

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Impacto del material particulado PM 2.5 en la fusión del
glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia
de Urubamba, región Cusco 2021**

Ambar Veronica Pazos Perez

Para optar el Título Profesional de
Ingeniera Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios y la virgen por permitirme lograr mis objetivos y acompañarme guiando mi camino.

Agradecer a mi familia, a mi padre Juan por ser mi referente de esfuerzo y trabajo, a mi madre Elva por enseñarme que todo sacrificio tiene su recompensa y por ser un ejemplo de constancia y superación, a mis hermanos por creer en mí y por sus consejos.

Al Ingeniero Juan Jose Zuñiga Negron quien fue fundamental en el desarrollo de esta investigación, por su conocimiento y experiencias compartidas. A los trabajadores del SERNANP - Cusco quienes me brindaron su valioso apoyo para el desarrollo de la investigación.

A mi Asesora Mg. Blga. Verónica Nelly Canales Guerra por orientarme y guiarme en el proceso de la investigación.

Finalmente, a todos mis amigos que estuvieron presentes con sus frases de aliento y motivación para el desarrollo de esta tesis.

DEDICATORIA

A mis padres Juan Pazos Miranda y Elva Pérez Bayona, por confiar en mi capacidad, por brindarme su confianza y comprensión, por ser el ejemplo, modelo y a enseñarme que todo es posible.

A mis hermanos Juan Carlos, Brian Arturo y Junior Edu por brindarme su comprensión y sus consejos.

A mis tíos José Pazos Miranda y Marcelino Pérez Bayona por brindarme su cariño, por apoyarme en los momentos difíciles e impulsarme a seguir mis sueños que desde el cielo me cuidan y protegen.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	1
1.1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema.....	2
1.1.2.1. Problema general.....	2
1.1.2.2. Problemas específicos.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Justificación e importancia.....	4
1.4. Hipótesis y variables.....	5
1.4.1. Hipótesis de la investigación.....	5
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes de la investigación.....	6
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	6

2.1.2.	Antecedentes nacionales.....	11
2.1.3.	Antecedentes locales.....	12
2.2.	Bases teóricas.....	13
2.2.1.	Glaciares	13
2.2.2.	La formación de los glaciares	13
2.2.3.	Partes de un glaciar.....	13
2.2.4.	Clasificación de los glaciares	15
2.2.5.	Cambio climático.....	18
2.2.6.	Impactos del cambio climático en los glaciares	18
2.2.7.	Fusión del glaciar.....	18
2.2.8.	Contaminación atmosférica	19
2.2.9.	Material Particulado	20
2.3.	Definición de términos básicos	20
2.4.	Modelo teórico conceptual.....	22
CAPÍTULO III		23
METODOLOGÍA.....		23
3.1.	Método y alcance de la investigación	23
3.1.1.	Método de investigación.....	23
3.1.2.	Alcance de la investigación tipo de resultado a obtener.....	23
3.1.3.	Nivel de investigación	23
3.2.	Diseño de la investigación	24
3.3.	Población y muestra.....	24
3.3.1.	Población	24

3.3.2. Muestra	24
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	24
3.4.1. Técnicas de recolección de datos.....	24
3.4.2. Instrumentos de recolección de datos	25
3.5. Procedimiento de la investigación	25
CAPÍTULO IV	33
RESULTADOS Y DISCUSIONES	33
4.1. Resultado de concentración de PM 2.5.....	33
4.1.1. Punto 1 – nivel superficial	33
4.1.2. Punto 2 – a 5 cm de profundidad.....	37
4.1.3. Volumen total mensual de fusión del glaciar Incachiriasca a nivel superficial y a 5 cm de profundidad.....	41
4.2. Prueba de hipótesis	42
4.3. Discusión de resultados.....	44
CONCLUSIONES.....	46
RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXOS	53

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas de muestreo de Nieve	27
Tabla 2. Cálculo de la concentración de PM 2.5 en la masa de nieve.....	33
Tabla 3. Energía absorbida por el PM 2.5	34
Tabla 4. Nieve fundida en el glaciar Incachiriasca.....	36
Tabla 5. Cálculo de PM 2.5 con equipo SP2 y software Arduino.....	38
Tabla 6. Energía Absorbida por el PM 2.5	39
Tabla 7. Nieve fundida en el glaciar Incachiriasca.....	40
Tabla 8. ANOVA del Modelo Cúbico entre el material particulado PM 2.5 y la fusión de la nieve	42
Tabla 9. Coeficientes de las variables entre el material particulado PM 2.5 y la fusión de la nieve	43
Tabla 10. Resumen del modelo Cantidad de PM 2.5 - Superficial y A 5 cm de profundidad	44

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Partes de un glaciar y zonas circundantes	14
<i>Figura 2.</i> Glaciarete en las laderas del Cerro Brujo, en el Valle del Río San Andrés, cuenca del Tinguiririca.....	15
<i>Figura 3.</i> Glaciar de montaña en el Canal Beagle ⁽³⁴⁾	16
<i>Figura 4.</i> Glaciar de Valle: Glaciar Universidad	16
<i>Figura 5.</i> Glaciar rocoso al interior del Valle de Navarro, Cuenca del río Juncal	17
<i>Figura 6.</i> Un estudio científico explica su impacto en el derretimiento de los glaciares de la Cordillera Blanca, en la región Áncash.	19
<i>Figura 7.</i> Modelo teórico conceptual	22
<i>Figura 8.</i> Recolección de muestras de nieve	26
<i>Figura 9.</i> Mapa de ubicación del Glaciar Incachiriasca	28
<i>Figura 10.</i> Muestras de Nieve del Glaciar	29
<i>Figura 11.</i> Derretimiento de las muestras	30
<i>Figura 12.</i> Filtrado de las muestras	30
<i>Figura 13.</i> Muestras de nieve filtradas	30
<i>Figura 14.</i> Muestras de Nieve filtradas	31
<i>Figura 15.</i> Equipo SP2	32
<i>Figura 16.</i> Variación de PM 2.5 en la masa de nieve	34
<i>Figura 17.</i> Variación de la Energía absorbida por el PM 2.5.....	35
<i>Figura 18.</i> Nieve fundida por el PM 2.5	37
<i>Figura 19.</i> Cálculo de PM 2.5 en la masa de nieve	38
<i>Figura 20.</i> Cálculo de energía Absorbida por el PM 2.5	40
<i>Figura 21.</i> Nieve fundida en el glaciar Incachiriasca.....	41
<i>Figura 22.</i> Volumen total mensual de Fusión del glaciar Incachiriasca a nivel superficial y a 5 cm de profundidad	42

<i>Figura 23.</i> Modelo Cúbico entre el material particulado PM 2.5 y la fusión de la nieve ...	43
<i>Figura 24.</i> Filtro Blanco o limpio	57
<i>Figura 25.</i> Filtro de GLA – PM 2.5 04	57
<i>Figura 26.</i> Filtro de GLA – PM 2.5 03	58
<i>Figura 27.</i> Filtro de GLA – PM 2.5 02	58
<i>Figura 28.</i> Filtro de GLA – PM 2.5 01	59
<i>Figura 29.</i> Glaciar Incachiriasca	60
<i>Figura 30.</i> Recolección de muestras de nieve en el glaciar Incachiriasca	60
<i>Figura 31.</i> Superficie del glaciar Incachiriasca con presencia de material particulado PM 2.5	61
<i>Figura 32.</i> Ausencia de cobertura de nieve sobre el glaciar Incachiriasca	61

RESUMEN

El efecto del cambio climático es considerado la principal causa del retroceso de los glaciares en la Cordillera del Vilcabamba. Además, el factor antrópico es considerado como una causa del retroceso glaciar porque existe el incremento de los gases de efecto invernadero debido a la emisión de contaminantes atmosféricos de las diferentes actividades que realiza el hombre. Entre los contaminantes atmosféricos, el más representativo es el material particulado PM 2.5 conocido comúnmente con el nombre de hollín que tiene una gran capacidad para absorber la luz solar y en efecto induce al derretimiento de la masa de los glaciares.

Se realizaron expediciones desde enero del 2020 hasta octubre del 2020 mensualmente, donde se recolectaron muestras de nieve a nivel superficial y a una profundidad de 5 m.

Se fundieron y filtraron las muestras en campo para después llevarlas y analizarlas utilizando un método innovador llamado LAHM (Light Absorption Heating Method), esta técnica determina la masa de material particulado PM 2.5. Al encontrar la cantidad de material particulado PM 2.5, se aplicó el programa SNICAR, con el fin de estimar la disminución del albedo en la nieve y al mismo tiempo se utilizaron datos de radiación solar, que fueron registrados en base a una estación meteorológica cercana al glaciar de estudio. Para determinar la cantidad de energía que absorbe y así obtener los datos de cantidad de nieve fusionada por efecto de la presencia de material particulado PM 2.5.

Los resultados muestran que el material particulado PM 2.5, tiene un impacto negativo sobre los glaciares debido a que existe una pérdida significativa de masa de nieve en el muestreo a nivel superficial al igual que el muestreo a 5 cm de la capa superficial, con los resultados más representativos de fusión del glaciar en los meses de mayo, setiembre y octubre.

Palabras clave: Glaciares, material particulado PM 2.5, albedo, fusión, antrópico, nieve.

ABSTRACT

The effect of climate change is considered the main cause of the retreat of the glaciers in the Cordillera of Vilcabamba. In addition, the anthropic factor is considered a cause of glacial retreat because there is an increase in greenhouse gases due to the emission of atmospheric pollutants from the different activities carried out by man. Among the atmospheric pollutants, the most representative is the particulate material PM 2.5 commonly known by the name of soot, which has a great capacity to absorb sunlight and in effect induces the melting of the mass of glaciers.

Expeditions were carried out from January 2020 to October 2020 on a monthly basis, where snow samples were collected at the surface level and at a depth of 5m.

The samples were melted and filtered in the field and then taken and analyzed using an innovative method called LAHM (Light Absorption Heating Method), this technique determines the mass of PM 2.5 particulate material. Upon finding the amount of PM 2.5 particulate material, the SNICAR program was applied in order to estimate the decrease in albedo in the snow and at the same time solar radiation data were used, which were recorded based on a meteorological station close to the study glacier. To determine the amount of energy absorbed and thus obtain data on the amount of snow melted by the presence of PM 2.5 particulate material.

The results show that PM_{2.5} particulate material has a negative impact on glaciers due to the fact that there is a significant loss of snow mass in the sampling at the surface level as well as the sampling at 5 cm from the surface layer, with the most representative results of glacier melting in the months of May, September and October.

Keywords: Glaciers, PM 2.5 particulate matter, albedo, melting, anthropic, snow.

INTRODUCCIÓN

El material particulado PM 2.5 que se deposita sobre el glaciar Incachiriasca de la cordillera del Vilcabamba está relacionado directamente con la disminución del albedo de la nieve lo que conlleva a una mayor absorción de la radiación solar lo que produce un incremento de la fusión del glaciar. Este proceso involucra el derretimiento acelerado del glaciar, involucrado también al aumento de la temperatura global y la variación de las precipitaciones por causa del calentamiento global. La presente investigación describe las concentraciones de material particulado PM 2.5 en el glaciar Incachiriasca por un periodo de 10 meses del año 2020. El estudio de este glaciar se realizó puesto que es considerado uno de los más representativos de la cordillera de Vilcabamba ubicado cerca al nevado de Salkantay que es conocido mundialmente por estar de camino para llegar al Santuario Histórico de Machupicchu.

Se plantearon tres objetivos específicos. El primero fue determinar la masa de material particulado PM 2.5 presente en la nieve del glaciar Incachiriasca de manera mensual por un periodo de 10 meses. El segundo objetivo consistió en estimar la cantidad de energía absorbida producto del material particulado PM 2.5, donde se utilizó el programa de simulación SNICAR y también datos meteorológicos de radiación solar en una estación meteorológica cercana. Finalmente, el tercer objetivo consistió en estimar la cantidad de nieve fusionada por el material particulado PM 2.5. Las muestras de nieve se obtuvieron a 5000 m.s.n.m. en promedio.

El procesamiento en campo consistió en el derretimiento de las dos muestras obtenidas a nivel superficie y a profundidad de 5 cm, luego se procedió al filtrado de la nieve en estado líquido para su posterior análisis en el instrumento instrumento LAHM (Light Absorption Heating Method) el cual permite determinar la masa de material particulado PM 2.5 presentes en cada filtro. Se usó el programa de simulación SNICAR, diseñada en el National Center for Atmospheric Research (NCAR) con el fin de estimar el cambio (disminución) del albedo de la nieve.

La autora.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

En los últimos años los glaciares a nivel mundial vienen sufriendo cambios, los glaciares se derriten aceleradamente lo que incrementa la formación de lagunas de origen glaciar que constituyen excelentes escenarios de reserva de agua, especialmente en época de estiaje, lo cual es positivo para el uso de las poblaciones aledañas que también ofrece belleza escénica en zonas de alta montaña donde los turistas disfrutan y realizan diferentes actividades. Por otro lado, los glaciares y lagunas de origen glaciar debido a dinámica que están incrementado la ocurrencia de avalanchas destructivas que sería considerado como un riesgo a las poblaciones que se ubican cerca de los glaciares.

El Perú tiene la mayor cantidad de glaciares tropicales, pero en las últimas décadas las crecientes temperaturas han hecho que las masas de nieve reduzcan en un 51 % de la superficie en los últimos 50 años en las cordilleras del Perú. Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA) 2017. En la cordillera del Vilcanota el 33 % de su área glaciar desapareció entre 1970 y 2010 (ANA, 2012), en la cordillera Blanca, donde el 27 % de la superficie se perdió en el periodo 1970-2003 (ANA, 2012). Para la cordillera Central, la extensión glaciar disminuyó en un 56 % entre los años 1970 y 2007 (ANA, 2012).

El glaciar Incachiriasca forma parte de la cordillera de Vilcabamba que es un sistema montañoso complejo, afluente de los ríos Urubamba y Apurímac. Este glaciar junto con las aguas del glaciar Salkantay, son fuente de abastecimiento para la irrigación de

tierras de cultivo del distrito de Mollepata. Sus aguas además son utilizadas en pequeñas irrigaciones del Sector de Carrizales, Sisal y Ayrahua, desembocando a las aguas de río Blanco y siendo a la vez recurso para las poblaciones aledañas al distrito de Limatambo, como para la central hidroeléctrica de Macchupicchu, que se encuentran en el río Urubamba, frontera de las cordilleras Urubamba y Vilcabamba.

En los últimos años, las fuentes antrópicas de contaminantes en el ambiente han aumentado en el distrito de Mollepata que podrían tener su origen en el tráfico vehicular. Entre las principales destacan el sector transporte, (especialmente los vehículos a diésel), que transportan turistas hacia los diferentes atractivos turísticos como el glaciar de Salkantay, la laguna de Humantay, el camino inca al Santuario Histórico de Machupicchu, entre otros. Otra de las fuentes es la quema de residuos agrícolas provenientes de las cocinas rústicas y/o la quema de bosques y pastizales; producto de los incendios forestales que se ha incrementado estos últimos años. A esto se incorpora el tránsito de animales de carga como caballos y mulas, utilizados por arrieros para cubrir las rutas turísticas antes mencionadas. Todas estas fuentes liberan a la atmósfera un conjunto de partículas finas que se transportan hasta los glaciares por medio de los vientos, lo que implica la reducción del albedo y por lo tanto, la fusión del glaciar debido a una mayor absorción de luz solar por parte del glaciar, es decir que las partículas finas al tener un color oscuro, tienen una alta capacidad de absorber la luz solar de manera acelerada por eso al depositarse en los glaciares ennegrece y hace que los glaciares absorban más energía solar acelerando su derretimiento.

Por todo lo antes dicho se formula la siguiente pregunta:

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cuál es el impacto del material particulado PM 25? en el glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021?

1.1.2.2. Problemas específicos

PE1: ¿Qué cantidad de material particulado PM 25? será encontrado en la nieve del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021?

PE2: ¿Cuál es la cantidad de energía solar absorbida por el material particulado PM2.5 en la masa glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021?

PE3: ¿Qué volumen de nieve fundida se pierde en el glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco 2021 por efecto del material particulado PM 2.5?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el impacto del material particulado PM 2.5 en la disminución de la superficie del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco – 2021.

1.2.2. Objetivos específicos

OE1: Determinar la cantidad de material particulado PM 2.5 encontrado en la nieve del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021 mediante la técnica LAHM (Light Absorption Heating Method).

OE2: Estimar la cantidad de energía solar absorbida por el material particulado en la masa glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021 con el Modelo SNICAR (Snow, Ice and Aerosol Radiation).

OE3: Estimar el volumen de nieve perdida del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021 por acción del material particulado PM 2.5.

1.3. Justificación e importancia

Hasta la fecha son mínimos los estudios sobre el material particulado PM 2.5 precipitado en la superficie del glaciar Incachiriasca. En un estudio sobre carbono negro en el área glaciar del Nevado Ampay sugiere la presencia de carbono negro cuya fuente principal es el parque automotor y los incendios forestales, por lo que en la cordillera de Vilcabamba se hace necesaria su medición dada la afluencia turística que viene creciendo estos últimos años con la visita de turistas a la laguna Humantay y al glaciar Salkantay que se encuentra próxima al área de estudio, durante todo el año.

Todo lo anterior contribuye significativamente en la pérdida de masa glaciar, convirtiéndose el PM 2.5 en partículas absorbentes de luz, segundo agente de retroceso glaciar, luego del calentamiento global.

Varias porciones de sustancias elaboradas por las ocupaciones humanas se liberan a la atmosfera, que tienen la posibilidad de estar en suspensión días como las partículas, décadas como los clorofluorocarbonos o inclusive siglos como los gases de efecto invernadero. Aún cuando ciertos de ellos tienen la posibilidad de degradarse en la atmosfera, depositarse en la tierra o el mar o integrarse en los ciclos biogeoquímicos, sus emisiones cada vez más grandes son causa de cientos de los inconvenientes del ambiente más relevantes que enfrentamos actualmente.

Considerando que la población del Perú sigue creciendo rápidamente, la demanda de agua está aumentando; por lo que, es un problema preocupante por los impactos que vienen ocurriendo. Uno se pregunta ¿el glaciar Incachiriasca desaparecerá en un futuro próximo? Si esto sucede, ¿se extinguirán los lagos andinos que actualmente se alimentan de ellos? relacionado con esto estará la reducción del caudal de los ríos, y con ello la vida de las grandes ciudades, la agricultura rural y la industria están al borde de la extinción.

Es muy posible que en el siglo que empieza la sociedad experimente la privación del cambio hídrico con un impacto en la escasez del recurso hídrico y con posibles alteraciones que traerá consigo un alto costo social influyendo en las actividades que realizan los pobladores que captan las aguas provenientes de la desglaciación en la agricultura y actividad ganadera.

En este sentido, resulta fundamental este estudio porque nos ayudará a conocer unas de las causas del por qué los glaciares van retrocediendo cada vez más a una velocidad acelerada, la cual sea útil para la toma de decisiones futuras que sean efectivas.

1.4. Hipótesis y variables

1.4.1. Hipótesis de la investigación

El material particulado PM 2.5 que influye significativamente en la fusión del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021 por efecto del material particulado PM 2.5.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Este estudio presenta la estimación de emisiones y la dispersión atmosférica de Black Carbón en la Región de Antioquia-Colombia. En la zona de estudio se estimaron 850 toneladas de Black Carbón, con un mayor porcentaje obtenido de gases emitidos por el sector transporte debido al incremento del parque automotor que presenta la zona de estudio. Concluyendo que el combustible diésel es el principal responsable de las emisiones de Black Carbón con un porcentaje total de 95 % en la región de Antioquia (1).

En este estudio se realizaron simulaciones numéricas utilizando el modelo Weather Research and Forecasting junto con Chemistry (WRF-Chem) en el Ártico en dos estaciones marcadas, en invierno y primavera durante dos años para investigar el carbono negro atmosférico que causa cambios en la radiación de la superficie. Las simulaciones numéricas mostraron que las concentraciones de carbono negro en las estaciones de invierno son en su mayoría más altas que las concentraciones que se presentan en la estación de primavera y los cambios de temperatura cerca de la superficie terrestre inducidos por carbono negro son fuertes (2).

En la investigación se recolectaron muestras de nieve poco profunda en bolsas de plástico desde la parte superior de la capa de nieve y en una capa de 5 cm de espesor. La concentración de carbono negro en las muestras de nieve se determina utilizando una metodología novedosa. Los valores de carbono negro observados en la nieve antártica fueron superiores a otros previamente reportados y muestran la influencia que tiene las actividades antrópicas. Concluyendo que los valores más altos de

concentración de Carbono negro se encontraron en los sitios más cercanos a las principales fuentes de contaminación (3).

En este estudio se presentó una descripción general de los cambios históricos, la distribución espacial de carbono negro en la nieve y hielo y cómo estos cambios estuvieron relacionados con el derretimiento de la criosfera. Los registros de núcleos de hielo mostraron que en el Himalaya existe un aumento continuo durante ese periodo donde las concentraciones de carbono negro en la nieve en las regiones de latitud media son más altas que las regiones polares. Contemplando así que en la superficie la nieve es responsable del 20 % de la reducción del albedo en la meseta tibetana durante la temporada del deshielo de los glaciares (4).

En la investigación realizada se estudió la influencia de la contaminación en los glaciares de Santiago de Chile. Se realiza una campaña de monitoreo de carbono negro donde se colocan cuatro monitores entre la ciudad y los glaciares junto con estaciones meteorológicas. El análisis de las mediciones indicó un transporte directo de carbono negro entre la ciudad de Santiago de Chile y la cordillera de los Andes. Tomando de referencia esos datos, se estima que la concentración de carbono negro en una de las montañas es mayor en la estación verano y menor en la estación de invierno. A partir de los monitoreos que se realizan, se concluye que Santiago es la única ciudad de Chile en la que el transporte es el principal responsable del carbono negro estudiado (5).

En la investigación realizada se analizó los perfiles verticales de carbono negro y otras impurezas donde se midieron en la masa de nieve estacional y los campos de nieve permanentes en los Andes chilenos durante los inviernos australianos en 22 sitios cerca de Santiago, una ciudad donde la contaminación urbana juega un papel importante. Para las muestras recolectadas en lugares donde no hubo nevadas nuevas durante una semana o más. Donde se da como resultado que la concentración de carbono negro en la nieve superficial es alta y la nieve debajo de la superficie está comparativamente limpia, lo que indica el predominio de la deposición seca de carbono negro (6).

En la investigación realizada se estudió la criosfera del Himalaya donde se presentaron datos de observación actualizados de carbono negro en la atmósfera y en la nieve y el hielo, así como sus efectos en la criosfera en la región Hindu-Kush-Himalayan a lo largo del borde norte del sur de Asia. Existe una variación espacial significativa en las concentraciones medidas de carbono negro en la atmósfera y la criosfera. Las

observaciones existentes muestran un sesgo hacia ciertas áreas, con una notable falta de mediciones en el lado sur del Himalaya. Persiste una incertidumbre significativa en las estimaciones de emisiones de carbono negro en la región de HKH. En el Himalaya, las estimaciones del cambio de albedo debido a carbono negro oscilan entre aproximadamente 2 y 10 % debido a carbono negro presente en la atmósfera (7).

En este estudio desarrollado se presentó un conjunto de mediciones simultáneas en las masas de nieve del albedo de la superficie espectral, concentraciones de carbono negro en 5 cm superiores de la capa de nieve, parámetros físicos de la nieve (tamaño y profundidad de grano) y energía solar incidente. A partir de este conjunto de datos se separa el carbono negro del albedo de la masa de nieve de la variabilidad natural de la nieve donde se muestra un significado correlacionar entre carbono negro en la masa de nieve y el albedo de la superficie. A partir de estas mediciones, se proporcionan parámetros, relacionando el albedo de nieve, en función de la longitud de onda, con el contenido de carbono negro equivalente en el manto de nieve (8).

En la investigación desarrollada se evaluó las partículas que absorben la luz en la masa de nieve y hielo, donde se ha identificado al carbono negro como uno de los principales contaminantes que influyen al cambio climático y la desglaciación. En este artículo de revisión, se documentó varios métodos técnicos para medir las partículas que absorben luz y se revisó el progreso realizado en la medición de las partículas que absorben luz en el Ártico, la meseta tibetana y otras regiones de latitudes medias. También se informa el progreso en el modelado de las concentraciones de masa, la reducción del albedo, el forzamiento radiactivo y el impacto climático e hidrológico de las partículas que absorben luz a escalas global y regional (9).

Este estudio evaluó el impacto inicial de carbono negro en el albedo de la nieve, así como también las reacciones asociadas debido a la edad de la nieve y la presencia del carbono negro durante la desglaciación. La medición de nieve y el carbono negro se realiza en el laboratorio donde se observa que el carbono negro reduce el albedo de la nieve en mayor medida para la nieve de grano más grande. Se utilizan mediciones del transporte de carbono negro en nieve natural y de laboratorio para desarrollar un modelo de la evolución de la distribución vertical de carbono negro en la nieve derretida (10).

En la investigación hecha se realizó estudios de modelos que muestran que el oscurecimiento de la nieve es causado por la deposición de carbono negro que es un factor importante para la rápida desaparición del hielo marino ártico, los glaciares y masa de nieve. Este estudio proporcionó una de las primeras mediciones directas para la eliminación eficiente de carbono negro de la atmósfera por la nieve y su posterior depósito en las capas de nieve de California (11).

En la investigación se llevó a cabo una campaña de campo para medir las partículas que absorben la luz en la nieve en el norte de China. Se recolectaron alrededor de 400 muestras de nieve en 46 sitios en seis provincias donde se utiliza un espectrofotómetro para separar la absorción de partículas de nieve por componentes de carbono negro. Las concentraciones más bajas de carbono negro fueron encontradas en el noreste remoto en la frontera de Siberia, con una concentración media en la superficie de la nieve de 117 ng g^{-1} . Al sur de este, en el noreste industrial, la concentración media de nieve BC fue de 1220 ng g^{-1} (12).

La investigación se llevó a cabo en laboratorio, donde se experimenta los análisis de aislamiento del carbono negro donde se evalúa el tamaño de los granos de nieve. Estimando que la nieve contaminada con carbono negro está hecha de hidrosol de carbono negro. El albedo de la nieve se mide con un espectrómetro equipado con una esfera integradora en todo el espectro visible (400-1000 nm). La distribución y la forma del tamaño de los granos de nieve se caracterizan utilizando un microscopio digital para calcular el radio efectivo de la nieve. Los resultados preliminares indican una buena concordancia entre el albedo medido y modelado para nieve pura y contaminada con carbono negro (13).

Este estudio evaluó el contenido de carbono negro en la nieve del Ártico, donde se recogen muestras de nieve a mediados o finales de la primavera cuando se puede acceder a toda la capa de nieve del invierno. Realizado todo el procedimiento del filtrado de nieve, los filtros se analizan para detectar impurezas absorbentes. Se toman muestras de nieve en la tundra, los glaciares, los casquetes polares, el hielo marino y los bosques para tener datos más exactos y compararlos (14).

En la investigación realizada se aplicó el modelo SNICAR, acoplado a un modelo de circulación general con transporte de aerosol de carbono de pronóstico, para mejorar la comprensión del forzamiento climático y la respuesta del carbono negro en la masa

de nieve. Basándonos en dos estudios previos, se cuantifican las emisiones de carbono negro proveniente de la combustión de biomasa que varían de acuerdo con las épocas del año, el envejecimiento de la nieve y la eliminación de aerosoles por el agua de deshielo de la nieve. Además, se evaluó la incertidumbre al forzar las estimaciones de estos factores, así como las propiedades ópticas del carbono negro y la fracción de cobertura de nieve. Llegando a la conclusión que las emisiones de carbono negro son la mayor fuente de contaminación (15).

En la investigación realizada se evaluó las concentraciones de carbono negro en la nieve recolectadas de algunos glaciares seleccionados en el oeste de China durante 2004 – 2006. En el análisis de las muestras aparecen concentraciones más altas en sitios más bajos, posiblemente debido al efecto de la topografía. Donde las concentraciones de las montañas Tianshan fuera de la meseta Tibetana son generalmente más altas que las del interior debido a un fuerte deshielo en primavera sumado a más emisiones regionales y locales que podría contribuir a concentraciones más altas (16).

En la investigación desarrollada se recolectaron en cada sitio muestras de pozos de nieve individuales a varias profundidades para examinar la nieve depositada en diferentes momentos durante el invierno y la primavera. Se analizaron unas 500 muestras de nieve donde para procesar las muestras de carbono negro se utiliza la técnica de filtrado donde se funde rápidamente en un horno de microondas y se pasa inmediatamente a través de un filtro Nuclepore de 0,4 micrómetros para extraer el carbono negro y otras partículas (17).

En la investigación presente se realizó la caracterización del carbono negro y otras partículas contaminantes para tres sitios de valles montañosos en Idaho. El enfoque del estudio es restringir la magnitud y factores impulsores de las variaciones en los absorbentes de partículas en latitudes medias de la nieve estacional de EE. UU. En todos los sitios, los procesos de deposición seca y en la nieve aumentan la proporción de mezcla de carbono negro, destacando la importancia de capturar estos procesos para una precisión que representa el albedo de la nieve en los modelos climáticos. La variabilidad espacial en un rango de escalas es considerablemente menor que las variaciones temporales en un sitio dado, con implicaciones para la representatividad de las muestras de campo utilizadas en las comparaciones de observación y modelo (18).

2.1.2. Antecedentes nacionales

En la investigación estudio el impacto de las partículas que absorben luz donde se presentan las primeras mediciones de carbono negro en la superficie de nieve del glaciar Huaytapallana. La masa del carbono negro efectivo se determinó utilizando el nuevo Método termo-óptico de Calentamiento por Absorción de Luz donde aplicando el modelo SNICAR se estimó una reducción significativa del albedo de la masa superficial de nieve (19).

En la presente investigación se analizó qué relación tiene la contaminación emitida por el parque automotor como principal contaminante se estudia al carbono negro y el impacto en la nieve del volcán Chachani. Se toman un total de 18 muestras que son analizadas mediante el método LAHM para determinar la concentración de Carbono negro en la nieve del volcán entre los meses de junio a noviembre del 2019. Además, se evalúa las modificaciones del albedo mediante el programa de simulación SNICAR. Se evalúa también la relación entre las concentraciones con análisis de rosas de viento, retro trayectorias utilizando el modelo HYSPLIT y el estadístico de Spearman (20).

En la investigación se realizaron expediciones mensuales en los a los glaciares Yanapaccha y Shallap de la Cordillera Blanca desde septiembre del 2014 hasta septiembre de 2016 con el fin de recolectar muestras de nieve para luego ser analizados utilizando el método de calentamiento por absorción de luz para determinar la cuantificación de masa de carbono negro en la superficie de nieve en base a la capacidad de las partículas depositadas en la masa de los glaciares (21).

En la presente investigación se recolectaron muestreos de nieve durante cinco meses, a tres altitudes diferentes para determinar la concentración de partículas absorbentes de luz. Las muestras de nieve fueron fundidas y pasadas por filtros de cuarzo, los cuales fueron sometidos a un análisis por el método LAHM. Los resultados del análisis fueron introducidos al modelo SNICAR para calcular diferencias en el albedo por presencia de partículas absorbentes de luz. Posteriormente, se calculó el forzamiento radiativo con promedios mensuales de radiación solar de la Estación Meteorológica Coropuna, operada por el SENAMHI (22).

En este estudio se evaluó la concentración de aerosoles que se depositan en el glaciar Artesoraju. Se realizan expediciones en los años 2014 al 2016. En cada expedición se realiza la toma de muestra donde se extraen testigos de neviza para que las muestras

extraídas se analicen mediante el método de regresión lineal simple y múltiple donde se introducen datos meteorológicos para así obtener la concentración de aerosoles acumulados en el Glaciar y el impacto que los aerosoles causan en la masa de nieve (23).

Este estudio desarrollo el impacto de las en la nieve superficial de los glaciares Yanapaccha, Shallap, Tocllaraju y Vallunaraju pertenecientes a la Cordillera Blanca, evaluando principalmente el carbono negro ya que este contaminante representa el material particulado más común entre los contaminantes atmosféricos. Se recolectaron muestras de nieve el año 2016 y 2017 mensualmente. Las muestras son fundidas y filtradas para luego analizarlas bajo el método de calentamiento por absorción de luz que se utiliza para determinar a concentración de carbono negro y el programa de simulación SNICAR para determinar la cantidad de masa fusionada (24).

La presente investigación determinó la variación espaciotemporal de carbono negro en las capas de nieve; además, de cuantificar la acumulación de ceniza volcánica en los pueblos aledaños del sistema glaciar de Coropuna con la instalación de cenizo metros con la finalidad de estudiar una fuente más directa de contaminación y cómo esta influye en la generación de partículas que absorben luz y el impacto que tienen estas directamente en el glaciar de estudio (25).

En la investigación desarrollada se realizaron 12 expediciones al glaciar Ampay de la Cordillera de Vilcabamba con el fin de recolectar muestras de nieve y determinar el carbono negro acumulado y cómo este contaminante incide en el retroceso del glaciar en estudio. Se utiliza el método de calentamiento por absorción de luz y la aplicación del software libre SNICAR (26).

La investigación estudio el retroceso glaciar en el Santuario Nacional de Ampay y el impacto en la agricultura de la comunidad de Huayllabamba. EL estudio utiliza como herramienta el software ArcGIS 10.3 donde las variables son el glaciar y producción agrícola con el propósito de determinar la influencia del retroceso glaciar en la montaña de Ampay y la producción de la agricultura de la comunidad de Huayllabamba, distrito de Abancay (27).

2.1.3. Antecedentes locales

En la investigación se analizó el retroceso de la superficie del glaciar Incachiriasca desde el año 1975 hasta el 2018. La tasa anual del retroceso del Glaciar ha aumentado

considerablemente en los últimos años a partir del año 2010. El análisis que se realiza nos permite afirmar que el glaciar Incachiriasca está sufriendo un retroceso acelerado con una pérdida del área considerable. Concluyendo que el retroceso que se presenta se debe principalmente por el impacto que causa el calentamiento Global producido por la emisión de gases de efecto invernadero a la atmosfera (28).

En la investigación hecha se realizó el monitoreo del glaciar Incachiriasca con el método Glaciológico y Geodésico para obtener datos importantes y relevantes en periodos largos de tiempo que nos permitan entender las dinámicas y los efectos que el cambio climático pueda causar a futuro, donde se toma como antecedentes los estudios del retroceso de los glaciares en la cordillera de Vilcabamba que considera el glaciar Incachiriasca uno de los glaciares con mayor importancia porque es fuente de agua para las comunidades aledañas y es también considerado un atractivo natural turístico y de gran importancia (29).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Glaciares

Según Cambio climático 2001: Informe de síntesis constituye el cuarto volumen del Tercer Informe de Evaluación del IPCC. Los glaciares se definen como una masa de hielo sobre la tierra originada por la acumulación de nieve que se encuentra por deformación interna y limitado por la topografía del lecho rocoso que es la principal influencia en la dinámica y pendiente que se desplaza abajo.

Los glaciares son masas de hielo gruesas que fluyen con lentitud bajo el efecto de la gravedad. Los glaciares representan aproximadamente el 10 % de la superficie del planeta y almacenan en torno al 75 % de agua dulce mundial (30).

2.2.2. La formación de los glaciares

La formación de los glaciares es la glaciación y se debe al proceso de transformación de nieve en hielo, debido a su acumulación y apisonamiento, lo cual produce pérdida de burbujas de aire y un aumento de su densidad, pasando de una textura suave y esponjosa, a una granular y más dura (31).

2.2.3. Partes de un glaciar

a. Zona de acumulación: Es el lugar donde la cantidad de nieve y hielo se acumula a lo largo de lo que es considerado un año hidrológico que proporciona información

acerca de las precipitaciones sólida.

b. Zona de ablación: Es la zona donde predominan los procesos de derretimiento del glaciar además de presentar el desprendimiento de masas de hielo.

c. Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA): es la línea teórica que separa la zona de acumulación y la zona de ablación.

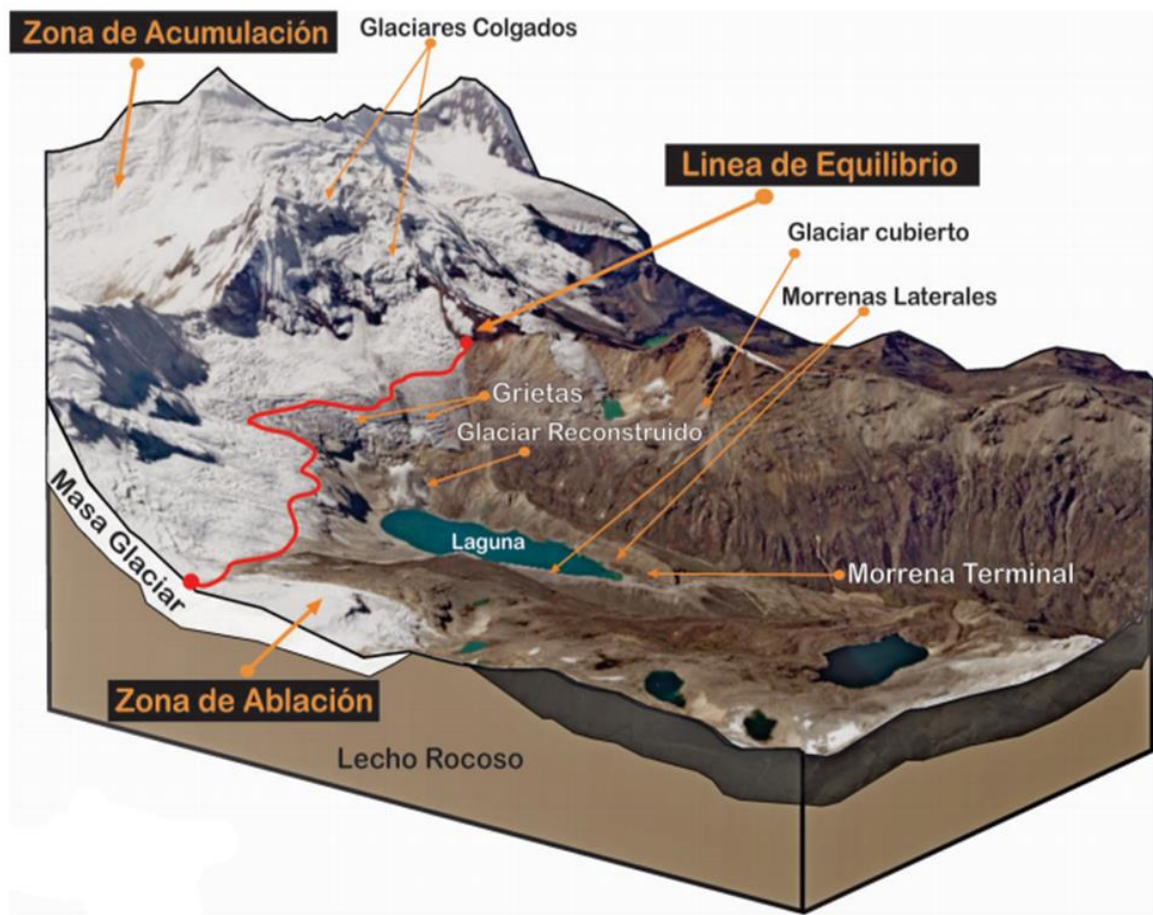


Figura 1. Partes de un glaciar y zonas circundantes

Fuente: INAIGEM (32).

2.2.4. Clasificación de los glaciares

Los glaciares se pueden clasificar en:

- a. **Glaciaretos:** Son pequeñas superficies de hielo que no presentan una delimitación clara (33).



Figura 2. Glaciarete en las laderas del Cerro Brujo, en el Valle del Río San Andrés, cuenca del Tinguiririca

- b. **Glaciares de montaña:** Son indicadores de cambio climático, además de ser los glaciares que evidencian claramente los efectos del cambio climático global que afectan el aspecto del paisaje en las montañas altas e impactan en el suministro de agua de las poblaciones aledañas. En estos glaciares se pueden encontrar todas las altitudes y pueden utilizarse como indicadores clave e los sistemas para observar el clima a nivel global. Son los que se localizan en la parte alta de la cordillera caracterizado por presentar formas variables (33).



Figura 3. Glaciar de montaña en el Canal Beagle

Fuente: Zemp, Haeberli y Hoelzle (34).

- c. **Glaciares de valle:** También llamado glaciar Alpino el cual se caracterizan por tener varias zonas de acumulación las cuales constituyen un valle el cual permite un flujo de hielo aguas abajo constante.



Figura 4. Glaciar de Valle: Glaciar Universidad

d. Glaciares rocosos: Estos glaciares son cuerpos de hielo y roca recubierta por porciones grades de hielo que se generan a partir de un glaciar descubierto que después de un proceso se va recubriendo por material rocoso o avalanchas hasta que la morfología cambia donde predomina el material rocoso.



Figura 5. Glaciar rocoso al interior del Valle de Navarro, Cuenca del río Juncal

Los glaciares peruanos, tienen 3 formas especiales que se deben a la posición geográfica, a la naturaleza y al clima de la zona. Los glaciares peruanos se ubican en la línea del Ecuador, donde el clima en esta región hace que exista una fuerte ablación que no permiten la formación de corrientes de hielo; es por esto que, podemos encontrar tres clasificaciones usadas en el territorio peruano, para la identificación de los glaciares se describe los siguientes (32).

a) Glaciares colgados: son bloques de hielo y nieve que se mantienen acumulados durante años y por lo general se encuentran ubicados en la parte superior de los glaciares que cuentan con alta probabilidad de desprenderse a causa de la dinámica del glaciar, el incremento de la temperatura y otros factores.

b) Glaciares muertos: son glaciares que están cubiertos generalmente por una morrena de ablación donde los depósitos de estos glaciares están diferenciados en dos capas, la primera constituida por piedras angulosas y la superficial de cantos rodados, donde los depósitos de masa si quedan abandonadas se denominan hielo muerto o fósil.

c) **Glaciares reconstituidos:** son los glaciares que no tienen fuente directa de alimentación y que se encuentran formados por la acumulación de bloques de hielo donde al unirse estos con las partes bajas del glaciar se juntan entre sí formando una nueva corriente de glaciar, un ejemplo significativo se encuentra en las partes inferiores de la cordillera Blanca.

2.2.5. Cambio climático

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio climático se define al cambio climático como el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (35).

El cambio climático además de tener efectos en los organismos vivos tiene impactos en la superficie terrestre incluyendo los glaciares (36).

2.2.6. Impactos del cambio climático en los glaciares

La pérdida de masa glaciar se plantea como una reducción del volumen de agua de escorrentía que tiene un impacto grave en el ecosistema andino. En muchos pueblos y ciudades de los Andes, los glaciares son fuente de agua para diferentes poblaciones aledañas a ellos (36).

Uno de los impactos más significativos del retroceso glaciar es la pérdida del recurso hídrico que alimenta las cuencas lo cual puede traer implicaciones en el abastecimiento del recurso hídrico que sirve para las actividades de agricultura, ganadería y consumo de agua potable, además del uso de estas aguas por las hidroeléctricas, lo cual puede afectar económicamente a esta industria. Así mismo la fusión de los glaciares puede causar la formación de lagunas lo cual se convierte en una amenaza porque pueden ocurrir deslizamientos o avalanchas en consecuencia. Por otro lado, la fusión de los glaciares puede repercutir en el turismo que se realiza en el glaciar Incachiriasca ya que este glaciar es bastante visitado por estar de paso hacia el Santuario Histórico de Machupicchu que es un atractivo mundial tanto para turistas nacionales y extranjeros.

2.2.7. Fusión del glaciar

Es el proceso mediante el cual el hielo o la nieve se transforma en agua debido a la interacción entre el sol, la atmósfera y la roca madre con el glaciar (37).

En la imagen se observa el albedo que es considerada la fracción de radiación solar que se refleja por la superficie de color blanco que es la nieve de los glaciares que tiene un albedo alto, que disminuye cuando se depositan partículas finas como el material particulado PM 2.5 en la nieve de los glaciares lo que conduce al derretimiento de esta.

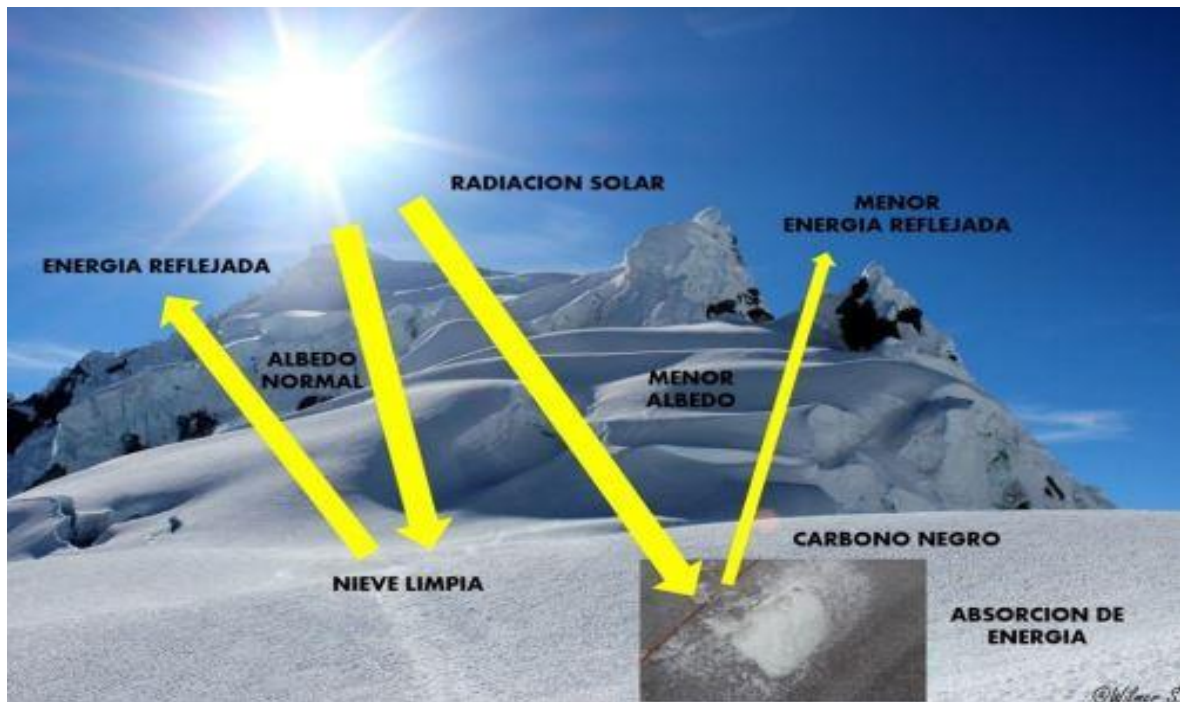


Figura 6. Un estudio científico explica su impacto en el derretimiento de los glaciares de la Cordillera Blanca, en la región Áncash.

- Consecuencias de la fusión de los glaciares

La fusión de los glaciares causa graves problemas a las poblaciones aledañas que dependen de ellos para garantizar el suministro de agua, así como también para actividades de ganadería y agricultura y esto puede causar catástrofes en el futuro. Otra consecuencia de la desglaciación es el aumento del nivel del mar durante las futuras generaciones, también provoca la extinción de numerosas especies destruyendo el hábitat natural de flora y fauna.

2.2.8. Contaminación atmosférica

Es la presencia de contaminantes y sustancias nocivas en la atmósfera que alteran la calidad de este.

Las actividades antrópicas y los fenómenos naturales que se producen en la superficie terrestre van acompañados de emisiones de gases contaminantes, vapores, material

particulado y aerosoles que al emitirse a la atmósfera se integran con los ciclos biogeoquímicos que se desarrollan causando efectos nocivos a la salud de las personas y el ambiente.

- **Contaminantes atmosféricos**

Los contaminantes atmosféricos provienen de fuentes móviles considerados como el parque automotor y de fuentes fijas de combustión como son las actividades industriales (38).

Los contaminantes atmosféricos se dividen en primarios y secundarios que provienen de diferentes fuentes de contaminación que son muy diversas.

Los contaminantes primarios son muy variados por la composición de su naturaleza física y química. Los contaminantes más frecuentes son la causa de alteraciones ambientales tales como: los aerosoles. SO_2 , CO , NO_2 , hidrocarburos, O_3 y material particulado.

2.2.9. Material Particulado

El material particulado se define como uno de los contaminantes atmosféricos conformado por un conjunto de partículas finas ya sean sólidas o líquidas presentes en suspensión en la atmósfera que se originan a partir de fuentes naturales o antropogénicas (39).

- **Tamaño de partícula**

El tamaño de las partículas en suspensión varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micras (μm). Se identifican diferentes tamaños y rango de partículas.

- **Material Particulado 2.5**

El material particulado 2.5 está presente en forma sólida o líquida como polvos, cenizas y hollín que se puede dividir según el tamaño de partículas. Existen partículas de diámetro igual o inferior a los $10 \mu\text{m}$ o 10 micrómetros que se denomina PM 10 y a la fracción respirable más pequeña, PM 2.5 que es considerada 100 veces más delgada que el grosor del cabello humano.

2.3. Definición de términos básicos

- **Albedo:** Indica que el nivel de radiación reflejada desde la superficie, como el albedo, es 1 si se refleja toda la radiación y 0 si se refleja toda la radiación. En la parte superior

de la nieve, el albedo suele estar entre 0,8 (hielo cubierto de nieve fresca) y 0,4 (hielo no cubierto de escombros (37)).

- **Cambio climático:** Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), se entiende que el cambio climático está directa o indirectamente relacionado con la actividad humana que cambia y contribuye al cambio climático global (35).
- **Carbono negro:** El carbono negro es el resultado de la escasez de diésel, biocombustible y biomasa y es lo que da el color negro al hollín. Calienta al planeta mediante la absorción de radiación solar (25).
- **CCVC:** Los contaminantes climáticos de vida corta, son llamados así porque permanecen en la atmósfera un tiempo relativamente corto, desde unos pocos días hasta unas cuantas décadas. En contraste, el dióxido de carbono (CO₂) puede permanecer siglos.
- **Desglaciación:** Retroceso o disminución de la cobertura de hielo del glaciar de una montaña (40).
- **Nieve:** Es la precipitación sólida formada por cristales hexagonales en forma de estrella, agujas, plaquetas o columnas (21).
- **Radiación solar:** Es la energía en forma de ondas electromagnéticas que 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 (37).
- **Partículas en suspensión:** Son las partículas sólidas y líquidas que se encuentran suspendidas en el aire, está compuesta por polvo, hollín, humo y pequeñas gotas de agua.

2.4. Modelo teórico conceptual

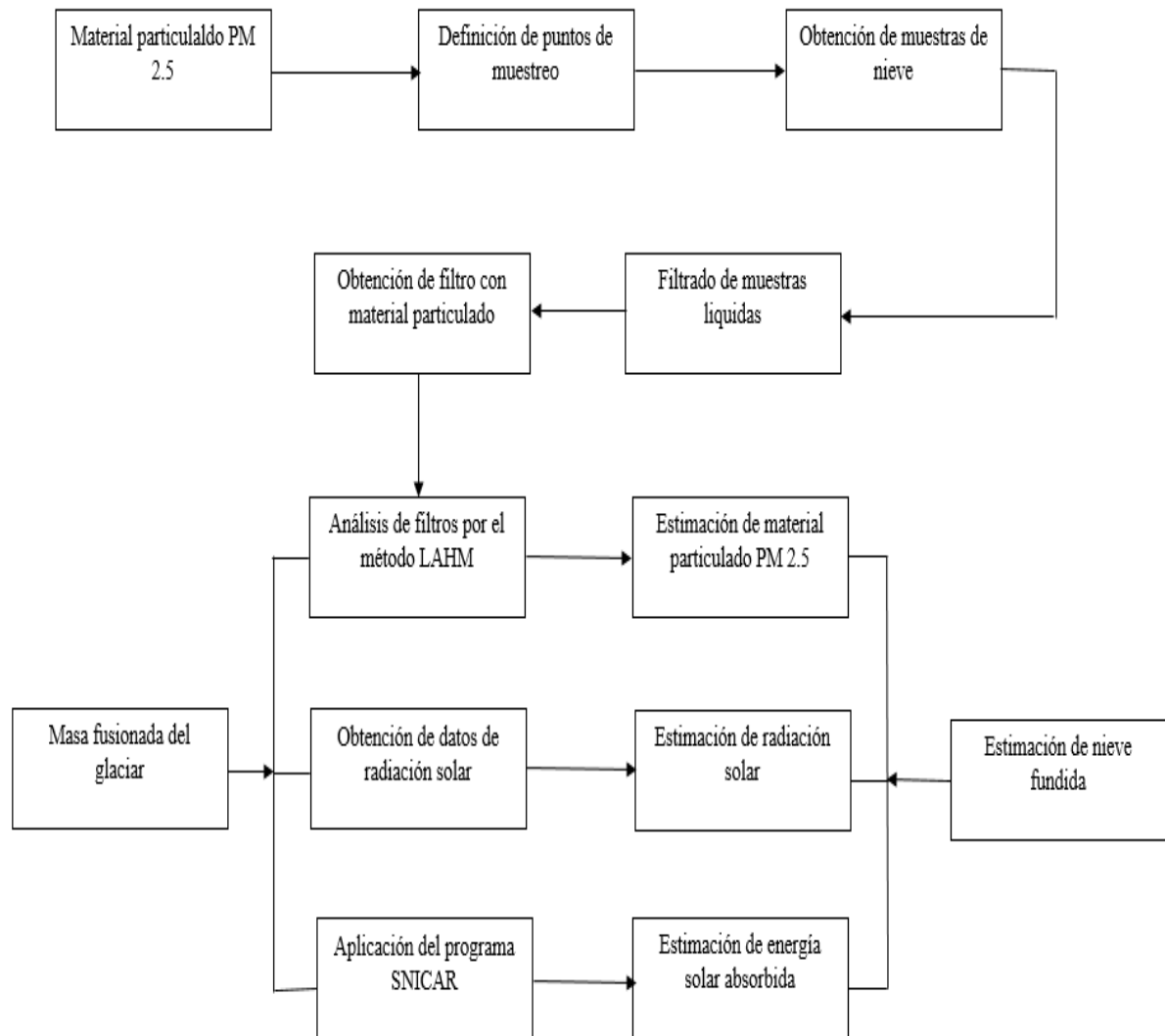


Figura 7. Modelo teórico conceptual

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método de investigación

- Método general o teórico de la investigación

El método general es deductivo que significa que partiendo de un caso particular podemos llegar a un resultado general porque en la investigación se plantea analizar el material particulado PM 2.5 en la masa del glaciar que nos dará un resultado general y es aplicado porque se va a realizar toma de información del nevado para lograr interpretar el grado de fusión que presenta (41).

- Método específico de la investigación

El método de la investigación es cuantitativo en todo el procedimiento porque se va utilizar una estrategia que se centra en cuantificar la recopilación y el análisis de datos. En la investigación se realizará un ensayo en campo para la recolección de datos y después se pasará al laboratorio para introducir los datos obtenidos y así poder analizar los resultados (39).

3.1.2. Alcance de la investigación tipo de resultado a obtener

El alcance de la investigación es de tipo Descriptivo, Explicativo y no experimental porque no se manipula las variables; ya que tienen como finalidad conocer la relación de asociación que exista entre la cantidad de material particulado PM 2.5 estimado en la masa de nieve del glaciar (41).

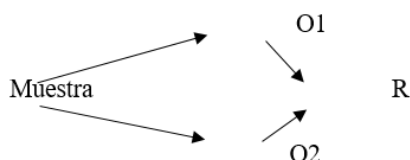
3.1.3. Nivel de investigación

Nivel de investigación es no experimental Descriptivo Explicativo pues a través de la metodología a utilizar se desea describir cuantitativamente la concentración de

material particulado PM 2.5 en la nieve y posteriormente estimar el impacto en la fusión del glaciar (41).

3.2. Diseño de la investigación

El diseño es no experimental y transversal porque se recolectan muestras y datos a través del tiempo en un momento dado, en campo la toma de muestra es directamente del área del glaciar en puntos específicos para hacer inferencias sobre el cambio, sus determinantes y consecuencias. Según el siguiente esquema:



Donde:

M= Muestra

O1= Observación de la V1

O2= Observación de la V1

R= Correlación entre Variables

Se plantea observar la cantidad de concentración de material particulado PM 2.5 en la superficie del glaciar Incachiriasca con el fin de estimar la cantidad de nieve fundida.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

En esta investigación tomaremos como población todo glaciar Incachiriasca.

3.3.2. Muestra

La recolección de la muestra con referencia a una técnica que se utiliza por el programa American Climber Science (ACSP) donde es conveniente la recolección de 1000 g de nieve a altitudes diferentes, la primera superficial y la segunda a 5 cm de la capa de nieve del glaciar Incachiriasca por un período de diez meses (24).

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

Las técnicas seleccionadas para la recolección de datos son las que se presentan:

- La técnica LAHM (Light Absorption Heating Method)

Utilizada para el análisis de material particulado PM 2.5 presentes en la nieve que es una técnica desarrollada por (24).

La técnica consiste en recolectar muestras de nieve filtrando a través de un filtro de cuarzo y posteriormente siendo analizada por el laboratorio donde se somete a un calentamiento de los filtros al exponerlos a una fuente de luz artificial para así poder observar los cambios en el calentamiento de los filtros para determinar la absorción de luz (25).

Cada filtro es suspendido con placas transparentes y es expuesto a una lámpara de luz visible, debajo del filtro, a aproximadamente 5 cm de distancia, se coloca un termómetro infrarrojo controlado por un procesador Arduino, el cual registra la temperatura cada 0.25 segundos.

- Método del programa de simulación SNICAR (Snow, Ice and Aerosol Radiation), es un simulador que proporciona la reflectancia (albedo) de la nieve tomando en consideración el tamaño del grano de nieve y las características de flujo solar incidente que permite el cálculo del albedo en base a la masa del material particulado ingresado (21).

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

Para recoger los datos del experimento se cuenta con:

- Libreta de campo para registro de las coordenadas que luego se procesaran en una tabla excel y en el programa ArcGIS.
- Equipo SP2 muestreador de material particulado PM 10 y PM 2.5 marca Aeroqual S500 que luego se procesan el programa SNICAR.

3.5. Procedimiento de la investigación

Se realiza el muestreo por un periodo de 10 meses de acuerdo con la técnica que utiliza el Programa American Climber Science (ACSP).

Se obtuvo el apoyo del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas SERNANP - Cusco para adquirir los implementos de seguridad (línea de vida, casco, grampones y bastones) y el permiso de ingreso para la toma de muestras de la masa del glaciar Incachiriasca, así mismo se adquirieron bolsas con cierre hermético – ziploc para la toma de muestra y los

materiales como el filtro de cuarzo, el porta filtro, la jeringa y los empaques para su almacenamiento.



Figura 8. Recolección de muestras de nieve

De acuerdo con las investigaciones realizadas se procede a recolectar por cada visita al glaciar dos muestras de 1000 gramos de nieve cada una dentro de bolsas de plástico con cierre hermético – ziploc. La primera muestra recolectada es a nivel superficial y la segunda a 5 cm de profundidad de acuerdo con los antecedentes.

Para cada punto de recolección se toma en consideración la ubicación de los puntos referenciados por sistema de coordenadas geográficas referenciadas por el software ArcGIS.

Durante cada expedición a los glaciares, se recolectaron las muestras de nieve en el mismo punto de muestreo de acuerdo con la Tabla 1 las muestras se tuvieron en las siguientes coordenadas con los dos puntos de Norte y Este con la cota respectiva. Para la ubicación de puntos de muestreo se realizaron según a las referencias en investigaciones.

Tabla 1

Coordenadas de muestreo de Nieve

GLACIAR INCACHIRIASCA – SALKANTAY				
Punto	Norte	Este	Cota	Descripción
1	8522885.89	767057.718	5089.093	Nivel Superficial
2	8522355.46	767196.581	4838.361	5 cm de profundidad

Fuente: Elaboración Propia.

GLACIAR INCACHIRIASCA

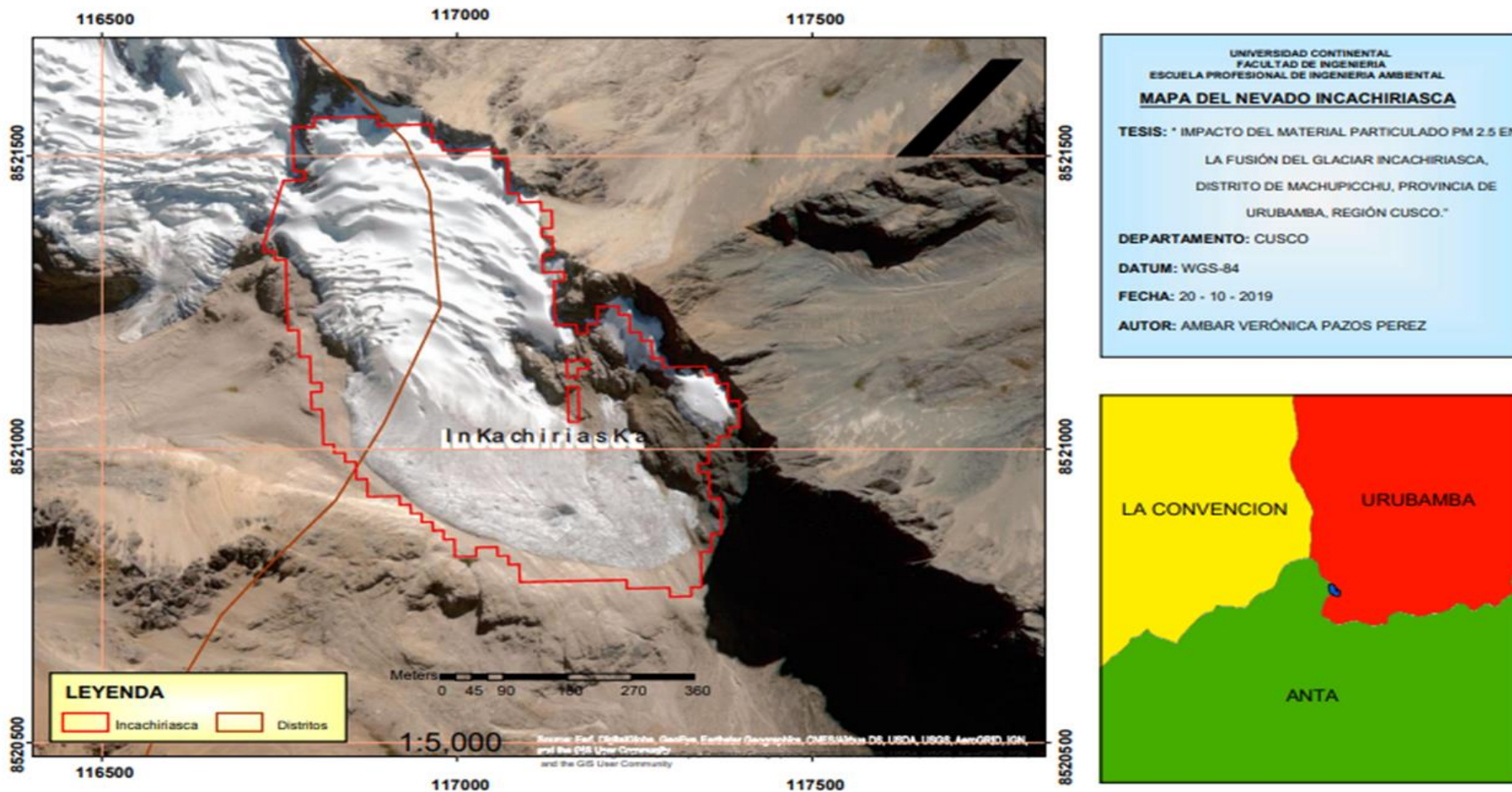


Figura 9. Mapa de ubicación del Glaciar Incachiriasca

Una vez recolectadas las muestras y cumpliendo con la cadena de custodia se lleva a analizar (25).

Antes de analizar la muestra se procede a:

Calentar la bolsa ziploc en baño maria hasta alcanzar 30 °C a 40 °C (25) con la finalidad de derretir rápido las muestras, luego utilizando una jeringa se extrae agua de las bolsas ziploc realizando un bombeo del agua que pasa por el filtro, haciendo los apuntes respectivos por cada muestra procesada.



Figura 10. Muestras de Nieve del Glaciar



Figura 11. Derretimiento de las muestras



Figura 12. Filtrado de las muestras



Figura 13. Muestras de nieve filtradas

Luego de filtrar las muestras por los filtros de cuarzo, estas se dejan secar a la luz del día y temperatura ambiente para después colocarlos en cápsulas diseñadas para la colección de monedas.



Figura 14. Muestras de Nieve filtradas

Los filtros obtenidos, son expuestos a la luz del equipo SP2 y el software Arduino, representado en la columna central y cuya unidad está expresada en nanogramo de material particulado por gramo de nieve.

Estos valores son incorporados a otro paquete de simulación de característica libre o gratuita, denominada SNICAR, que permite conocer el albedo de cada filtro, es decir la cantidad retenida de luz, respecto al filtro en blanco o limpio, que se aprecia en la última Snow Albedo.

Se muestra los valores obtenidos entre los filtros en blanco, a diferencia de los que contienen cierta cantidad de Material particulado PM 2.5.



Figura 15. Equipo SP2

Después se conecta el analizador a una laptop con el software SNICAR que proporciona la reflectancia del albedo de la nieve para determinar el albedo de la nieve con las concentraciones de material particulado PM 2.5, analizando la una diferencia de albedo entre la nieve limpia y la nieve contaminada de la masa de nieve del glaciar.

Luego se halla la energía absorbida identificada como la energía total que llegó al glaciar de manera mensual, al ingresar los valores de material particulado PM 2.5 al programa simulador SNICAR el resultado representa la energía absorbida por el material particulado para cuantificar la cantidad de nieve fusionada.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultado de concentración de PM 2.5

Las concentraciones de material particulado PM 2.5 fueron altas durante los meses de marzo, mayo y junio del 2020 en el glaciar Incachiriasca, alcanzando un valor máximo en el mes de junio (133.9 ng/g).

Por otro lado, las concentraciones disminuyeron en el mes de julio, agosto y octubre, alcanzando valores mínimos en julio (0.8713 ng/g) lo que significa que hubo factores externos que alteraron estos resultados.

4.1.1. Punto 1 – nivel superficial

a) Concentración de PM 2.5 a nivel superficial

Tabla 2

Cálculo de la concentración de PM 2.5 en la masa de nieve

Año: 2020 MES	VALOR (ng de BC / g de agua)	Snow Albedo (SNICAR)	Diferencia (Blanco – mes)
Enero	0.00	0.88614756	0
Febrero	14.76	0.82098913	0.06515843
Marzo	56.98	0.81462926	0.0715183
Abril	11.45	0.82163388	0.06451368
Mayo	25.32	0.81913084	0.06701672
Junio	133.9	0.80652487	0.07962269
Julio	0.8713	0.82388544	0.06226212
Agosto	3.855	0.82328826	0.0628593
Setiembre	13.72	0.82118678	0.06496078
Octubre	6.869	0.82259762	0.06354994

La Tabla 2 muestra los resultados mensuales de material particulado PM 2.5 para el glaciar Incachiriasca a Nivel superficial.

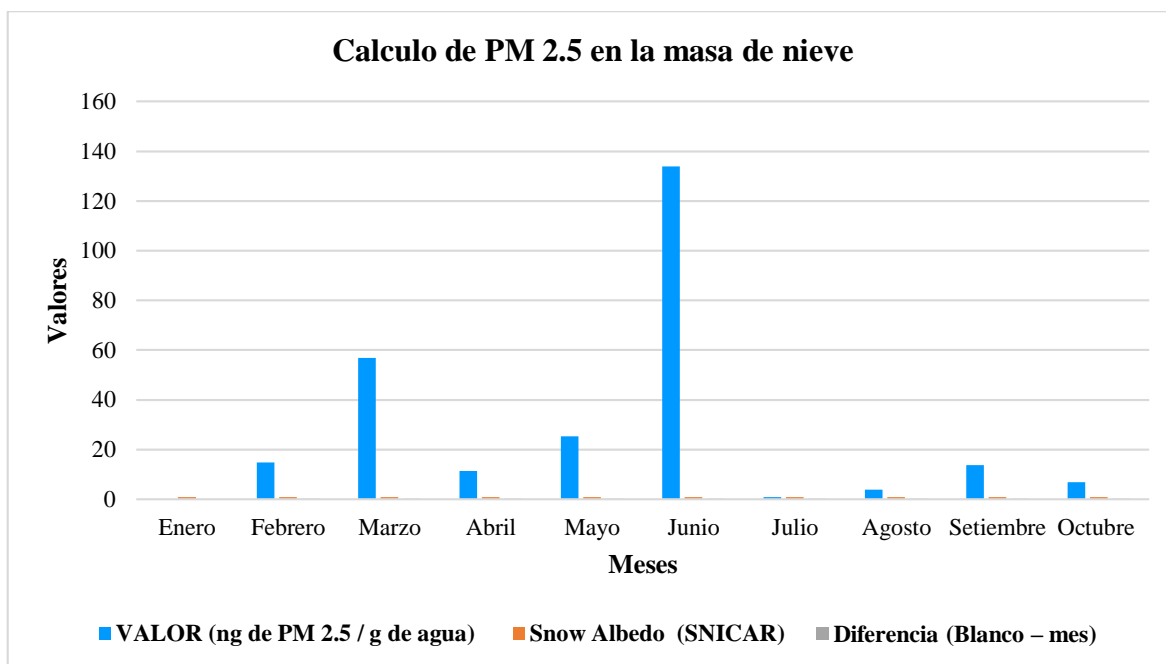


Figura 16. Variación de PM 2.5 en la masa de nieve

En la Figura 16 podemos observar la variación del material particulado PM 2.5 en la masa de nieve del glaciar a nivel superficial, donde el valor expresado en nanogramos de PM 2.5 por gr de agua empieza a subir en los meses de marzo, luego disminuye en los meses de abril y mayo alcanzando el pico más alto en el mes de junio.

b) Energía absorbida por el material particulado PM 2.5 a nivel superficial

Ahora es necesario conocer la radiación existente en la zona en los meses de estudio. Para ello como no se cuenta con estaciones meteorológicas cercanas, se recurre a los datos históricos del SENAMHI, que calcula diariamente estos valores y se expresa en promedios mensuales en unidades de KWh/m².

Para el cálculo de la Energía Absorbida por el material particulado, se realiza los productos de albedos obtenidos (blanco – año) para cada año, con la cantidad de energía expresada en Joule, así obtenemos la cantidad de energía absorbida por el contaminante en la nieve.

Tabla 3

Energía absorbida por el PM 2.5

Año: 2020 MES	Energía Total (ET) (W/m ²)	ET * 3600 (J.seg/m ²)	Diferencia	Energía Absorbida por el PM 2.5.(J*s/m ²)

Enero	5500	154000	0.00504714	36123833.6
Febrero	5500	170500	0.0054189	43897932.5
Marzo	5000	150000	0.00727994	34837387.2
Abril	5000	155000	0.00633592	37395329.8
Mayo	5000	150000	0.00649279	42996252.6
Junio	4500	139500	0.00689852	31268036.7
Julio	4500	139500	0.00777072	31567940.5
Agosto	4500	135000	0.01023156	31570939.1
Setiembre	6500	201500	0.01216835	46099126.5
Octubre	6500	195000	0.01184249	45801386.3

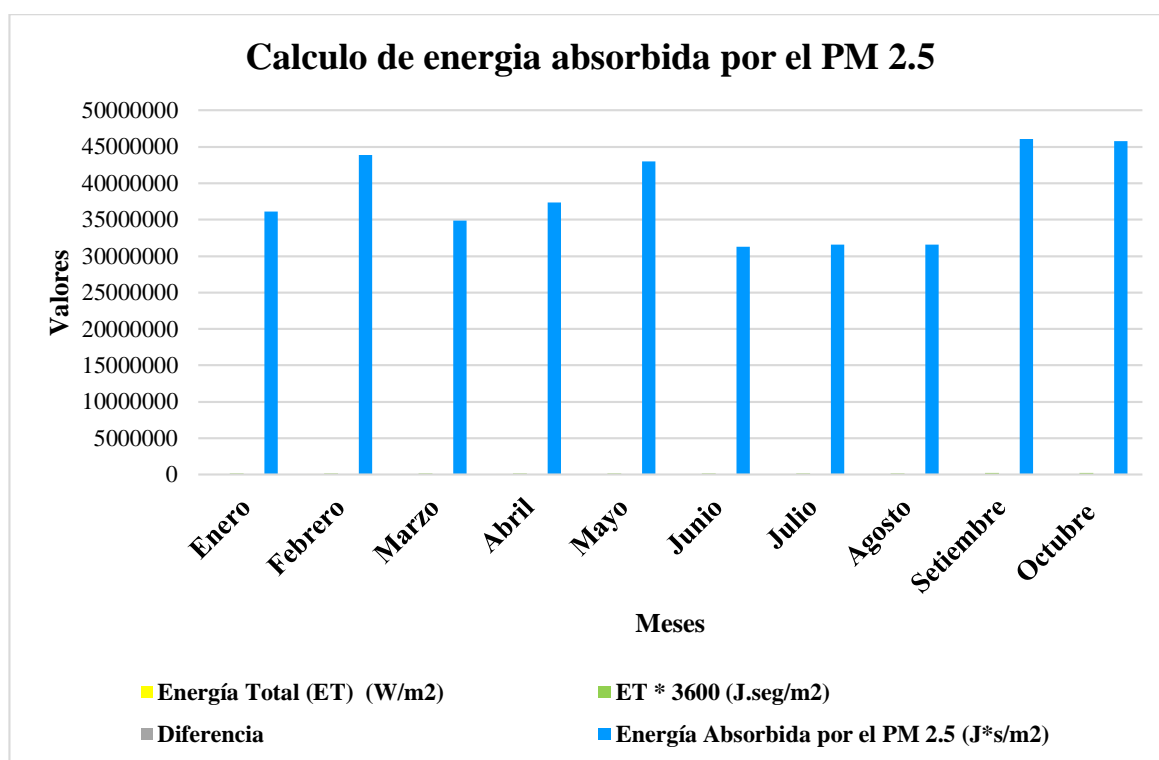


Figura 17. Variación de la Energía absorbida por el PM 2.5

En la Figura 17 podemos observar la variación de la energía absorbida por el material particulado PM 2.5 en la masa de nieve del glaciar donde el valor expresado en ($J*s/m^2$) es constante en los meses de enero hasta agosto y empieza a subir en los meses de septiembre y octubre.

c) Volumen de nieve fundida a nivel superficial

A continuación, se detallan las cantidades de nieve fundida a causa del material particulado PM 2.5 de manera mensual en el glaciar Incachiriasca para el período de estudio.

El término “calor de fusión latente” es la energía necesaria para cambiar el estado del agua de hielo a líquido y es de 336 KJ/Kg, 336000 julios de energía para cambiar un kilogramo de hielo en líquido.

Finalmente, se calcula la nieve fundida a causa del material particulado en el glaciar Inkachiriasca, en kilogramos por metro cuadrado como indica el cuadro.

Tabla 4

Nieve fundida en el glaciar Incachiriasca

Año: 2020 MES	Energía Absorbida por el PM 2.5 (J*s/m²)	Energía de Fusión (Joule)	Nieve Fundida por el PM 2.5 (Kg/m²)
Enero	36123833.6	554400000	107.51141
Febrero	43897932.5	613800000	130.648609
Marzo	34837387.2	540000000	103.6827
Abril	37395329.8	558000000	111.295624
Mayo	42996252.6	540000000	127.965038
Junio	31268036.7	502200000	93.0596329
Julio	31567940.5	502200000	93.9522037
Agosto	31570939.1	486000000	93.9611282
Setiembre	46099126.5	725400000	137.199781
Octubre	45801386.3	702000000	136.31365

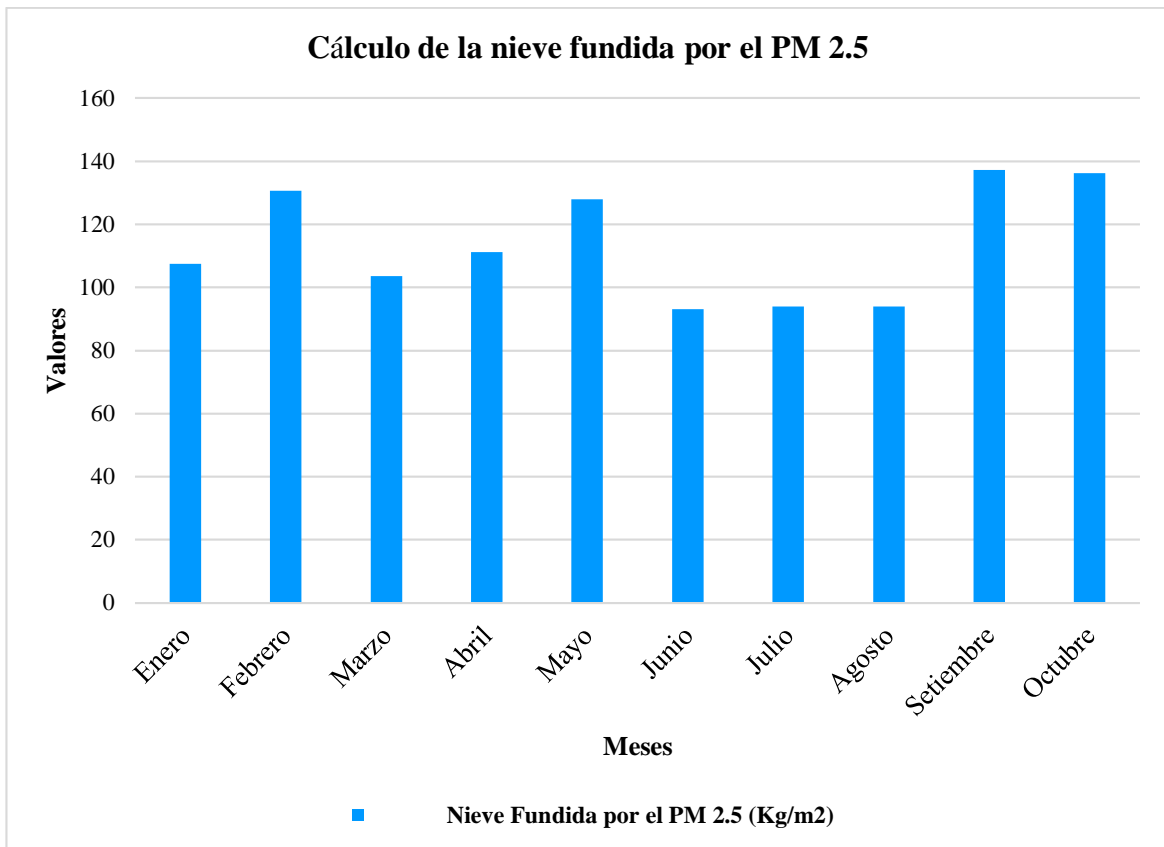


Figura 18. Nieve fundida por el PM 2.5

Dentro de cálculo de la nieve fundida para el periodo de 10 meses de recolección de muestras observamos en el grafico que si existe un impacto en la fusión del glaciar. Sin embargo, no se descarta la presencia de polvo fino u otras partículas las cuales se pueden mezclar con las partículas finas PM 2.5 e incrementa la capacidad de absorber luz solar.

4.1.2. Punto 2 – a 5 cm de profundidad

a) Concentración de PM 2.5 a 5 cm de profundidad

Los filtros obtenidos son procesados tal y cual el caso anterior de nivel superficial, permitiendo encontrar una ligera variación de la concentración de carbono negro, como se aprecia a continuación en las siguientes tablas:

Tabla 5

Cálculo de PM 2.5 con equipo SP2 y software Arduino

Año: 2020	VALOR (ng de PM	Snow Albedo	Diferencia
MES	2.5 / g de agua)	(SNICAR)	(Blanco – mes)
Enero	0.00	0.88614756	0
Febrero	12.26	0.82048911	0.06565845
Marzo	52.45	0.81262924	0.07351832
Abril	9.28	0.81963386	0.0665137
Mayo	23.25	0.81513083	0.07101673
Junio	130.4	0.80452485	0.08162271
Julio	0.582	0.82148542	0.06466214
Agosto	5.388	0.82128824	0.06485932
Setiembre	11.37	0.81918675	0.06696081
Octubre	5.28	0.82219761	0.06394995

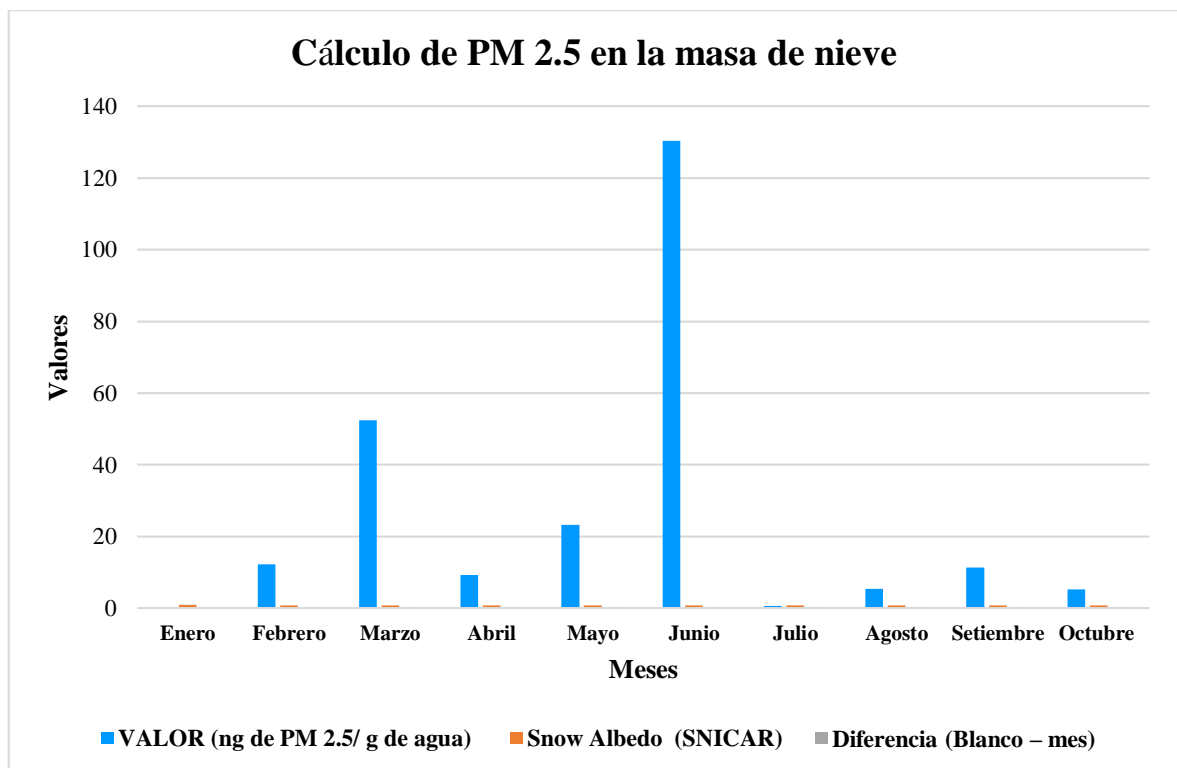


Figura 19. Cálculo de PM 2.5 en la masa de nieve

b) Energía absorbida por el PM 2.5 a 5 cm de profundidad

La radiación existente en la zona y en los meses de estudio a nivel de 5 cm de profundidad es la misma que a nivel superficial recurriendo a los datos históricos del SENAMHI, que calcula diariamente estos valores y se expresa en promedios mensuales en unidades de KWh/m².

Tabla 6

Energía Absorbida por el PM 2.5

Año: 2020 MES	Energía Total (ET) (W/m²)	ET * 3600 J.seg/m²)	Diferencia	Energía Absorbida por el PM 2.5 (J*s/m²)
Enero	5500	154000	0.00504714	36123833.6
Febrero	5500	170500	0.06565845	45125544.8
Marzo	5000	150000	0.07351832	35917398
Abril	5000	155000	0.0665137	39627335.3
Mayo	5000	150000	0.07101673	44076263.4
Junio	4500	139500	0.08162271	32473326.7
Julio	4500	139500	0.06466214	32572350.5
Agosto	4500	135000	0.06485932	32542953.7
Setiembre	6500	201500	0.06696081	46389293.7
Octubre	6500	195000	0.06394995	45801393.3

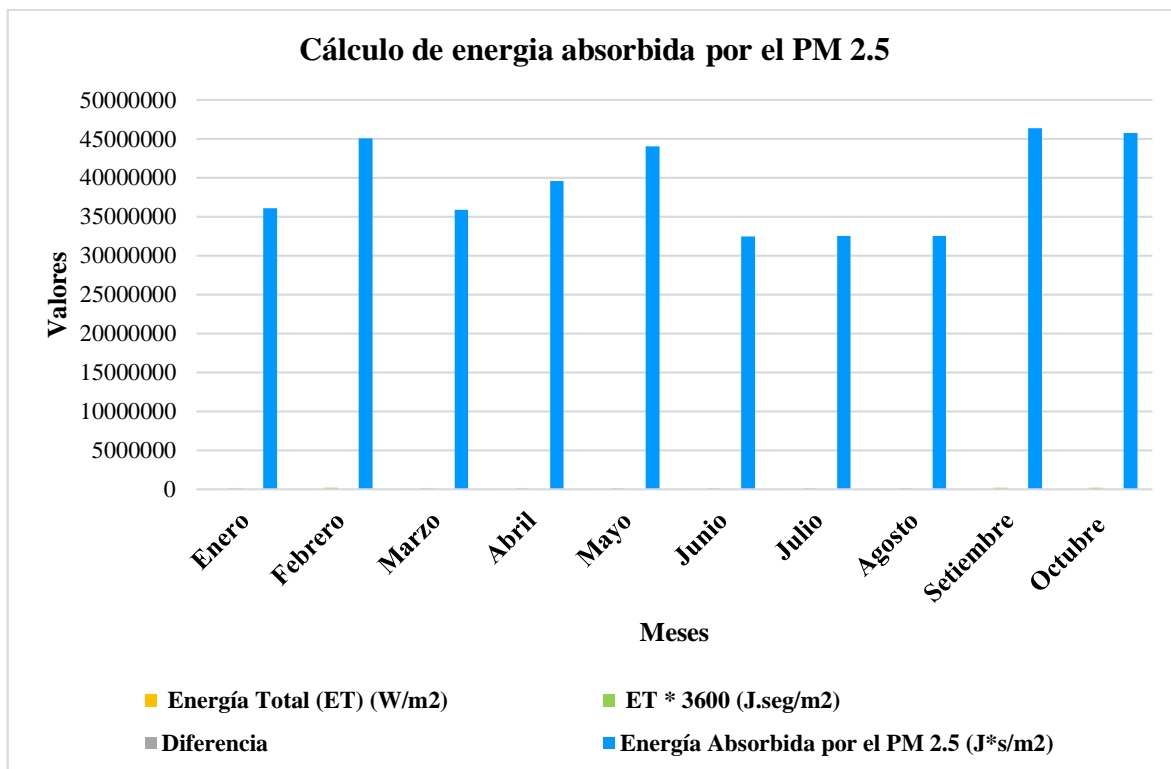


Figura 20. Cálculo de energía Absorbida por el PM 2.5

c) Volumen de nieve fundida a 5 cm de profundidad

Tabla 7

Nieve fundida en el glaciar Incachiriasca

Año: 2020	Energía Absorbida	Energía de	Nieve Fundida por el
MES	por el PM 2.5(J*s/m²)	Fusión (Joule)	PM 2.5 (Kg/m²)
Enero	36123833.6	554400000	107.51141
Febrero	45125544.8	613800000	134.302217
Marzo	35917398	540000000	106.897018
Abril	39627335.3	558000000	117.938498
Mayo	44076263.4	540000000	131.179355
Junio	32473326.7	502200000	96.6468057
Julio	32572350.5	502200000	96.9415194
Agosto	32542953.7	486000000	96.8540288
Setiembre	46389293.7	725400000	138.063374
Octubre	45801393.3	702000000	136.313671

El término “calor de fusión latente” es la energía necesaria para cambiar el estado del agua de hielo a líquido y es de 336 KJ/Kg, 336000 julios de energía para cambiar un kilogramo de hielo en líquido.

Finalmente, calculamos la nieve fundida a causa del material particulado en el glaciar Inkachiriasca, en kilogramos por metro cuadrado a nivel de 5 cm de profundidad como indica el cuadro.

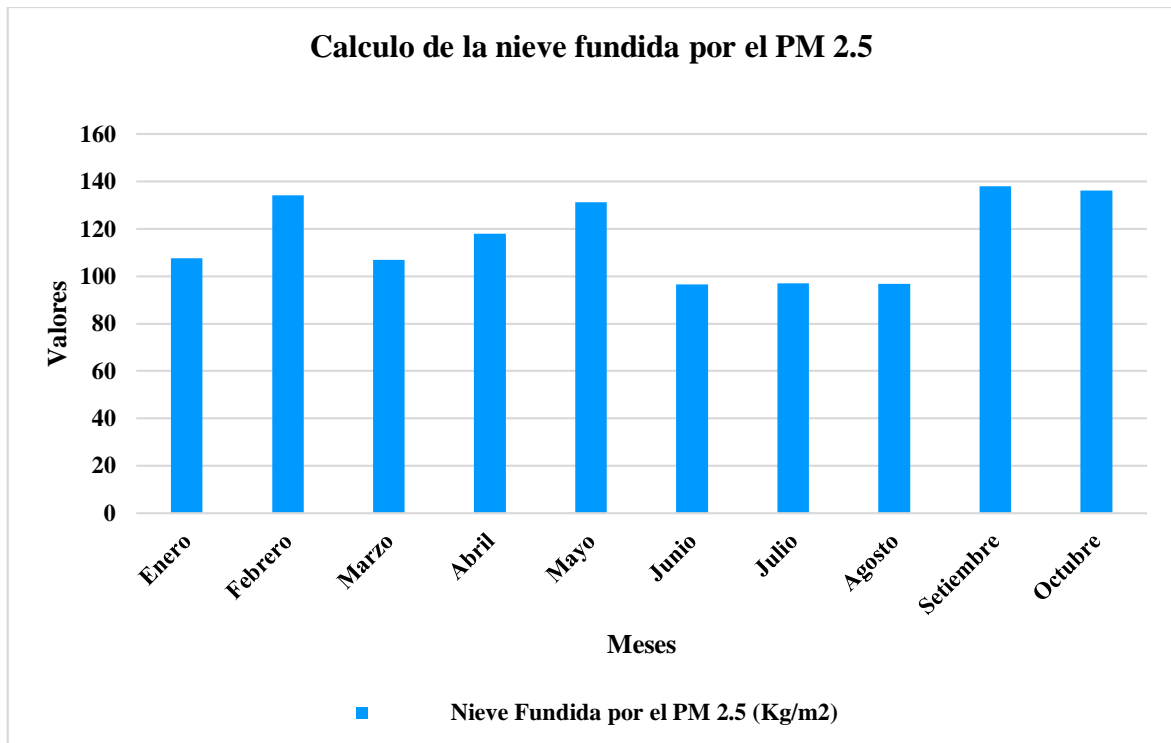


Figura 21. Nieve fundida en el glaciar Incachiriasca

En la Figura 21 podemos observar la variación de la nieve fundida por el material particulado PM 2.5 en la masa de nieve del glaciar donde el valor expresado en ($J*s/m^2$) es constante en los meses de enero hasta agosto y empieza a subir en los meses de septiembre y octubre y al igual que los datos obtenidos a nivel superficial no se descarta la presencia de otras partículas en la nieve del glaciar.

4.1.3. Volumen total mensual de fusión del glaciar Incachiriasca a nivel superficial y a 5 cm de profundidad

Con el fin de estimar el total de nieve fundida a nivel superficial y a 5 cm de profundidad durante el periodo de estudio en kg para el glaciar Incachiriasca, se obtuvo el volumen fusionado de glaciar respectivamente. Donde observamos que hubo una ligera variación a nivel superficial como a la profundidad de 5 cm.

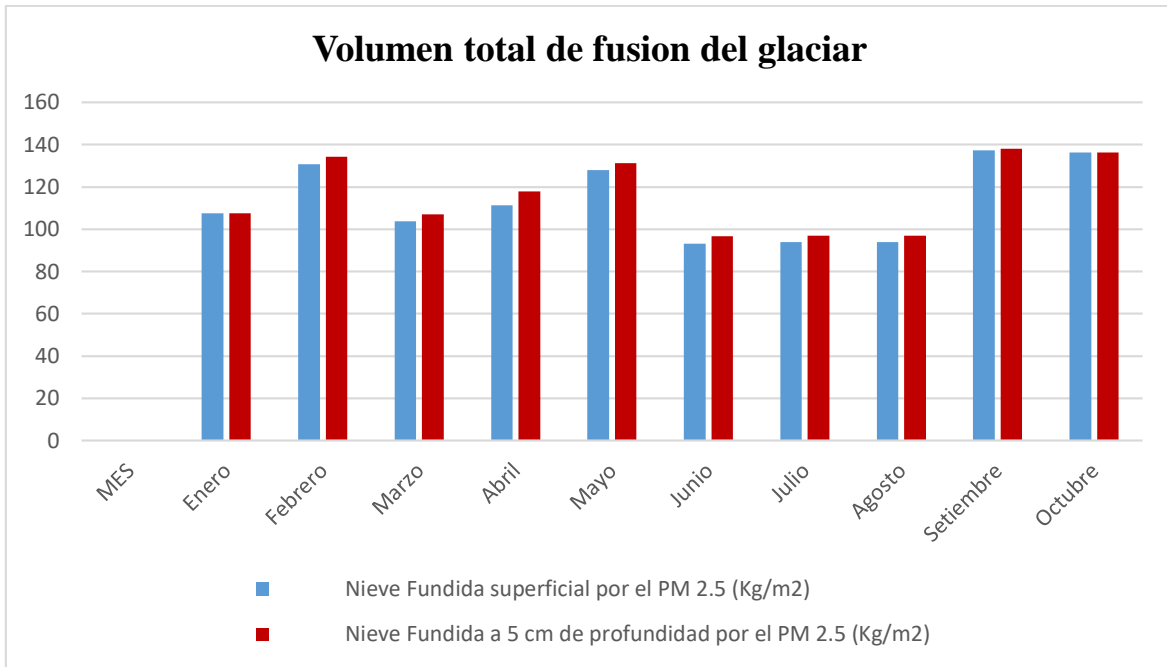


Figura 22. Volumen total mensual de Fusión del glaciar Incachiriasca a nivel superficial y a 5 cm de profundidad

4.2. Prueba de hipótesis

Tabla 8

ANOVA del Modelo Cúbico entre el material particulado PM 2.5 y la fusión de la nieve

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	P_valor
Regresión	3311,854	3	1103,951	7,497	0,002
Residuo	2356,106	16	147,257		
Total	5667,960	19			

Planteamiento de hipótesis

H₀: No esta relacionadas cúbicamente entre el material particulado PM 2.5 y la fusión de la nieve del glaciar Incachiriasca.

H₁: Está relacionada cúbicamente entre el material particulado PM 2.5 y la fusión de la nieve del glaciar Incachiriasca.

Nivel de Significancia (alfa) $\alpha = 5\% = 0.05$

P-valor = 0.002

Conclusión: Como el p_valor es 0.001 menor al nivel de significancia (0.05) por consiguiente, Está relacionada cúbicamente entre el material particulado PM 2.5 y la fusión de la nieve del glaciar Incachiriasca. Por consiguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \beta_3x^3$$

Tabla 9

Coefficientes de las variables entre el material particulado PM 2.5 y la fusión de la nieve

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Error estándar	Beta	t	P_valor
Cantidad de PM 2.5 Superficial	2,864	0,723	6,559	3,960	0,001
Cantidad de PM 2.5 Superficial ** 2	-0,071	0,018	-21,937	-3,940	0,001
Cantidad de PM 2.5 Superficial ** 3	0,000372	0,000	15,236	3,739	0,002
(Constante)	101,644	5,307		19,151	0,000

Los coeficientes como $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ y β_3 acompañaran al modelo cubico porque el p_valor es menor al nivel de significancia.

$$Y = 101,644 + 2,864x - 0,071x^2 + 0,000372x^3, \text{ si } X=1(\text{ng/g})$$

$$Y=104.433372 (\text{Kg}/\text{m}^2)$$

Por cada (ng/g) de material particulado se derrite en 104.433372 (Kg/m²).

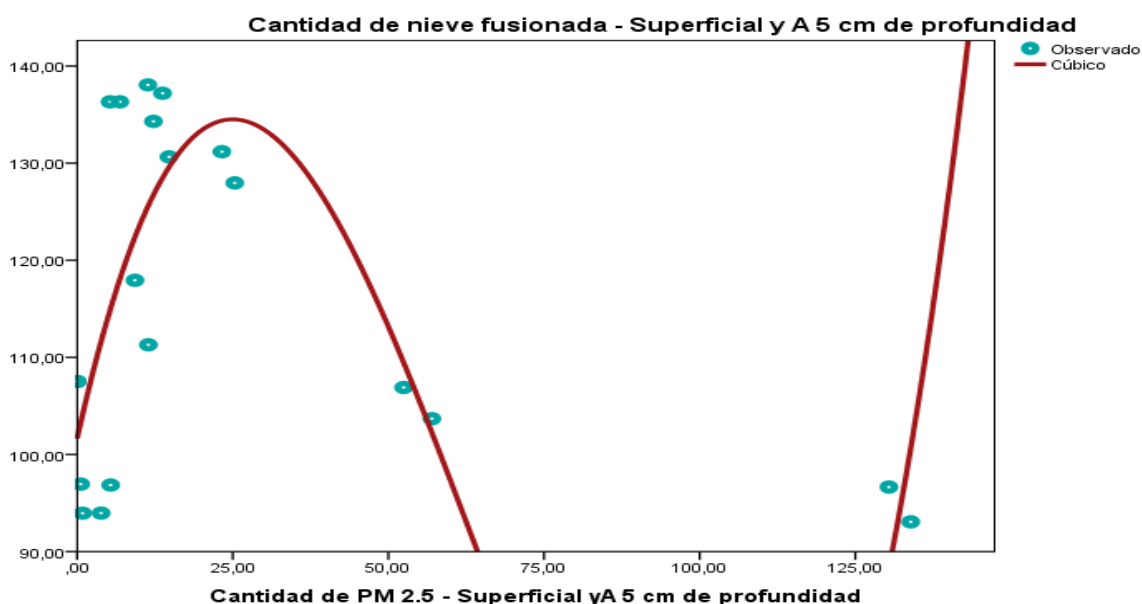


Figura 23. Modelo Cúbico entre el material particulado PM 2.5 y la fusión de la nieve

Tabla 10

Resumen del modelo Cantidad de PM 2.5 - Superficial y A 5 cm de profundidad

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0,764	0,584	0,506	12,135

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar las muestras a nivel superficial y a 55 cm de profundidad conjuntamente, existe un impacto del material particulado PM 2.5 en la fusión del glaciar Incachiriasca significativamente ($R=0.764$)

Coefficiente de correlación (R)

Si $r=0$ No existe correlación entre las variables

Si $0.00 \leq r \leq 0.20$ existe correlación no significativa.

Si $0.20 \leq r \leq 0.40$ existe correlación baja.

Si $0.40 \leq r \leq 0.70$ existe una correlación significativa.

Si $0.70 \leq r \leq 1,00$ existe alto grado de correlación.

La variabilidad de la fusión de la nieve del glaciar Incachiriasca es explicada en un 58.4% del material particulado PM 2.5.

4.3. Discusión de resultados

Se ha encontrado que el material particulado PM 2.5 en la nieve del glaciar Incachiriasca varía de acuerdo con la temporada del año, alcanzando valores máximos durante los meses secos (mayo - octubre) con algunos picos elevados donde en la sierra el aumento del material particulado PM 2.5 está relacionado con el inicio de la quema de pastizales y el incremento de la actividad turística. Tal como señala (23) ha sido considerable sobre todo en los últimos años factores importantes como el incremento de temperatura y la disminución de lluvias porque existe una variación considerada en el incremento de nieve fusionada en el Glaciar Incachiriasca en los meses de estudio.

Sobre la base de muestras obtenidas en el glaciar Incachiriasca se halló una concentración mínima de 0.8 ng/g y un máximo de 133.9 ng/g el cual se encuentra por debajo del estudio realizado por (12) donde se estimó 900 ng/g de carbono negro para los glaciares de China durante el periodo de incendios forestales. Sin embargo, en el estudio (21) las

concentraciones de material particulado PM 2.5 en glaciares de la Cordillera Blanca se encuentran dentro del rango de concentraciones reportadas en esta investigación.

La variación de la concentración del material particulado PM 2.5 se debe a la ubicación del glaciar y la variabilidad altitudinal de los puntos de monitoreo, ya que las muestras de nieve analizadas en (23) fueron recolectadas a 5500 m.s.n.m. a diferencia de las muestras recolectadas en esta investigación del glaciar Incachiriasca que fueron a 4950 m.s.n.m. aproximadamente, donde no existe mucha variación en lo que es la altura de ubicación del glaciar por lo que los resultados de las muestras a nivel superficial y a una profundidad de 5 cm no tiene mucha variación.

Estos los últimos años la superficie del glaciar Incachiriasca se redujo a la mitad (28) donde a partir del 2014 se observa un incremento de reducción de la superficie del glaciar cada año, pudiendo afirmar que existe una cantidad considerable de fusión de la masa del glaciar producto de diferentes factores naturales y antrópicos como lo muestra esta investigación al hacer el estudio del impacto del material particulado PM 2.5.

CONCLUSIONES

1. El material particulado PM 2.5 en el glaciar Incachiriasca indica que existe un impacto en la fusión de nieve del glaciar. De los 10 meses analizados se observa una mayor cantidad de material particulado PM 2.5 en el mes de junio lo cual coincide con la época donde se empieza a dar la quema de pastizales, así como el aumento de la actividad turística.
2. La cantidad de material particulado PM 2.5 encontrado en el mes de junio es la más elevada porque existen factores externos climáticos que en la fecha del muestreo estuvieron relacionados con la deposición del material particulado producto del contenido de este en las gotas de lluvia que hacen que se depositen partículas finas frescas en la nieve.
3. Por otro lado, una mayor absorción de la radiación se observa en los meses de septiembre y octubre tiende una tendencia creciente el cual coincide con la época de mayor radiación en la sierra del Perú que implica la aceleración de la cantidad de nieve fusionada del glaciar.
4. Lo valores de volumen de nieve fusionada obtenidos en el glaciar Incachiriasca en el año 2020 fueron altos en los meses de febrero, setiembre y octubre, esto se debe a la cantidad de material particulado PM 2.5 encontrado en la nieve superficial y a 5 cm de profundidad y a los datos de radiación solar que varían por lo que es necesario continuar realizando estudios similares para evaluar la evolución del material particulado en los próximos años.

RECOMENDACIONES

1. El gobierno local en coordinación con los sectores pertinentes debe diseñar y promover los instrumentos de gestión, que ayuden a evitar los efectos negativos de las actividades de los pobladores y la actividad turística, así como ser parte del diseño del marco normativo y regulatorio hacia una economía baja en emisiones de GEI (Gases de efecto invernadero).
2. Implementar medidas de control, mitigación y adecuación para evitar los incendios forestales, las quemas agrícolas y/o pastos y el uso de biomasa será importante para regular la influencia sobre el material particulado PM 2.5 ya que estas son fuentes directas de material particulado PM 2.5 mediante normativas que regulan principalmente a estas fuentes quienes contribuyen a la fusión del glaciar.
3. Extender este estudio a otras zonas del glaciar y realizar un monitoreo integrado para obtener una información más amplia que permita el mejor manejo de los factores que afectan al glaciar.
4. Se debe realizar análisis complementarios en la masa del glaciar como la medición del pH y la granulometría para tener una información más completa de los granos de nieve.
5. Implementar un Plan de Gestión Turística para contribuir al desarrollo sostenible de los distritos implicados ya que el glaciar Incachiriasca - Salkantay juega un rol importante en el manejo del recurso hídrico de la microcuenca de Soraypampa, contribuyente a la cuenca del Río Blanco, actúa además como regulador del régimen hidrológico para diferentes actividades económicas que serán afectadas por consecuencia de la desglaciación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *Estimación y modelización de la dispersión de black carbon en el Valle de Aburrá, Colombia.* **Roldán, Juan Camilo, Toro, María Victoria y Marín, Alejandro.** 50, Medellín: s.n., 2021, TecnoLógicas, Vol. 24, págs. 1-17. e1580-e1580.
2. *Investigation of black carbon climate effects in the Arctic in winter and spring.* **Chen, Xintong, y otros.** 17, 2020, Science of The Total Environment, Vol. 751, págs. 142-145.
3. **Cereceda-Balic, Francisco, y otros.** Black Carbon deposition on snow from Antarctic Peninsula. *ads.* [En línea] mayo de 2020. [Citado el: 30 de Agosto de 2021.] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..2211669C/abstract>.
4. *A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere.* **Kang, Shichang, y otros.** 11, 2020, Earth-Science Reviews, Vol. 210, págs. 1-36.
5. *Black carbon transport between Santiago de Chile and glaciers in the Andes Mountains.* **Gramsch, Ernesto, y otros.** 117546, 2020, Atmospheric Environment, Vol. 232. 1352-2310.
6. *Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes.* **Rowe, Penny M, y otros.** 1, 2019, Scientific Reports, Vol. 9, págs. 1-17.
7. *Black carbon and the Himalayan cryosphere: A review.* **Gertler, Charles G, y otros.** 1, 2016, Atmospheric Environment, Vol. 125, págs. 404-4017.
8. *In situ observations of black carbon in snow and the corresponding spectral surface albedo reduction.* **Pedersen, Christina Alsvik, y otros.** 4, 2015, Journal of Geophysical Research Atmospheres, Vol. 120, págs. 1476-1489.
9. *Light-absorbing particles in snow and ice: Measurement and modeling of climatic and hydrological impact.* **Qian, Yun, y otros.** 1, 2015, Advances in Atmospheric Sciences, Vol. 32, págs. 64-91.
10. **Hadley, O L y Kirchstetter, Thomas W.** Measurements of Black Carbon Induced Snow-Albedo Reduction. *ads.* [En línea] Diciembre de 2011. [Citado el: 30 de agosto de 2021.] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011AGUFM.A44D..07H/abstract>.

11. *Measured black carbon deposition on the Sierra Nevada snow pack and implication for snow pack retreat.* **Hadley, O L, y otros.** 4, 2010, Atmospheric Chemistry and Physics, Vol. 10, págs. 10463–10485.
12. *Black carbon and other light-absorbing impurities in snow across Northern China.* **Wang, Xin, Doherty, Sarah J y Huang, Jianping.** 3, 2013, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 118, págs. 1471–1492.
13. **Hadley, O L, Kirchstetter, Thomas y Flanner, M.** The Effect of Black Carbon and Snow Grain Size on Snow Surface Albedo. *ResearchGate*. [En línea] diciembre de 2009. [Citado el: 30 de Agosto de 2021.] https://www.researchgate.net/publication/258330792_The_Effect_of_Black_Carbon_and_Snow_Grain_Size_on_Snow_Surface_Albedo.
14. *Source attribution of black carbon in Arctic snow.* **Hegg, Dean A, y otros.** 11, 2009, Environmental Science & Technology, Vol. 43, págs. 4016-4021.
15. *Present-day climate forcing and response from black carbon in snow.* **Flanner, Mark G, y otros.** 11, 2007, Journal of Geophysical Research Atmospheres, Vol. 112, págs. 1-17.
16. *Black Carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos.* **Ming, Jing, y otros.** 1, 2009, Atmospheric Research, Vol. 92, págs. 114-123.
17. *Expeditions to the Russian Arctic to survey black carbon in snow.* **Grenfell, Thomas C, y otros.** 43, 2009, Eos Transactions American Geophysical Union, Vol. 90, págs. 386-387.
18. *Causes of variability in light absorption by particles in snow at sites in Idaho and Utah.* **Doherty, Sarah J, y otros.** 9, 2016, Journal of Geophysical Research Atmospheres, Vol. 121, págs. 4751-4768.
19. *Measurement of light absorbing particles in the snow of the Huaytapallana glacier in the central Andes of Peru and their effect on albedo and radiative forcing.* **Torres, Christian, y otros.** 4, 2018, Optica Pura y Aplicada, Vol. 51, págs. 1-14.
20. **Tunco, Shayumi Karol.** *Análisis del forzamiento radiativo debido a la concentración de carbono negro (CN) en la nieve del volcán Chachani y relación con la concentración*

de (CN) en Arequipa metropolitana. Arequipa : Universidad Nacional de San Agustín, 2020. Tesis de Grado.

21. **Sánchez, Wilmer Esteban.** *Impacto del carbono negro en la fusión de los glaciares Yanapaccha y shallap de la cordillera blanca, período 2014–2016*. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2019. Tesis de Grado.
22. **Cuadros, José Elias.** *Efecto de las Partículas Absorbentes de Luz (PAL) en la nieve sobre el balance Radiativo del Nevado Coropuna, Arequipa*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín, 2019. Tesis de Grado.
23. **Cruz, Rolando Cesai.** *Evaluación de la concentración de aerosoles depositados en la zona de acumulación del glaciar Artesonraju para el periodo 2014-2016*. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018. Tesis de Grado.
24. *Partículas Absorbentes de Luz durante El Niño y El Niño Costero en los glaciares de la Cordillera Blanca, Perú*. **Sánchez, Wilmer y Schmitt, Carl.** 4, 2018, Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Vol. 3, págs. 9-22.
25. **Salcedo, Santiago Solis.** *Variación espaciotemporal de impurezas (partículas) absorbentes de luz y cenizas volcánicas en la superficie del Nevado Coropuna, Arequipa*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín, 2018. Tesis de Grado.
26. *Quantitative Estimation of Black Carbon in the Glacier Ampay-Apurimac*. **Soto, Carolina, y otros.** 1, 2018, Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems, Vol. 1, págs. 1-16.
27. **Paucar, John Anthony.** *Estudio de retroceso glaciar en el santuario nacional de ampay y determinación de su influencia en la agricultura de la comunidad de huayllabamba, distrito de Abancay, año 2016*. Abancay: Universidad Tecnológica de los Andes, 2018. Tesis de Grado.
28. *La desglaciación del Incachiriasca entre 1975 y 2018 (Nevado Salcantay, cordillera Vilcabamba, Peru)*. **Navarro, Álvaro, Úbeda, Jose y Gomez, Jesus.** Cusco: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Ministerio del Ambiente, 2019. Simposio Internacional "Las Montañas Nuestro Futuro".

29. **Nieto, José Carlos y Ladera, Gysela.** *Monitoreo del Glaciar Incachiriasca*. Cusco: Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, Ministerio del Ambiente, 2014.
30. **Johansen, Kari Synnøve, y otros.** *Atlas de glaciares y aguas andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. París: Ediciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura; GRID-Arendal, 2018.
31. **Bórquez, Roxana Elizabeth.** *Análisis del escenario actual de los glaciares de montaña en Chile desde la mirada de la seguridad ecológica*. Santiago: Universidad de Chile, 2007. Tesis de Grado.
32. **Ministerio del Ambiente.** *Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares*. Huaraz: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, 2017.
33. **laboratorio de glaciología.** Clasificación de glaciares según formas. *Laboratorio de Glaciología*. [En línea] 2021. [Citado el: 15 de Agosto de 2021.] <https://glaciologia.cl/glosario/glosario-pag-1/clasificacion-de-glaciares-segun-formas/>.
34. **Zemp, Michael, Haerberli, Wilfried y Hoelzle, Martin.** *Los glaciares de la montaña*. 2014.
35. **Naciones Unidas.** *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Nueva York: Naciones Unidas, 1992.
36. **Cuadros, Sandra Flor.** *Estimación de la pérdida del área glaciar en la cuenca de la laguna Parón-Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca)*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2018. Tesis de Grado.
37. **Rojas, Dennys Daniel.** *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*. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018. Tesis de Grado.
38. *Contaminación atmosférica, cambio climático y salud*. **Ballester, Ferran.** 2, 2005, Revista Española de Salud Pública, Vol. 79, págs. 159-175.

39. *Evaluación de la concentración de polvo atmosférico sedimentable y material particulado (pm2. 5, pm10) para la gestión de la calidad del aire 2017 en la ciudad de Tacna.* **Miranda, Jeissy Lady, Merma, Lizbeth y Herrera, Milagros.** 1, 2019, Ingeniería Investiga, Vol. 1, págs. 125-139.
40. **Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.** *Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares.* Huaraz: INAIGEM, MINAM, 2017.
41. **Hernández, Roberto, Fernández, Carlos y Baptista, María del Pilar.** *Metodología de la investigación.* México DF: McGraw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V., 2014.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Consistencia

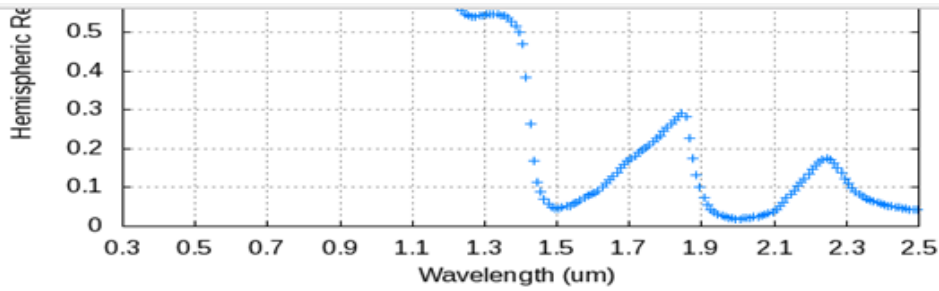
Formulación del problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Indicadores	Índices	Metodología
<p>GENERAL ¿Cuál es el impacto del material particulado PM 2.5 en el glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco 2021?</p> <p>ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué cantidad de material particulado PM 2.5 será encontrado en la nieve del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021? • ¿Cuál es la cantidad de energía solar absorbida por el material particulado PM2.5 	<p>GENERAL Determinar el impacto del material particulado PM 2.5 en la disminución de la superficie del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco – 2021.</p> <p>ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la cantidad de material particulado PM 2.5 encontrado en la nieve del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021 mediante la técnica LAHM (Light Absorption Heating Method). • Estimar la cantidad de energía solar 	<p>GENERAL El material particulado PM 2.5 que influye significativamente en la fusión del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021 por efecto del material particulado PM 2.5.</p>	<p><i>Variables Independientes:</i> Masa fusionada de nieve.</p> <p><i>Variables Dependiente</i> Material particulado PM 2.5.</p>	<p>A. Indicadores Cantidad de masa fusionada.</p> <p>A. Indicadores Cantidad de material particulado PM 2.5 en la masa glaciar.</p>	<p>A. Índices. Cantidad de gramos fusionados</p> <p>A. Índices En partes por billón o nanogramos de material particulado por gramo de agua.</p>	<p>GENERAL Inductivo y cuantitativo</p> <p>ESPECÍFICAS Experimental</p>

<p>en la masa glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021?</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Qué volumen de nieve fundida se pierde del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco 2021 por efecto del material particulado PM 2.5? 	<p>absorbida por el material particulado en la masa glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021 con el Modelo SNICAR (Snow, Ice and Aerosol Radiation).</p> <ul style="list-style-type: none"> Estimar el volumen de nieve perdida del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco - 2021 por efecto del material particulado PM 2.5. 					
--	---	--	--	--	--	--

Anexo 2. Operacionalización de las variables

VARIABLES	TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN	CATEGORIAS O DIMENSIONES	INDICADORES
(X) INDEPENDIENTE Masa fusionada de nieve.	Naturaleza	Masa fusionada de nieve que está influenciada por la radiación solar, lluvia, temperatura del aire, cubierta de nubes, cantidad de detritos, etc.	Masa fusionada de nieve a través del programa SNICAR Nieve fundida por PM $2.5 = \frac{\text{Energía absorbida } (\frac{J}{m^2})}{\text{Energía latente de fusión } (\frac{J}{Kg})}$	Cantidad de masa fusionada en unidades kg/m ²
	Cuantitativa			
	Función			
	Independiente			
(Y) DEPENDIENTE Material particulado PM 2.5.	Naturaleza	El Material particulado PM 2.5, son partículas muy pequeñas en el aire que tiene un diámetro de 2.5 micrómetros (aproximadamente 1 diezmilésimo de pulgada) o menos de diámetro. Esto es menos que el grosor de un cabello humano.	Partículas PM 2.5 a través del método LAHM, Absorción de luz a través del programa SNICAR Energía absorbida por PM 2.5= radiación solar $(\frac{J}{m^2})$ x diferencia de albedo	Cantidad de material particulado PM 2.5 en ppb nanogramos. Cantidad de luz absorbida en J/m ²
	Cuantitativa			
	Función			
	Dependiente			

Anexo 3. Simulación programa SNICAR



Broadband nieve Albedo: 0.88614756

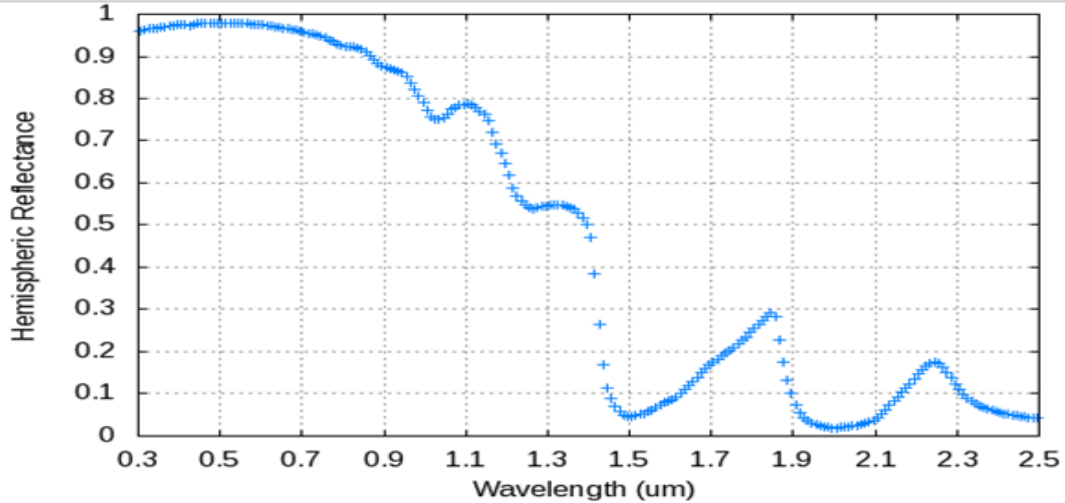
[salida espectral](#) (Columna de la izquierda es la longitud de onda en micras, columna derecha es albedo)

para las siguientes condiciones:

Incidente-Flux: **-haz directo, ángulo cenital solar: 60 grados**
 superficie de distribución espectral: **invierno de mitad de latitud, nublado**
 capa de nieve tamaño de grano efectivo: **100 μm**
 Grosor de la capa de nieve: **1 m**

Densidad de la capa de nieve: **200 kg / m³**
 Albedo visible de la superficie subyacente: **0.2**
 Albedo de la superficie subyacente IR cercano: **0.4**
 Concentración de carbono negro no recubierto: **0 ppb**
 Concentración de carbono negro recubierto de sulfato: **0 ppb**
 Concentración de polvo 1 (0.1-1.0 μm de diámetro): **0 ppm**
 Concentración de polvo 2 (1.0-2.5 μm de diámetro): **0 ppm**
 Concentración de polvo 3 (2.5-5.0 μm de diámetro): **0 ppm**
 Concentración de polvo 4 (5.0-10.0) diámetro m): **0 ppm**
 volcánica concentración de cenizas: **0 ppm**
 de partículas Experimental 1 concentración: **0 ppb**
 MAC factor de escala: **1,0**

Figura 24. Filtro Blanco o limpio



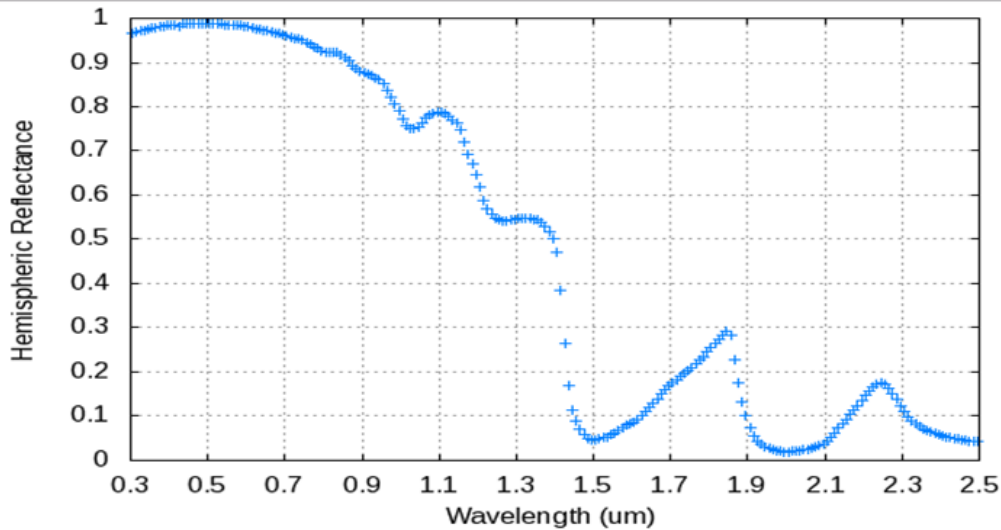
Broadband Snow Albedo: 0.88110042

[Spectral Output](#) (Left column is wavelength in microns, right column is albedo)

For the following conditions:

Incident-Flux: **Direct-beam, Solar zenith angle: 60 degrees**
 Surface spectral distribution: **Mid-latitude winter, cloudy**
 Snowpack effective grain size: **100 μm**
 Snowpack thickness: **1 m**
 Snowpack density: **200 kg/m³**
 Visible albedo of underlying surface : **0.2**
 Near-IR albedo of underlying surface : **0.4**
 Uncoated black carbon concentration: **20.94 ppb**

Figura 25. Filtro de GLA – PM 2.5 04



Broadband Snow Albedo: 0.88614756

[Spectral Output](#) (Left column is wavelength in microns, right column is albedo)

For the following conditions:

Incident-Flux: **Direct-beam, Solar zenith angle: 60 degrees**

Surface spectral distribution: **Mid-latitude winter, cloudy**

Snowpack effective grain size: **100 μm**

Snowpack thickness: **1 m**

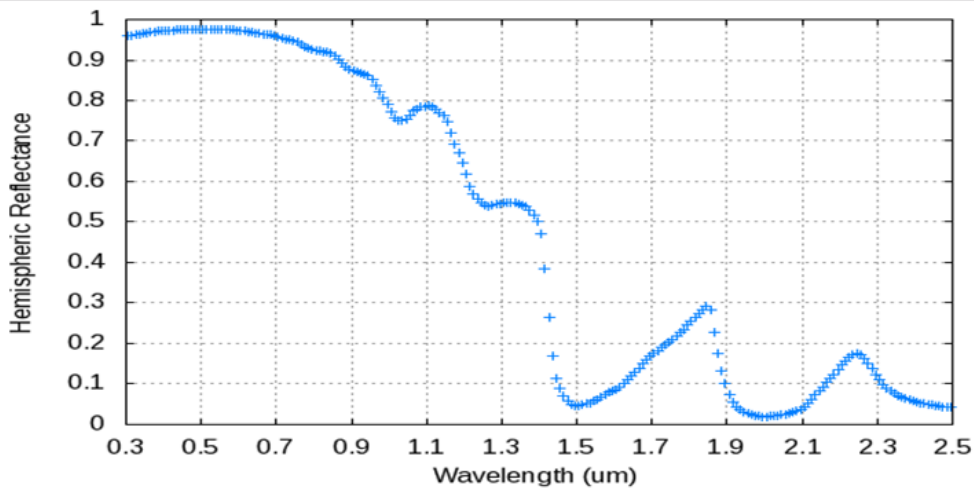
Snowpack density: **200 kg/m³**

Visible albedo of underlying surface : **0.2**

Near-IR albedo of underlying surface : **0.4**

Uncoated black carbon concentration: **0 ppb**

Figura 26. Filtro de GLA – PM 2.5 03



Broadband Snow Albedo: 0.81886762

[Spectral Output](#) (Left column is wavelength in microns, right column is albedo)

For the following conditions:

Incident-Flux: **Direct-beam, Solar zenith angle: 60 degrees**

Surface spectral distribution: **Mid-latitude winter, clear-sky**

Snowpack effective grain size: **100 μm**

Snowpack thickness: **1 m**

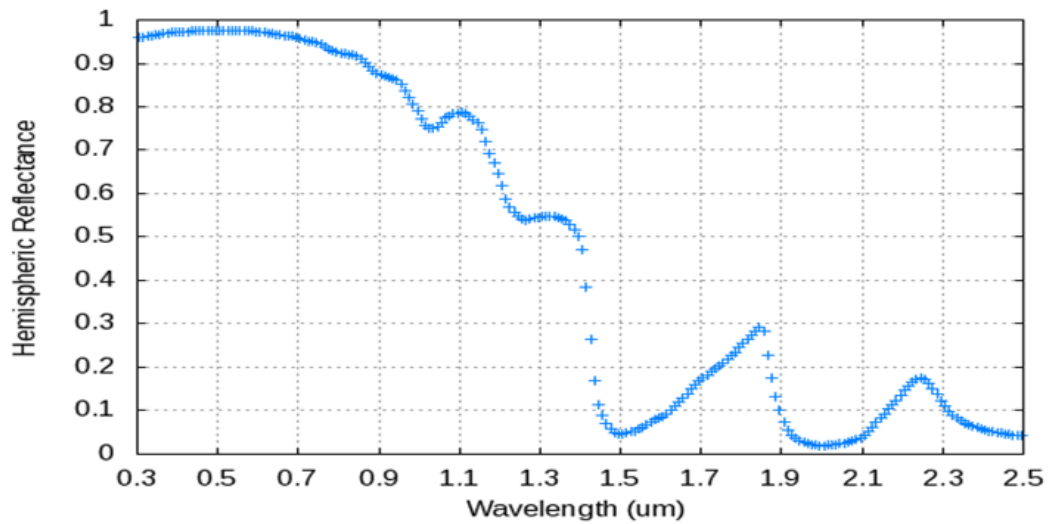
Snowpack density: **200 kg/m³**

Visible albedo of underlying surface : **0.2**

Near-IR albedo of underlying surface : **0.4**

Uncoated black carbon concentration: **26.98 ppb**

Figura 27. Filtro de GLA – PM 2.5 02



Broadband Snow Albedo: 0.81886762

Spectral Output (Left column is wavelength in microns, right column is albedo)

For the following conditions:

Incident-Flux: **Direct-beam, Solar zenith angle: 60 degrees**

Surface spectral distribution: **Mid-latitude winter, clear-sky**

Snowpack effective grain size: **100 μm**

Snowpack thickness: **1 m**

Snowpack density: **200 kg/m^3**

Visible albedo of underlying surface : **0.2**

Near-IR albedo of underlying surface : **0.4**

Uncoated black carbon concentration: **26.98 ppb**

Figura 28. Filtro de GLA – PM 2.5 01

Anexo 4. Fotos de material particulado pm 2.5 en el glaciar



Figura 29. Glaciar Incachiriasca



Figura 30. Recolección de muestras de nieve en el glaciar Incachiriasca



Figura 31. Superficie del glaciar Incachiriaca con presencia de material particulado PM 2.5



Figura 32. Ausencia de cobertura de nieve sobre el glaciar Incachiriasca

Anexo 5. Documento de autorización de entrada al Glaciar Incachiriasca



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de
Áreas Naturales
Protegidas por el Estado

Santuario Histórico de
Machupicchu

"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"

Cusco, 17 8 NOV 2019

CARTA N° 72 -2019-SERNANP- SHM/J

Bach. ÁMBAR VERÓNICA PAZOS PÉREZ
Universidad Alas Peruanas

Ciudad.-

Asunto: Remite autorización de ingreso

Referencia: Carta s/n de fecha 15 de noviembre de 2019

Es grato dirigirme a usted, a fin de remitir adjunto al presente la autorización de ingreso N° 69-2019-SERNANP-SHM/J en atención al documento de la referencia.

Sin otro particular, hago propicia la ocasión para expresarle los sentimientos de mi consideración.

Atentamente,

MINISTERIO DEL AMBIENTE
SERNANP

Dr. Ernesto Escalante Valencia
JEFE DEL SANTUARIO HISTÓRICO DE MACHUPICCHU

EEV/jjar
CC: Archivo
CUT N° 31984-2019

Dirección: Av. Oswaldo Baca N° 402, Urb. Magisterio 1ra. Etapa - Cusco
Teléfax: 51 - 84 - 229297 // 51 - 84 - 222310
Email: shmachupicchu@semanp.gob.pe
Web: www.semanp.gob.pe



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de Áreas
Naturales Protegidas por el
EstadoSantuario Histórico de
Machupicchu

"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"

Cusco, 18 NOV 2019

AUTORIZACION DE INGRESO N° 69-2019-SERNANP-SHM/J

Vista la solicitud de ingreso al Santuario Histórico de Machupicchu presentada por la bachiller Ámbar Verónica Pazos Pérez, responsable del proyecto de investigación prioritaria "Impacto de las partículas absorbentes de luz en el glaciar Inkachiriaska, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco", de la Universidad Alas Peruanas, en correspondencia a la Resolución Jefatural N° 38-2019-SERNANP-SHM/J que autoriza la mencionada investigación.

La jefatura del Santuario Histórico de Machupicchu autoriza el ingreso por el sector de Soraypampa y tránsito hacia el sector de Incachiriaska, los meses de enero hasta octubre de 2020, a las siguientes personas:

N°	Nombres y Apellidos	DNI
1	Ámbar Verónica Pazos Pérez	74309742
2	Juan José Zúñiga Negrón	23989604



Las personas autorizadas deberán registrarse y dejar copia de la autorización en el puesto de control y vigilancia de Soraypampa. Asimismo, serán monitoreados por el personal guardaparque del SHM, a quienes se les deberá otorgar las facilidades del caso.

Al ingresar al SHM el equipo de trabajo se compromete a cumplir lo siguiente:

- Cumplimiento estricto de los compromisos asumidos en el plan de investigación y Resolución Jefatural N° 38-2019-SERNANP-SHM/J, mediante la cual se autoriza.
- Visitar solo áreas autorizadas en los sectores mencionados.
- No hacer fuego abierto en ningún lugar del SHM, y mantenerlo limpio.
- No extraer ni realizar colectas de especímenes de flora y fauna, ni extraer materiales culturales del SHM.
- Durante el desarrollo de los trabajos se deberá menguar en lo posible todo tipo de impacto ambiental.
- Las personas autorizadas deberán cumplir con todas las recomendaciones que provengan de las supervisiones realizadas por el personal guardaparque del SERNANP, durante el tiempo de permanencia en el ANP.
- A la conclusión de los trabajos de campo, informar al personal guardaparque del sector.

La jefatura del Santuario Histórico de Machupicchu no se responsabiliza por la integridad física de los integrantes, por lo tanto, deberán prever todo lo relacionado a su seguridad y estadía durante la permanencia en la zona.

Av. Oswaldo Baca N° 402, Urb. Magisterio 1ra. Etapa - Cusco
Telefax: 51 - 84 - 229297 // 51 - 84 - 222310
Email: shmachupicchu@sernanp.gob.pe



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de Áreas
Naturales Protegidas por el
Estado

Santuario Histórico de
Machupicchu

"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"

El incumplimiento de los lineamientos establecidos, así como el daño al patrimonio natural y/o cultural, será causal de denegación de futuros permisos y/o suspensión de la misma, así como de las sanciones correspondientes.

Atentamente,

MINISTERIO DEL AMBIENTE
SERVIR


Dr. Ernesto Escalante Valencia
JEFE DEL SANTUARIO HISTÓRICO DE MACHUPICCHU

EEV/jjar
Con Atención PCV Soraypampa
Cc.: Archivo

Av. Oswaldo Baca N° 402, Urb. Magisterio 1ra. Etapa - Cusco
Telefax: 51 - 84 - 229297 // 51 - 84 - 222310
Email: shmachupicchu@sernanp.gob.pe