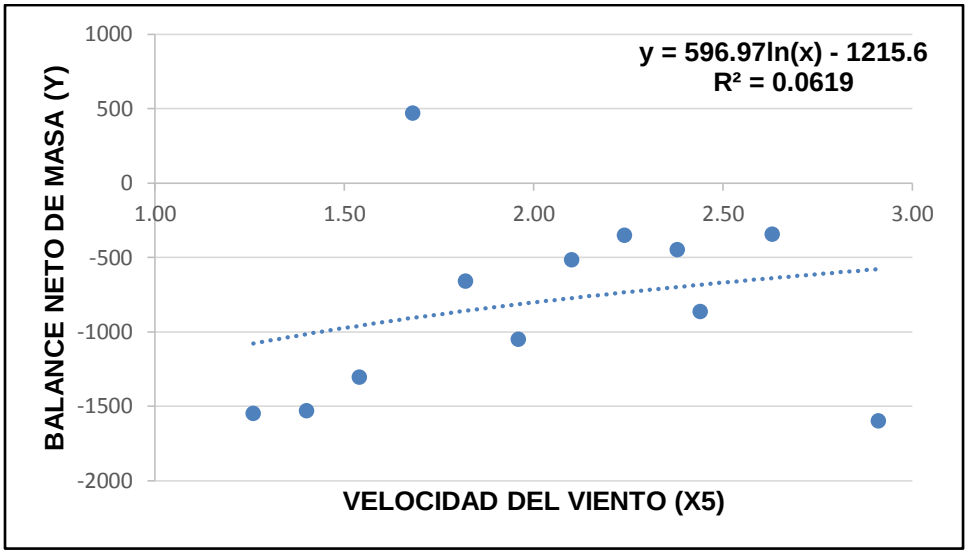
$$Y = 5 * 10^{-32} * (X4)^6 - 2 * 10^{-25} * (X4)^5 + 5 * 10^{-19} * (X4)^4 - 4 * 10^{-13} * (X4)^3 + 2 * 10^{-7} * (X4)^2 - 0.0266 * (X4) - 277.43$$

$$R^2 = 0.6475$$



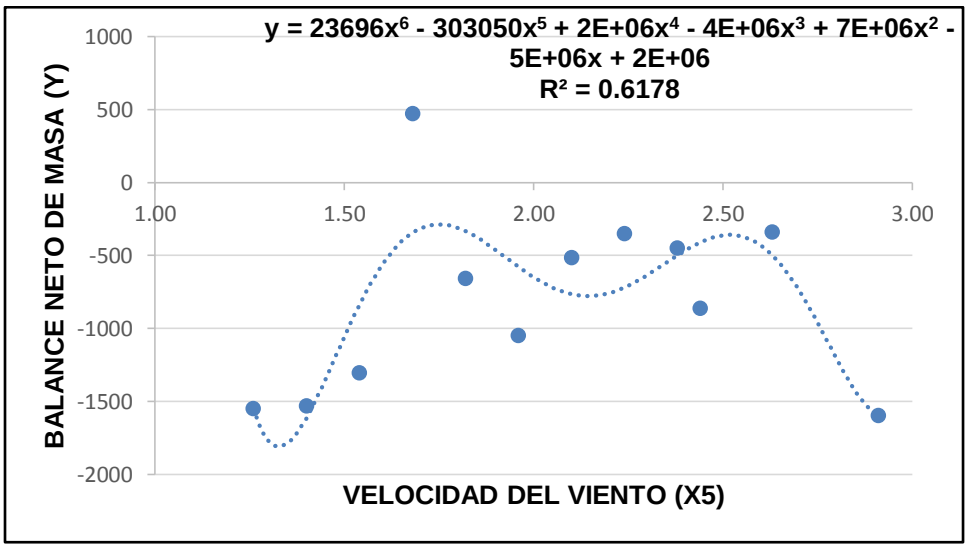
Gráfica 14: Regresión Simple Lineal entre la Velocidad del Viento y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

$$Y = 212.29 * (X5) - 1241.9 \qquad R^2 = 0.0301$$



Gráfica 15: Regresión Simple Logarítmica entre la Velocidad del Viento y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

$$Y = 596.97 * Ln(X5) - 1215.6 \qquad R^2 = 0.0619$$



Gráfica 16: Regresión Simple Polinomial entre la Velocidad del Viento y el Balance Neto de Masa (Fusión Glaciar).

$$Y = 23696 * (X5)^6 - 303050 * (X5)^5 + 2 * 10^6 * (X5)^4 - 4 * 10^6 * (X5)^3 + 7 * 10^6 * (X5)^2 - 5 * 10^6 * (X5) + 2 * 10^6$$

$$R^2 = 0.6178$$

Tabla 9: Resumen de resultados de regresiones simples

VARIABLES	TIPO DE RS*	ECUACIÓN RESULTANTE Y COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN	
T MÍN. (X1) VS FUSIÓN GLACIAR	RS* LINEAL	$Y = 122.81 * (X1) – 1,649.7$	$R^2 = 0.1123$
	RS* LOGAR.	$Y = 687.42 * Ln(X1) – 2,108$	$R^2 = 0.101$
	RS* POLINÓMIAL	$Y = 64.901 * (X1)^6 - 2539.9 * (X1)^5 + 40,605 * (X1)^4 – 33,8621 * (X1)^3 + 2 * 10^6 * (X1)^2 - 4 * 10^6 * (X1) + 4 * 10^6$	$R^2 = 0.3473$
HR MÁX. (X2) VS FUSIÓN GLACIAR	RS* LINEAL	$Y = -18.394 * (X2) + 1,003.2$	$R^2 = 0.0333$
	RS* LOGAR.	$Y = -1,632 * Ln(X2) + 6,679.6$	$R^2 = 0.0271$
	RS* POLINÓMAL	$Y = 0.0133 * (X2)^6 - 7.859 * (X1)^5 – 1,926.6 * (X2)^4 – 251,634 * (X2)^3 + 2 * 10^7 * (X2)^2 - 7 * 10^8 * (X2) + 1 * 10^{10}$	$R^2 = 0.7126$
PP (X3) VS FUSIÓN GLACIAR	RS* LINEAL	$Y = -0.3693 * (X3) + 470.43$	$R^2 = 0.0693$
	RS* LOGAR.	$Y = -136.2 * Ln(X3) + 80.893$	$R^2 = 0.055$
	RS* POLINÓMIAL	$Y = 2 * 10^{-13} * (X3)^6 - 8 * 10^{-10} * (X3)^5 + 2 * 10^{-6} * (X3)^4 - 0.0015 * (X3)^3 + 0.7001 * (X3)^2 - 131.19 * (X3) + 2,968$	$R^2 = 0.7476$
RS INSIDENTE (X4) VS FUSIÓN GLACIAR	RS* LINEAL	$Y = -0.0002 * (X4) - 598.09$	$R^2 = 0.0283$
	RS* LOGAR.	$Y = 70.988 * Ln(X4) – 1,774.7$	$R^2 = 0.0075$
	RS* POLINÓMIAL	$Y = 5 * 10^{-32} * (X4)^6 - 2 * 10^{-25} * (X4)^5 + 5 * 10^{-19} * (X4)^4 - 4 * 10^{-13} * (X4)^3 + 2 * 10^{-7} * (X4)^2 - 0.0266 * (X4) - 277.43$	$R^2 = 0.6475$
VV (X5) VS FUSIÓN GLACIAR	RS* LINEAL	$Y = 212.29 * (X5) – 1,241.9$	$R^2 = 0.0301$
	RS* LOGAR.	$Y = 596.97 * Ln(X5) – 1,215.6$	$R^2 = 0.0619$
	RS* POLINÓMIAL	$Y = 23,696 * (X5)^6 – 303,050 * (X5)^5 + 2 * 10^6 * (X5)^4 - 4 * 10^6 * (X5)^3 + 7 * 10^6 * (X5)^2 - 5 * 10^6 * (X5) + 2 * 10^6$	$R^2 = 0.6178$

Nota 1: T MÍN: Temperatura Mínima, HR MAX: Humedad Relativa Máxima, PP: Precipitación, RS INCIDENTE: Radiación Solar Incidente, VV: Velocidad del Viento.

Nota 2: *RS: Regresión simple.

4.1.2. Regresión lineal múltiple

Los resultados de prueba de normalidad, constantes de regresión lineal múltiple y coeficiente de determinación se extrajeron del Software SPSS Statistics 22, luego de ingresar los datos de la Tabla 5 en dicho Software. Estos resultados se muestran a continuación:

Tabla 10: Resultados de prueba de normalidad

NOMBRE DE VARIABLES	CÓDIGO DE VARIABLES	SHAPIRO - WILK* SIGNIFICANCIA
FUSIÓN GLACIAR	Y	0.404
TEMPERATURA MÍNIMA	X1	0.113
HUMEDAD RELATIVA MÁXIMA	X2	0.881
PRECIPITACIÓN	X3	0.665
LN (RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE)	X'4	0.020
VELOCIDAD DEL VIENTO	X5	0.979

Nota: * Prueba de contraste de normalidad (Shapiro – Wilk) para una cantidad de datos menores a 50.

La fila resaltada con color azul, indica que los datos de dicha variable no se ajustan a una distribución normal. Los detalles se explicarán en el ítem de discusión de resultados.

Tabla 11: Resultado de las constantes que acompañan a cada variable en la ecuación de regresión lineal múltiple, y coeficiente de determinación

NOMBRE DE VARIABLES	CÓDIGO DE VARIABLES	RESULTADO
CONSTANTE	b	-90,325.949
TEMPERATURA MÍNIMA	X1	-124.055
HUMEDAD RELATIVA MÁXIMA	X2	449.076
PRECIPITACIÓN	X3	-0.223
LN (RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE)	X'4	2,174.280
VELOCIDAD DEL VIENTO	X5	8,254.308
COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN	R^2	0.516

Ecuación de regresión lineal múltiple

Teniendo en cuenta la Tabla 11, la ecuación de regresión lineal múltiple quedaría de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{Y = -124.055 * (X1) + 449.076 * (X2) - 0.223 * (X3) + 2,174.280 * (X'4) + 8,254.308 * (X5) - 90,325.949}$$

$$\boldsymbol{R^2 = 0.516}$$

En forma literal sería:

$$\boldsymbol{FUSIÓN\ GLACIAR = -124.055 * (TEMPERATURA\ MÍNIMA) + 449.076 * (HUMEDAD\ RELATIVA\ MÁXIMA) - 0.223 * (PRECIPITACIÓN) + 2,174.280 * \left(Ln\left(RADIACIÓN\ SOLAR\ INCIDENTE\right)\right) + 8,254.308 * (VELOCIDAD\ DEL\ VIENTO) - 90,325.949}$$

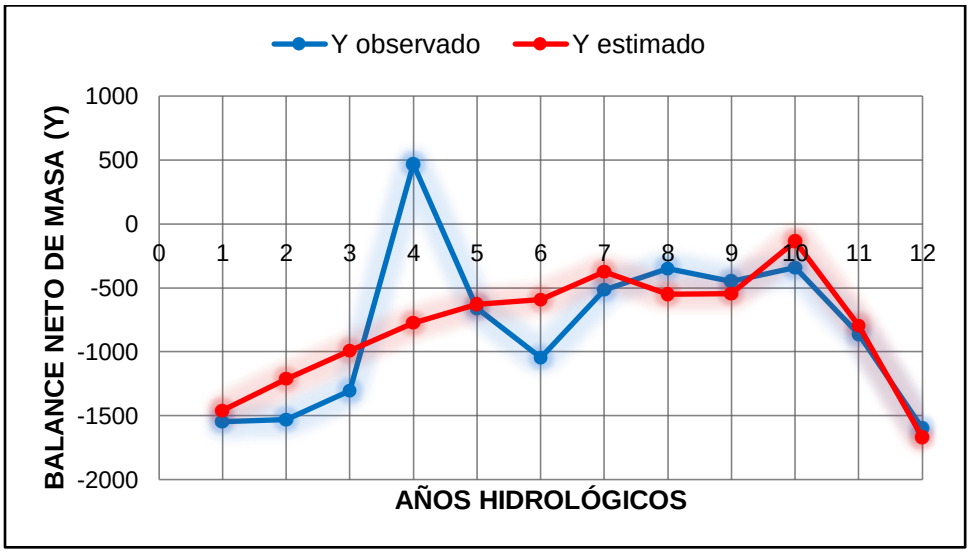
$$\boldsymbol{R^2 = 0.516}$$

4.1.3. Balance neto de masa (fusión glaciar) observado y estimado

Utilizando la ecuación anterior de fusión glaciar y los datos de la Tabla 6, se puede obtener el balance neto de masa (fusión glaciar) estimado, para luego compararlo con el balance neto de masa (fusión glaciar) observado. Estos resultados se muestran en el siguiente cuadro y la siguiente figura:

Tabla 12: Balance neto de masa (fusión glaciar) observado y estimado

AÑOS HIDROLÓGICOS	AÑOS PARA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	Balance Neto de Masa Observado (mm eq agua)	Balance Neto de Masa Estimado (mm eq agua)
		Y observado	Y estimado
2004 - 2005	1	-1,547.51	-1,458.77
2005 - 2006	2	-1,529.33	-1,214.90
2006 - 2007	3	-1,304.68	-991.17
2007 - 2008	4	470.59	-773.13
2008 - 2009	5	-657.79	-629.10
2009 - 2010	6	-1,048.14	-592.80
2010 - 2011	7	-516.57	-373.67
2011 - 2012	8	-349.06	-548.40
2012 - 2013	9	-448.46	-545.46
2013 - 2014	10	-341.03	-137.30
2014 - 2015	11	-861.75	-794.90
2015 - 2016	12	-1,598.14	-1,668.65



Gráfica 17: Balance neto de masa (fusión glaciar) observado y estimado

$$Y_{estimado} = -124.055 * (X1) + 449.076 * (X2) - 0.223 * (X3) + 2,174.280 * (X'4) + 8,254.308 * (X5) - 90,325.949 \qquad R^2 = 0.516$$

Dónde: X1, Temperatura mínima; X2, Humedad relativa máxima; X3, Precipitación; X'4, Ln (Radiación solar incidente); X5, Velocidad del viento.

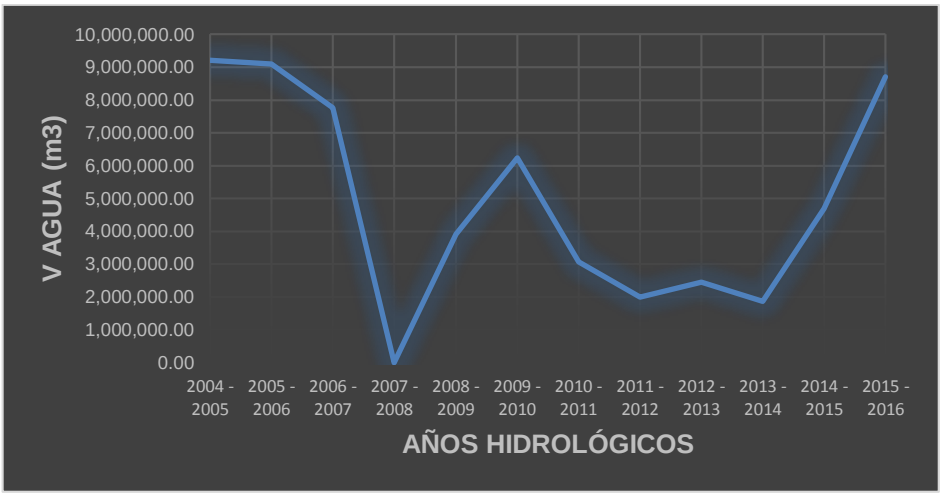
4.1.4. Volumen de agua estimado aportado a la microcuenca Parón

Tabla 13: Volumen de agua estimado aportado a la microcuenca Parón por año hidrológico

AÑOS HIDROLÓG.	ÁREA DEL GLACIAR ARTESONRAJU (m^2)	FUSIÓN GLACIAR EXPRESADA EN Balance Neto de Masa (mm eq agua)	FUSIÓN GLACIAR EXPRESADA EN Balance Neto de Masa (m eq agua)	VOLUM. DE AGUA ESTIMADO (m^3)
	X	Y	Y^+	$V = X * Y^+$
2004 - 2005	5,950,000.00	-1,547.51	1.54751	**9,207,684.50**
2005 - 2006	5,950,000.00	-1,529.33	1.52933	**9,099,513.50**
2006 - 2007	5,950,000.00	-1,304.68	1.30468	**7,762,846.00**
2007 - 2008	5,950,000.00	470.59	0.47059	**0.00**
2008 - 2009	5,950,000.00	-657.79	0.65779	**3,913,850.50**
2009 - 2010	5,950,000.00	-1,048.14	1.04814	**6,236,433.00**
2010 - 2011	5,950,000.00	-516.57	0.51657	**3,073,591.50**
2011 - 2012	5,700,000.00	-349.06	0.34906	**1,989,642.00**
2012 - 2013	5,450,000.00	-448.46	0.44846	**2,444,107.00**
2013 - 2014	5,450,000.00	-341.03	0.34103	**1,858,613.50**
2014 - 2015	5,450,000.00	-861.75	0.86175	**4,696,537.50**
2015 - 2016	5,450,000.00	-1,598.14	1.59814	**8,709,863.00**
		TOTAL		**58,992,682.00**

Nota 1: Y^+ es el balance neto de masa dividido entre 1000 (para pasarlo de "mm eq agua" á "m eq agua"), y expresado en forma positiva para calcular el volumen de agua estimado que se aporta a la microcuenca Parón.

Nota 2: $V = X*Y^+$, siempre y cuando Y sea negativo.



Gráfica 18: Volumen de agua estimado aportado a la microcuenca Parón por año hidrológico.

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Regresiones simples

Las regresiones simples de las variables meteorológicas (temperatura mínima, humedad relativa máxima, precipitación, radiación solar incidente y velocidad del viento) con el balance neto de masa (fusión glaciar), de la Tabla 9, muestran un coeficiente de determinación R^2 más cercano a uno, cuando las regresiones simples fueron del tipo polinomial de grado 6, en comparación con los otros tipos de regresiones (lineal y logarítmica); dichos coeficientes son: $\boldsymbol{R^2_{Tmin} = 0.3473}$, $\boldsymbol{R^2_{HRmáx} = 0.7126}$, $\boldsymbol{R^2_{PP} = 0.7476}$, $\boldsymbol{R^2_{RSI} = 0.6475}$, $\boldsymbol{R^2_{VV} = 0.6178}$. Sin embargo, Dávila (2015), obtuvo coeficientes menores a 0.1 para las variables meteorológicas precipitación, humedad relativa y temperatura, en el mismo tipo de regresión simple (polinomial de grado 6), y según Rojo (2007) esto indica un muy mal ajuste. Esta diferencia de resultados se dio posiblemente por el pretratamiento de datos meteorológicos, ya que Dávila (2015) reconstruyó la información meteorológica con otra metodología, y no con la función Pronóstico del Software Excel 2017 como se hizo en el presente trabajo de investigación.

Según la Tabla 9 el coeficiente de determinación entre temperatura mínima y el balance neto de masa (fusión glaciar) en una regresión simple de tipo polinomial de grado 6 fue de $\boldsymbol{R^2_{Tmin} = 0.3473}$, indicando esto según Rojo (2007) un mal ajuste (por tener $\boldsymbol{R^2 < 0.4}$); por su parte Hock (2003)

menciona que para glaciares no tropicales, la temperatura del aire y la ablación anual (fusión glaciar) tienen una muy buena correlación (muy buen ajuste), que según Rojo (2007) sería cuando $\boldsymbol{R^2 \geq 0.85}$; sin embargo el glaciar Artesonraju es un glaciar tropical, y concordante con esto Sicart, Hock, & Six (2008) mencionan que para glaciares tropicales, como es el caso del glaciar Artesonraju, la temperatura ya no es un factor muy influyente en el determinación de la fusión glaciar, sino más bien lo es la radiación solar. La influencia de la radiación solar sobre la fusión glaciar, se verifica en la Tabla 9 del presente trabajo de investigación, donde el balance neto de masa (fusión glaciar) se determina por medio de la radiación solar incidente en una regresión simple del tipo polinomial de grado 6, con un 64.75% de explicación ($\boldsymbol{R^2 = 0.6475}$), indicando según Rojo (2007) un buen ajuste entre ambas variables.

4.2.2. Humedad relativa y fusión glaciar

Para los 3 últimos años hidrológicos (2013 al 2016) y según la Tabla 5 muestra que a medida que la humedad relativa máxima (**X2**) disminuye aumenta la fusión glaciar (**Y**). Concordante con este tema, Herrero (2007) menciona que la permanencia de nieve se ve influenciada por las fuerzas evaporativas, es decir que a menor humedad relativa menor permanencia de nieve (mayor fusión).

4.2.3. Precipitación y fusión glaciar

Para los 12 años hidrológicos de estudio (2004 al 2016) y según la Tabla 5 la precipitación ha ido variando entre subidas y bajadas para todo el periodo de estudio, esto ha provocado algo parecido en la fusión glaciar, donde también hubo subidas y bajadas, incluso en el año hidrológico 2007-2008 cuando se tuvo un balance neto de masa positivo; concordante con esto, y en un contexto internacional Nolin & Stroeve (1997) señalan, por ejemplo, que las variaciones en las temperaturas y precipitaciones causadas por el cambio climático, han provocado en las cuencas del río Bravo (ubicada al suroeste de los E.E.U.U. y México) variaciones importantes en la acumulación y la fusión de nieve.

4.2.4. Velocidad del viento y fusión glaciar

Para todo el periodo de evaluación 2002 al 2016 y según la Tabla 5 la velocidad del viento siempre va en aumento, mientras que la fusión glaciar disminuye y aumenta. Concordante con esto Gustafson (2008) menciona que el equivalente de agua, que es la unidad con la cual se mide el balance neto de masa (fusión glaciar) se ve afectada por el viento.

4.2.5. LA NIÑA y el balance neto de masa

Para el periodo hidrológico 2007-2008, de la Tabla 5, se tuvo un balance neto de masa positivo (valor obtenido: 470.59 mm eq de agua), al respecto Favier *et al,* (2004) a este suceso le da una explicación: durante un fenómeno de **LA NIÑA** se tiene una temperatura del aire más baja y la isoterma 0°C (ELA) desciende de altitud, esto provoca precipitaciones sólidas a altitudes bajas incrementándose el albedo, de esta manera el balance de masa se estabiliza y puede presentar valores positivos.

4.2.6. Regresión lineal múltiple

De las 6 variables de estudio, el logaritmo natural de la radiación solar incidente (**LN (RSI), X'4**), de la Tabla 10, no pasó la prueba de normalidad, por no haber excedido el umbral de $p = 0.05$ (valor obtenido: $p = 0.02$), indicando esto que los datos de dicha variable no se distribuyen normalmente, es decir que no se distribuyen como una distribución normal, tal y como lo menciona Romero (2016) cuando $p < 0.05$, los datos no se ajustan a una distribución normal, donde p es la significancia estadística.

La ecuación de regresión lineal múltiple, que vincula 5 variables meteorológicas (temperatura mínima, humedad relativa máxima, precipitación, Ln (radiación solar incidente) y velocidad del viento) para explicar el balance neto de masa (fusión glaciar), de la pág. 48, tiene un coeficiente de determinación de $\boldsymbol{R^2 = 0.516}$, indicando esto como lo menciona Rojo (2007) un buen ajuste entre las variables; en comparación con la ecuación que encontró Dávila (2015), la cual solo vincula 3 variables meteorológicas (precipitación, humedad relativa y temperatura) para explicar el balance de masa (fusión glaciar) donde su coeficiente de determinación solo fue de $\boldsymbol{R^2 = 0.0371}$, y según Rojo (2007) este resultado indica muy mal ajuste entre las variables. Esta diferencia se debió

posiblemente al pre tratamiento de los datos meteorológicos, ya que Dávila (2015) reconstruyó la data meteorológica con otro tipo de metodología y no con la función Pronóstico del Software Excel 2007.

4.2.7. Balance neto de masa (fusión glaciar) observado y estimado

La Gráfica 17, de la pág. 49, muestra el balance neto de masa (fusión glaciar) estimado (color rojo), muy parecido a la gráfica del balance neto de masa (fusión glaciar) observado (color azul), debido a que su R^2 es de buen ajuste ($R^2 = 0.516$), esto según Rojo (2007); algo similar encontró *Cadier et al,* (2014), y esto se muestra en la Gráfica 1, de la pág. 9, donde se muestra que el balance de masa observado y calculado son muy parecidos, debido a que su R^2 es también de buen ajuste ($R^2 = 0.62$), tal y como lo menciona Rojo (2007).

4.2.8. Volumen de agua aportado a la microcuenca Parón

Para el año hidrológico 2007-2008, de la Tabla 13, como balance neto de masa y por tener un valor positivo, no hubo aporte de agua a la microcuenca Parón, pero la fusión siempre se da en todo el año hidrológico; es por eso el valor de 0.00 en el volumen de agua aportado para ese año hidrológico. Al respecto *Favier et al,* (2004) menciona que este valor positivo en el balance de masa se debió a un fenómeno natural llamado **LA NIÑA**, fenómeno en la cual la isoterma 0°C (ELA) desciende de altitud, y provoca precipitaciones sólidas a altitudes bajas incrementándose el albedo, de esta manera el balance de masa se estabiliza y puede presentar valores positivos.

Para los 12 años hidrológicos de evaluación (2004 al 2016), de la Tabla 13, se perdieron en total **58, 992, 682.00 m^3** de agua producto de la fusión en el glaciar Artesonraju, el cual se aportó a la microcuenca Parón; algo casi similar obtuvieron Torres, Brenning & García (2013) quienes obtuvieron una pérdida de **40 millones de m^3** de agua producto de la fusión del glaciar Pirámide, ubicado en Chile Central, para un periodo de evaluación de 35 años.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En respuesta a los objetivos

- La relación de las variables meteorológicas con la fusión glaciar es lineal múltiple, con un coeficiente de determinación R^2 **= 0.516**. Y el volumen estimado de agua aportado a la microcuenca Parón es de **58, 992, 682.00 m^3** de agua.

- La relación de la temperatura mínima del aire con la fusión glaciar es polinomial de grado 6, con un coeficiente de determinación de R^2 **= 0.3473**.

- La relación de la humedad relativa máxima con la fusión glaciar es polinomial de grado 6, con un coeficiente de determinación de R^2 **= 0.7126**.

- La relación de la precipitación con la fusión glaciar es polinomial de grado 6, con un coeficiente de determinación de R^2 **= 0.7476**.

- La relación de la radiación solar incidente con la fusión glaciar es polinomial de grado 6, con un coeficiente de determinación de R^2 **= 0.6475**.

- La relación de la velocidad del viento con la fusión glaciar es polinomial de grado 6, con un coeficiente de determinación de R^2 **= 0.6178**.

Referido a las discusiones

- Los coeficientes de determinación, en las regresiones simples de tipo polinomial de grado 6, mejoran considerablemente, cuando la data meteorológica se completa con la función Pronóstico del Software Excel 2017, en comparación con la metodología de reconstrucción de datos meteorológicos de Dávila (2015).

- Para glaciares tropicales, como es el caso del glaciar Artesonraju, el balance neto de masa (fusión glaciar) se explica por una influencia de la radiación solar y no por la temperatura. Esto se verificó porque se obtuvo un R^2 **= 0.6475**, calificado como buen ajuste según Rojo (2007), para la radiación solar incidente con el balance neto de masa (fusión glaciar), en una regresión simple de tipo polinomial de grado 6; el cual es mayor que R^2 **= 0.3473,** calificado como mal ajuste según Rojo (2007), para la temperatura con el balance neto de masa (fusión glaciar), en una regresión simple de tipo polinomial de grado 6.

- Para los 3 últimos años hidrológicos (2013 al 2016) se obtiene una relación inversa entre la humedad relativa máxima (**X2**) y el balance neto de masa (fusión glaciar, **Y**).

- Para los 12 años hidrológicos (2004 al 2016), los cambios en las precipitaciones, producto del cambio climático, producen cambios en el balance neto de masa (fusión glaciar).

- El equivalente de agua, unidad con la cual se mide el balance neto de masa (fusión glaciar), se ve influenciado por la velocidad del viento.

- El fenómeno de **LA NIÑA**, ocasionó un balance neto de masa positivo para el año hidrológico 2007-2008.

- La variable logaritmo natural de la radiación solar incidente (**LN(RSI), X'4**) no pasó la prueba de normalidad, es decir sus datos no se distribuyen normalmente.

- La ecuación de regresión múltiple encontrada, el cual vincula 5 variables meteorológicas (temperatura mínima, humedad relativa máxima, precipitación, radiación solar incidente y velocidad del viento) con el balance neto de masa (fusión glaciar), tiene un coeficiente de determinación $\boldsymbol{R^2}$ **= 0.516**, que es mucho mejor que el encontrado por Dávila (2015) el cual obtuvo un $\boldsymbol{R^2}$ **= 0.0371**, y solo vinculó 3 variables meteorológicas (precipitación, humedad relativa y temperatura) con el balance neto de masa (fusión glaciar); dichas diferencias se debieron posiblemente a las diferentes metodologías utilizadas para completar datos meteorológicos.

- El balance neto de masa (fusión glaciar) observado y estimado (o calculado) son muy similares, tal y como se muestra en la Gráfica 16, de la pág. 49; y esa similitud también la encontró *Cadier et al,* (2014), la cual se muestra en la Figura 1, de la pág. 9. Estas similitudes se deben a que ambos coeficientes de determinación están en el calificativo de buen ajuste: $\boldsymbol{0.50 \leq R^2 < 0.85}$, esto según Rojo (2007); dichos coeficientes de determinación fueron: $\boldsymbol{R^2 = 0.516}$ y $\boldsymbol{R^2 = 0.62}$, para el presente trabajo de investigación y el de *Cadier et al,* (2014) respectivamente.

- Para el periodo hidrológico 2007-2008, no hubo aporte de agua por balance neto de masa (fusión glaciar), debido a la influencia de un fenómeno natural llamado **LA NIÑA**.

- Se perdió más millones de m^3 de agua producto de la fusión en el glaciar Artesonraju, que en el glaciar Pirámide (Chile central), y en menos tiempo de evaluación.

5.2. Recomendaciones

- La data de variables meteorológicas se completó con la Función Pronóstico del Software Excel 2017; por lo tanto, se recomienda obtener más registros de las variables meteorológicas (sobre todo de humedad relativa máxima, precipitación, radiación solar incidente y velocidad del viento) para evitar la utilización de la Función Pronóstico del Software Excel 2017 y así trabajar con una data más real.

- Se recomienda utilizar datos de temperatura mínima del aire de una estación en el mismo glaciar, ya que la data de esta variable fue de una estación meteorológica (estación Artesoncocha) que se encuentra a 1,090 metros por debajo de la altitud del glaciar Artesonraju, esto debido a que la temperatura varía con la altitud.

- La ecuación de regresión lineal múltiple se ha obtenido estadísticamente y es de carácter más explicativo que predictivo; por lo tanto, se recomienda realizar un modelo matemático de la fusión glaciar con las variables meteorológicas para realizar predicciones futuras con alta certeza, ya que un modelo matemático sí tiene un alto carácter predictivo.

- Solo se tiene 2 registros de área del Glaciar Artesonraju (del año 2002 y del año 2012); por lo tanto, se recomienda obtener más registros de esta área para que la estimación del volumen de agua aportado a la microcuenca Parón sea más real.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Armstrong, R. L., & Brun, E. (2008). *SNOW AND CLIMATE Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling.* (R. L. Armstrong, & E. Brun, Edits.) Cambridge: Cambridge University Press.

Asenjo Riquelme, C. A. (2009). *NAVEGACIÓN Y OPERACIÓN EN.* Tesis para optar al Título de: Ingeniero Naval, Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería Naval, Valdivia.

AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA-UNIDAD DE GLACIARES Y RECURSOS HÍDRICOS-HUARAZ [ANA-UGRH-HUARAZ]. (2014). *ESTUDIO Y MONITOREO DE GLACIARES.* PRODUCTO ANUAL, ANCASH, HUARAZ.

Barros, A. P., & Lettenmaier, D. P. (1993). *Dynamic Modeling of the Spatial Distribution of Precipitation in Remote Mountainous Areas*. *American Meteorological Society, 121*, 1195-1214.

Bórquez Gonzáles, R. E. (2007). *ANÁLISIS DEL ESCENARIO ACTUAL DE LOS GLACIARES DE MONTAÑA EN CHILE DESDE LA MIRADA DE LA SEGURIDAD ECOLÓGICA.* Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS ESCUELA DE AGRONOMÍA, Santiago de Chile.

Cadier, E., Villacis, M., Maisincho, L., Manciati, C., Ayabaca, E., Loyo, C., & Francou, B. (2014). Modelling melting in low latitude Andean glaciers. *ResearchGate*, 1-12.

Cornwell Varela, E. N. (2002). *RECONSTRUCCION DEL EQUIVALENTE EN AGUA DE NIEVE MEDIANTE IMAGENES MODIS INCORPORADAS A UN BALANCE DE MASA - ENERG´IA.* TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCION RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO, UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, Santiago de Chile.

Cuadrat, J. M., & Pita, M. F. (2004). *CLIMATOLOGÍA* (Tercera ed.). (J. I. Tena, Ed.) Paracuellos de Jarama (Madrid), España: Ediciones Cátedra (Grupo Anaya, S.A.).

Dávila Roller, L. R. (2015). *Efecto de la variación de la temperatura, precipitación y humedad relativa en el balance de masa de los Glaciares Uruashraju, Yanamarey y Artesonraju de la Coordillera Blanca, entre los años 1995-2010.* TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL, Huaraz-Perú.

Dingman, S. L. (2002). *Physical Hydrology* (Segunda ed.). New Jersey: Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.

Favier, V., Wagnon, P., Charazin, J. P., Maisincho, L., & Coudrain, A. (2004). One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 109*, 1-15. doi:10.1029/2003JD004359

Francou, B., & Pouyaud, B. (2004). *MÉTODO DE OBSERVACIÓN DE GLACIARES EN LOS ANDES TROPICALES mediciones de terreno y procesamiento de datos* (1 ed.). Francia.

Francou, B., & Pouyaud, B. (Octubre de 2008). Glaciares: ¿cómo y dónde estudiarlos? *Revista Virtual REDESMA, 2*(3), 9-17.

Francou, B., Ribstein, P., Semiond, H., Portocarrero, C., & Rodríguez, A. (1995). BALANCES DE GLACIARES Y CLIMA EN BOLIVIA Y PERÚ: IMPACTO DE LOS EVENTOS ENSO. *Bull. Inst. fr. études andines, 24*(3), 661-670.

Garstka, W. U. (1964). Snow and snow survey. En V. P. Singh, & V. T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology* (págs. 10-12). New York: McGraw-Hill.

Gustafson, J. R. (2008). *Quantifying Spatial Variability of Snow Water Equivalent, Snow.* In Partial Fulfillment of the Requirements For the Degree of MASTER OF SCIENCE WITH A MAJOR IN HYDROLOGY, THE UNIVERSITY OF ARIZONA, Arizona.

Herrero Lantarón, J. (2007). *MODELO FÍSICO DE ACUMULACIÓN Y FUSIÓN DE NIEVE.* Tesis para la Obtención de Título de Doctor, Granada.

Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hidrology, 282*(1-4), 104-115.

Kling, H., Fürst, J., & Nachtnebel, H. P. (2006). Seasonal, spatially distributed modelling of accumulation and melting of snow for computing runoff in a long-term, large-basin water balance model. *Hydrological Processes, 20*(10), 2141-2156.

Langlois, A., Scharien, R., Geldsetzer, T., Iocozza, J., Barber, D. G., & Yackel, J. (2008). Estimation of snow water equivalent over first-year sea ice using AMSR-E and surface observations. *ELSEVIER*, 3656-3667.

Liston, G. E., & Sturm, M. (1998). A SNOW-TRANSPORT MODEL FOR COMPLEX TERRAIN. *Journal of Glaciology, 44*(148), 498-516.

López Martínez, J. (2009). IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS REGIONES POLARES. *Revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 17*(2), 164-171.

Male, D. H., & Gray, D. M. (1981). *Hanbook of Snow. Principles, processes, management & use.* Canada.

Matsuo, T., & Sasyo, Y. (1980). Melting of Snowflakes below Freezing Level in the Atmosphere. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 59*(1), 10-24.

Orosco Medina, I. (2014). *MODELACIÓN PARSIMONIOSA Y ESPACIALMENTE DISTRIBUIDA DE LOS PROCESOS DE ACUMULACIÓN Y FUSIÓN DE NIEVE.* TESIS DOCTORAL, Valencia, España.

Pita Fernández, S., & Pértega Díaz, S. (1997). Utilización e Interpretación de las Técnicas de Correlación disponible. *CAD ATEN PRIMARIA, 8*, 141-144.

Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C., & Lange, H. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Invest. Geograf. Chile, 34*, 29-60. doi:10.5354/0719-5370.2000.27709

Rodríguez Jiménez, R. M., Benito Capa, A., & Portela Lozano, A. (2004). *METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA.* (F. (. Tecnología), Ed.) España.

Rojo Abuin, J. M. (2007). *Regresión lineal múltiple.* Informe de Laboratorio de Estadistica, Instituto de Economía y Geografía, Madrid.

Romero Saldaña, M. (Julio de 2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Revista Enfermería del Trabajo, 6*(3), 105-114.

Rosenzweig, C., Karoly, D. J., Imenson, A., Liu, C., Menzel, A., Rawlins, S., . . . Tryjanowski, P. (2007). Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. *Spring*, 79-131.

Serrano Cañadas, E. (2005). Glaciares, Permafrost y Cambio Climatico. *ASOCIACIÓN METEOROLÓGICA ESPAÑOLA, 5*(9), 20-26.

Sicart, J. E., Hock, R., & Six, D. (2008). Glacier melt, air temperature, and energy balance in different climates:. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 113*, 1-11. doi:10.1029/2008JD010406

Spiegel, M. R. (1991). *ESTADISTICA* (Segunda ed.). Madrid: MC GRAU HILL.

Spiegel, M. R., & Sthepens, L. J. (2009). *Estadística* (Cuarta ed.). (P. E. Vázquez, Ed.) Mexico D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.

Torres, H. J., Brenning, A., & García, J. L. (2013). Balance de masa del glaciar cubierto del Pirámide (Chile Central, 33°S) entre 1965 y 2000 aplicando métodos geodésicos. *REVISTA DE GEOGRAFÍA ESPACIOS, 3*(5), 11-25.

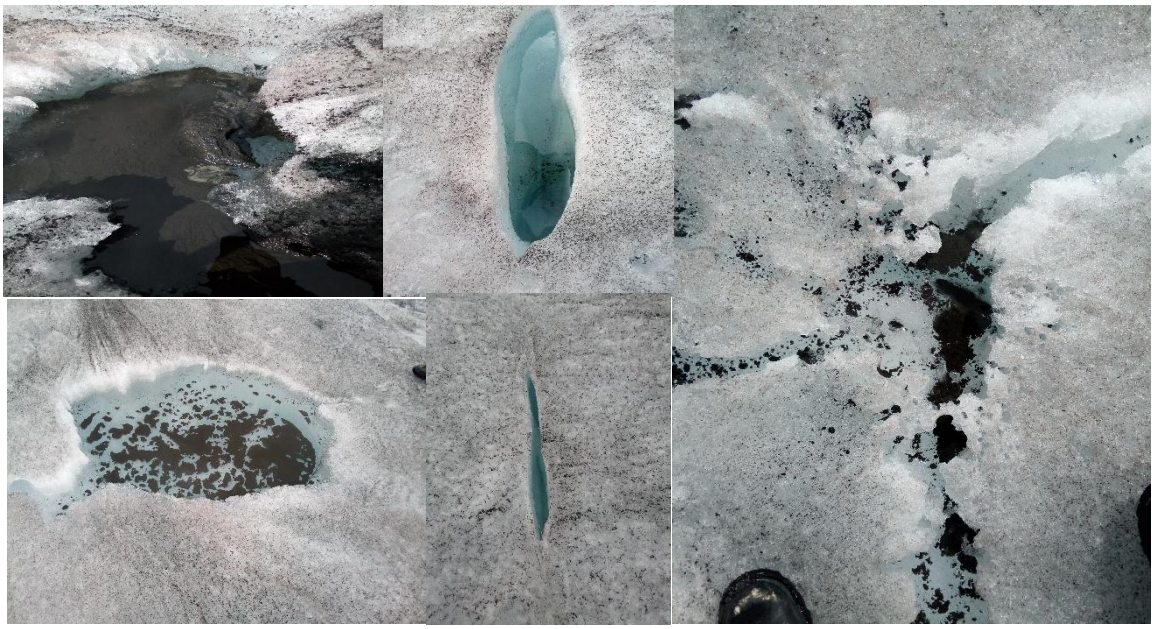
ANEXOS

PANEL FOTOGRÁFICO

Fotografía 1: Apoyo en la medición de las balizas en la ZONA DE ABLACIÓN DEL GLACIAR ARTESONRAJU.

Fotografía 2: Estación Meteorológica en la ZONA DE ABLACIÓN DEL GLACIAR ARTESONRAJU.

Fotografía 3: Zona de ablación y zona de acumulación del GLACIAR ARTESONRAJU



Fotografía 4: Socavación del contaminante precipitado sobre la superficie del GLACIAR ARTESONRAJU, y formación de escorrentía por fusión glaciar.