



**PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA
“BALANCE DE MASA GLACIAR”**

Código: M-GCI-E-M030

Versión: 02

Fecha: 30/06/2022


Página: 1 de 16



IDEAM

**Instituto de Hidrología,
Meteorología y
Estudios Ambientales**

**PLAN GENERAL
PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA
“BALANCE DE MASA GLACIAR”**

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 2 de 16

DESARROLLO

1. IDENTIFICACIÓN Y CONFIRMACIÓN DE NECESIDADES

Nombre de la operación estadística

BALANCE DE MASA GLACIAR (BMG)

Identificación de usuarios y necesidades de información

El IDEAM establece mecanismos e instrumentos para la detección y análisis de usuarios y necesidades de información glaciológica. Este reconocimiento y caracterización inicia por medio del Grupo de Servicio al Ciudadano, que en un proceso interno selecciona, depura y caracteriza las necesidades provenientes de usuarios externos (PQRS). Complementariamente recolecta e identifica los usuarios y necesidades de información glaciológica por medio de la herramienta de encuesta.

La información obtenida a través de PQRS, aplicación de encuesta, correo electrónico, o cualquier otro canal de atención dispuesto por el IDEAM; se documenta en los formatos de *Caracterización de necesidades de información glaciológica* y *Directorio de usuarios de información glaciológica*.

Usuarios y necesidades internas


La información estadística de la operación puede y ha sido usada en diferentes informes y comunicaciones eventuales de la entidad productora. A continuación, se reseñan los principales productos que presentan necesidades periódicas internas (IDEAM) de la información de la operación:

- Estudio Nacional del Agua (ENA)
- Informe del Estado del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (IEARNR)
- Comunicación Nacional de Cambio Climático

Usuarios y necesidades externas

Desde el ámbito nacional, diferentes entidades han presentado necesidades de información glaciológica, directa o indirectamente dada la representatividad de los datos para la comprensión del medio ambiente y el cambio climático. Tal es el caso del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR's), quienes a su vez también usan información registrada en el Estudio Nacional del Agua (ENA) y en el Informe del Estado del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (IEARNR). Vale la pena destacar a la entidad de orden nacional Parques Nacionales Naturales de Colombia, encargada de la administración y manejo del Sistema de Parques Nacionales Naturales y la coordinación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, como otro usuario de información de glaciología; particularmente en los parques dentro de los cuales se están los glaciares estudiados.

A nivel internacional, la Operación Estadística BMG encuentra la principal razón de la necesidad para su desarrollo y viabilidad en el hecho que es de importancia mundial. El IDEAM ha conformado desde el año 2006 una red de monitoreo glaciológico e hidrometeorológico de la alta montaña para comprender su funcionamiento y la relación con el clima. Dos glaciares de estudio se han instrumentado para observarlos directamente en campo: el volcán nevado

 <p>IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales</p>	<p>PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”</p>	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 3 de 16

Santa Isabel (cordillera Central, departamentos de Caldas, Tolima y Risaralda) y la sierra nevada El Cocuy o Güicán (cordillera Oriental, departamentos de Boyacá y Arauca). Gracias a este monitoreo en terreno, que tienen como eje central la operación estadística, el primero de estos glaciares ha sido incluido como un glaciar representativo con información detallada en los boletines de cambio glaciar global de la principal red de datos glaciológicos en el planeta y usuario de la información: el Servicio Mundial de Monitoreo Glaciar (WGMS, por sus siglas en inglés) con sede en la Universidad de Zúrich en Suiza. La necesidad de este organismo internacional por los datos generados de la Operación Estadística Balance de Masa Glaciar es anual e ininterrumpida y se identifica mediante una solicitud electrónica denominada “*call for data*”.

Análisis de las necesidades recolectadas

El IDEAM, complementario al proceso de identificación de las necesidades, confirma y analiza las mismas teniendo en cuenta la importancia para el país y el fenómeno de estudio. Es del mayor interés del Instituto que la operación sea permanentemente actualizada y con plena fiabilidad y comparabilidad mundial. En tal sentido, acorde con el *Protocolo para la detección y análisis de necesidades de información de la dinámica glaciar en Colombia*. las necesidades de información se analizan y confirman a través de una reunión anual de evaluación, que tiene como responsables a el(la) Subdirector(a) de Ecosistemas e Información Ambiental, Coordinador(a) grupo de Monitoreo de Ecosistemas de Alta Montaña y Profesional Especializado (líder temático).


Mediante este mecanismo el IDEAM realiza la identificación, caracterización y análisis de las solicitudes de información y usuarios tanto internas, externas, nacionales o internacionales, que permiten la generación de la información estadística que estos requieren. Las herramientas anteriormente descritas permiten hacer un seguimiento periódico para detectar cambios o nuevas necesidades que atender respecto al alcance temático de la operación.

2. JUSTIFICACIÓN

Importancia y beneficios para el país

La OE BMG encuentra la principal razón de la necesidad para su desarrollo y viabilidad en la gran importancia nacional e internacional. La necesidad del estudio de los glaciares en todo el planeta es incuestionable, los glaciares son uno de los mejores indicadores naturales de cambio climático, ampliamente reconocidos en el mundo por entidades como el Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas – IPCC y el órgano de las Naciones Unidas encargado de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático. La mayor ventaja de los glaciares como objeto de estudio radica en su sensibilidad climática, los cambios en los glaciares y las capas de hielo proporcionan una de las evidencias más claras del cambio climático, y como tal, constituyen variables clave para la identificación de estrategias de observación del clima global.

En el caso de Colombia, el IDEAM tiene esa particular responsabilidad. A nivel mundial se ha recomendado que los países que posean en su territorio parte de la criósfera terrestre realicen observaciones periódicas, sistemáticas y estandarizadas, para tener comparabilidad y relacionar estos cambios con dinámicas observadas en la atmósfera, hidrósfera e incluso la biósfera terrestre. Sumado a la importancia que cumplen los glaciares como indicadores de alteraciones en el clima terrestre, hay que añadirle las posibles implicaciones para los grupos sociales que mantienen una relación directa con estos sistemas desde los aspectos socioeconómico y cultural. Los glaciares ecuatoriales, como los de Colombia, son especialmente sensibles a este proceso, pues aun cuando el proceso de reducción glaciar es mundial, es diferencial según la zona geográfica del planeta. Los glaciares tropicales andinos se consideran especialmente sensibles al actual cambio climático (Schoolmeester et al., 2018). Según el informe especial *El océano*

 IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 4 de 16

y la criósfera en un clima cambiante del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC, se prevé que las regiones donde predominan los glaciares más pequeños -por ejemplo, Europa central, el Cáucaso, Asia septentrional, Escandinavia, los Andes tropicales, México, África oriental e Indonesia- sufrirán la pérdida de más del 80 % de su masa de hielo actual en 2100 en el marco de la trayectoria de concentración representativa (RCP 8,5), el modelo más pesimista o la trayectoria con el nivel más elevado de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019).

Todos los nevados colombianos son estudiados rutinariamente por métodos indirectos, e igualmente el IDEAM aplica el método directo en campo, con el fin de determinar de manera más exacta y mediante técnicas cuantitativas las pérdidas o ganancias de masa de la criósfera¹ colombiana. En este último sentido, a inicios del presente siglo, el IDEAM adoptó una de las técnicas glaciológicas de mayor uso a nivel mundial en dos zonas glaciares del país (Volcán Nevado Santa Isabel y Sierra Nevada El Cocuy o Güicán): el cálculo del Balance de Masa Glaciar por el método glaciológico directo.

El IDEAM, como integrante del Sistema Estadístico Nacional (SEN) y entidad productora de información estadística, implementa técnicas de estudio glaciológico como el Balance de Masa Glaciar, que permiten evaluar la dinámica y evolución de los glaciares o nevados nacionales. El Balance de Masa Glaciar es una estadística oficial única en todo el país y de importancia mundial, representa una cuantificación de cuánta masa gana o pierde un glaciar en determinado periodo de tiempo.

Relevancia de los resultados de la operación estadística para la política pública

La información compartida en diferentes productos tales como la Tercera Comunicación nacional de cambio climático tiene particular relevancia, ya que la OE BMG ofrece información relevante del estado de los ecosistemas estratégicos en esta publicación y hace parte argumental de las evidencias de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático con que cuenta el país. Esto provoca que la información producida en esta operación sea tenida en cuenta para las comunicaciones oficiales del IDEAM en las que se vislumbran recomendaciones de política pública y acciones de mitigación y adaptación.


Las operaciones estadísticas de dinámica glaciar del IDEAM son únicas para el país. Es así que, teniendo en cuenta la evidente relevancia del seguimiento a la dinámica de los glaciares en el mundo, lo cual refleja la importancia de la información estadística generada; los resultados de estas operaciones estadísticas evidencian a su vez un margen amplio para una mayor difusión y conocimiento de los resultados, que puedan ser usados en un futuro para la toma de decisiones en estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático a nivel de políticas nacionales.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

Objetivo General

Generar estadísticas de la dinámica glaciar en Colombia, mediante el cálculo de balance de masa glaciológico por el método directo para los glaciares de estudio, que permita identificar el estado de estos glaciares conociendo sus pérdidas y ganancias de masa durante un periodo establecido.

¹ Los componentes del sistema Tierra que están congelados, incluyendo cobertura de nieve, glaciares, casquetes de hielo continental, plataformas de hielo flotantes, icebergs, hielo marino, hielo en lagunas, hielo en ríos, permafrost y suelo congelado estacional (IPCC, 2019).

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 5 de 16

Objetivos específicos

- Mantener en funcionamiento las redes instrumentales que permiten la captura de datos primarios y principales variables de balance de masa glaciar: área de glaciar de estudio, rangos altitudinales, área relativa por rango, sección de la baliza, emergencia de la baliza, densidad del hielo, espesor del hielo, densidad de la nieve y espesor de la nieve.
- Calcular por cada unidad estadística y periodo de medición el balance de masa específico, balance de masa total o ponderado, balance de masa acumulado y línea de equilibrio altitudinal.
- Calcular por cada unidad estadística y año hidrológico el balance de masa anual o neto y línea de equilibrio altitudinal anual.
- Calcular el indicador ambiental Balance de masa glaciológico.
- Publicar las estadísticas derivadas de la operación estadística en el portal web institucional.


Alcance temático

El cambio de masa de un glaciar (medido como un volumen de agua líquida equivalente), ocurrido durante un lapso de tiempo, normalmente la duración del año hidrológico y para los sitios piloto escogidos por el IDEAM; por medio del método denominado “método directo o glaciológico”, desarrollado principalmente en el Volcán Nevado Santa Isabel (sector Conejeras) y la Sierra Nevada El Cocuy (sector Ritacuba Blanco), que permita identificar el estado del glaciar de estudio conociendo sus pérdidas y ganancias de masa durante un periodo establecido.

4. CONCEPTOS BÁSICOS, VARIABLES E INDICADORES ESTADÍSTICOS

La estimación del Balance de Masa Glaciar consiste en un cálculo periódico y cuantitativo de las pérdidas y ganancias de masa (hielo y nieve) derivado de mediciones en campo sobre la superficie glaciar mediante la aplicación de un método denominado ‘método directo o glaciológico’. Representa metafóricamente el estado de salud de un glaciar, pues indica cuánta masa (hielo y nieve) ha perdido o ganado durante un lapso de tiempo determinado. Bajo este cálculo, el glaciar es entendido conceptualmente como un sistema de entradas (+) y salidas (-). Las entradas representan ganancia o acumulación de masa (precipitación sólida); por el contrario, las salidas evidencian pérdida, ablación o derretimiento (fusión, evaporación y sublimación). Mediante mediciones directas sobre la superficie del glaciar en dos momentos diferentes, se estiman las salidas o entradas para el periodo de tiempo transcurrido. Para las entradas se considera únicamente la precipitación sólida (nieve y granizo) la cual, bajo determinadas condiciones ambientales, se acumula sin derretirse y puede transformarse en hielo. Para las salidas del sistema solo se considera la pérdida por fusión glaciar (estado sólido a líquido) y se desprecia las pérdidas por evaporación y sublimación debido a su insignificante contribución en el balance y su difícil medición.

Al ser con el método denominado directo o glaciológico, las mediciones se realizan directamente en terreno y se soportan en la instalación y medición de una serie de estacas o balizas (tubos delgados de plástico, metal o madera) en forma vertical y enterrados a algunos metros de profundidad en el hielo, que permiten un muestreo sistemático. Las balizas son utilizadas -a modo de limnómetro en un río- para medir los cambios altitudinales de la nieve y el hielo superficial. En este punto es fundamental tener en cuenta las longitudes medidas de materiales con diferentes densidades, de ahí que se necesita tomar en cuenta de una manera separada el balance de la nieve y el balance del hielo para calcular el balance al nivel de una baliza (Francou y Pouyaud, 2004). Una vez identificados estos procesos deben ser cuantificados, por lo que las mediciones continuas de las balizas sirven como referencia. De esta forma, la


	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 6 de 16

suma de las entradas y salidas de masa en un lapso conocido (dos mediciones), ponen evidencia el comportamiento del glaciar, si ganó o perdió masa, de acuerdo con las alturas y densidades medidas.

Tomando como principal y más actual referente internacional los glosarios del *‘Informe especial sobre los océanos y la criósfera en un clima cambiante* del IPCC (2019) y el *glosario de balance de masa y términos relacionados* del Programa Hidrológico Internacional, aceptado por la WGMS (Cogley et.al., 2011), se identifican preliminarmente los siguientes conceptos y variables clave para la operación estadística.

Conceptos básicos

- **ABLACIÓN:** conjunto de procesos que reducen la masa de un glaciar. Incluye la transferencia de energía desde la atmósfera mediante procesos de radiación y flujos turbulentos en el aire adyacente a la superficie (IPCC, 2019).
- **ACUMULACIÓN:** conjunto de procesos que adicionan masa a un glaciar. Incluye la deposición por escarcha, lluvia helada, precipitación sólida en formas como nieve, vientos de nieve y avalanchas (IPCC, 2019).
- **AÑO o CICLO HIDROLÓGICO:** ciclo o período de un año dado por la sucesión natural de las estaciones hidrológicas en periodos de precipitación y periodos secos (Cogley et.al., 2011). Para los estudios de glaciología en Colombia se aproxima desde inicios del calendario gregoriano (mes de enero) hasta enero del año siguiente.
- **BALANCE DE MASA:** el cambio de masa de un glaciar (medido como un volumen de agua líquida equivalente), ocurrido durante un periodo de tiempo, normalmente la duración del año hidrológico. Un balance positivo indica acumulación de masa mientras que un balance negativo significa pérdida de masa (Cogley et.al., 2011).
- **BALIZA O ESTACA DE ABLACIÓN:** tubo delgado normalmente de plástico y de algunos centímetros de diámetro, enterrado en forma vertical a varios metros de profundidad dentro de la superficie del hielo. Sirve como instrumento con el cual se obtienen los datos mediante observaciones y mediciones directamente en campo de los cambios altitudinales de la superficie glaciar (Cogley et.al., 2011).
- **GLACIAR:** Cuerpo de hielo que cubre un sector de la superficie del planeta. Se caracteriza por tener una zona de acumulación, una de ablación y una línea de equilibrio (IDEAM, 2012).
- **HIELO GLACIAR:** hielo que hace parte de un glaciar y que, a través de la compactación y la recrystalización, sobrevivió al menos una temporada de ablación. Convencionalmente se entiende la densidad de 830 kg m⁻³ a la cual se compactan los espacios vacíos, es decir: la neviza se convierte en hielo de glaciar (Cogley et.al., 2011).
- **LÍNEA DE EQUILIBRIO:** El conjunto de puntos en la superficie del glaciar donde el balance de masa es cero en un determinado momento; la línea de equilibrio (Equilibrium-line altitude ELA) separa las zonas de acumulación y ablación (Cogley et.al., 2011).
- **MÉTODO GLACIOLÓGICO DIRECTO:** método para determinar el balance de masa de forma directa o in-situ, por medio de medidas de acumulación y ablación, generalmente balizas y pozos sobre el glaciar; método directo es un sinónimo (Cogley et.al., 2011).
- **NIEVE:** precipitación sólida compuesta de cristales de hielo entrelazados, con espacios ocupados por agua líquida y aire. Convencionalmente se entiende la densidad de la nieve entre 10 y 400 kg m⁻³ (Cogley et.al., 2011).
- **PERFORADORA DE HIELO:** taladro de vapor de agua caliente que perfora la superficie del hielo y la nieve derritiendo un punto de diámetro definido a través del vapor de agua dispersado desde una punta metálica. El equipo de perforación completo consiste en un generador de vapor, una manguera de caucho y un tubo de perforación con puntas intercambiables (Rivera et.al., 2016).
- **ZONA DE ABLACIÓN:** la parte del glaciar donde la ablación excede a la acumulación (Cogley et.al., 2011).
- **ZONA DE ACUMULACIÓN:** la parte del glaciar donde la acumulación excede en magnitud a la ablación (Cogley et.al., 2011).

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 7 de 16


Variables

- **ÁREA GLACIAR:** extensión en dos dimensiones del glaciar de estudio o parte de este cuando el límite del glaciar se proyecta sobre la superficie de un elipsoide que se aproxima a la superficie de la Tierra o sobre un plano (horizontal) aproximado a ese elipsoide (Cogley et.al., 2011).
- **ÁREA RELATIVA POR RANGO (Area-altitude distribution):** La distribución del área de los glaciares en rangos altitudinales (elevación), generalmente presentada como una tabla con valores hipsométricos que indica el área del glaciar dentro de sucesivos intervalos de altitud (Cogley et.al., 2011).
- **DENSIDAD DE LA NIEVE:** relación entre la masa del hielo y el volumen que ocupa. Convencionalmente, la línea divisoria entre nieve y neviza está cerca de una densidad de 400 kg m⁻³ (Cogley et.al., 2011). Para Colombia, convencionalmente se asume la densidad de la nieve en la superficie de los glaciares en 400 kg m⁻³.
- **DENSIDAD DEL HIELO:** relación entre la masa del hielo y el volumen que ocupa. Es muy común asumir que la densidad aparente del glaciar es 900 kg m⁻³ (Cogley et.al., 2011). Para Colombia, convencionalmente se asume la densidad del hielo en 900 kg m⁻³.
- **EMERGENCIA DE LA BALIZA:** medida vertical del segmento aflorado por fuera de la superficie del glaciar de una baliza en un punto fijo en el espacio, debido al vector de velocidad de flujo del glaciar en el sentido contrario (Cogley et.al., 2011). Altura de la baliza sobre la superficie (Rivera et.al, 2016).
- **ESPESOR DEL HIELO:** distancia vertical entre la superficie del glaciar y el lecho rocoso. El espesor del hielo se mide idealmente interpolando mediciones puntuales, realizadas con un equipo de radar de penetración de tierra (Cogley et.al., 2011).
- **ESPESOR DE LA NIEVE:** distancia vertical entre la superficie del glaciar y la superficie del hielo para un punto cualquiera del glaciar, por ejemplo, una baliza o un pozo o calicata (Cogley et.al., 2011).
- **PROFUNDIDAD AL HIELO:** distancia vertical entre la parte final de la última sección de una baliza y la superficie del hielo. Se obtiene mediante la suma de la emergencia de la baliza (teniendo en cuenta posibles secciones de la baliza afloradas) y espesor de la nieve medidos directamente sobre la superficie glaciar.
- **RANGOS ALTITUDINALES:** secciones o intervalos altitudinales en las que se divide el glaciar y que fluctúan, generalmente, entre 50 y 100 m. Su determinación es importante ya que cada área relativa por rango del glaciar es afectada por el valor medido con la baliza (o del pozo) localizada en el rango en cuestión (Francou y Pouyaud, 2004).
- **SECCIÓN DE LA BALIZA:** segmento del que se componen las balizas compuestas, lo que permite sustraer tramos de la baliza cuando la ablación es muy alta o por el contrario, agregar un nuevo segmento para así extender el largo total cuando la acumulación de nieve es suficiente como para sepultar una baliza (Rivera et.al, 2016). En Colombia, generalmente cada sección de la baliza tiene una longitud de dos metros y se denomina con un número ascendente (i, ii, iii...) empezando por la sección que se encuentra a mayor profundidad.

Indicadores

El indicador ambiental Balance de Masa Glaciar, hace parte del conjunto de indicadores ambientales del IDEAM, reglamentados por la Resolución 667 de 2016 y a partir del Decreto 1086 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Corresponde a la sumatoria de la acumulación y de la ablación glaciar, en una unidad espacial de referencia en el tiempo. Ese cambio de masa se ve representado en una columna de agua equivalente ocurrido durante un lapso de tiempo definido, determinado normalmente, por la duración de un año hidrológico. Se representa bajo la siguiente ecuación:

$$b = c + a$$

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA "BALANCE DE MASA GLACIAR"	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 8 de 16

donde b es el balance de masa específico, c es la acumulación y a es la ablación, todos medidos en cualquier punto del glaciar y expresados en volumen equivalente de agua.

Complementariamente otros indicadores estadísticos son producidos durante el proceso de la operación estadística:

- Balance de masa glaciar intra-anual: Corresponde al balance de masa calculado dentro del año hidrológico. Ya que se realizan varias mediciones intra-anales es posible determinar el comportamiento del glaciar en diferentes temporadas climáticas (lluvia o seca) dentro de un año.
- Nieve acumulada: Durante las campañas de campo se toman datos de la nieve acumulada sobre la superficie glaciar en cada punto o baliza como una de las fuentes para calcular el balance de masa. Usando independientemente estos datos es posible calcular estadísticas intra-anales o anuales de cómo se comporta esta variable.

5. RESULTADOS ESPERADOS

Los principales cruces de variables que se generarán con los resultados obtenidos se encaminan a la obtención de los siguientes resultados.

Balance de masa específico

Balance de masa para un punto cualquiera del glaciar, por ejemplo, una baliza o un pozo o calicata. Es una medición en un punto del glaciar entre dos periodos de medición $\frac{db}{dt}$, por lo cual la ecuación básica teniendo en cuenta esta cualidad es:

$$\frac{db}{dt} = \frac{\rho dh}{dt}$$

donde ρ es la densidad del hielo de espesor h , que varía según el tiempo t . Lo anterior asumiendo un cambio de la masa de hielo con densidad constante. No obstante, se miden longitudes de materiales con diferentes densidades como la del hielo y la nieve, por tanto, el balance de masa específico entre dos periodos de medición es:

:

$$b_i = \rho_0 \Delta h + (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1)$$


donde b_i corresponde al balance de masa en el sitio i , ρ_0 es la densidad del hielo y Δh su cambio de espesor. El primer término de la ecuación representa por tanto el balance del hielo. La segunda parte de la ecuación representa el balance o la diferencia del material poroso (nieve o neviza) ρ_2 y ρ_1 en función del tiempo.

Balance de masa anual o neto

Balance de masa que representa la suma de la acumulación y la ablación a lo largo de un año hidrológico. El balance específico anual se expresa de la siguiente manera:

$$b_n = c_t + a_t$$

donde b_n es el balance de masa específico anual, y c_t es la acumulación y a_t es la ablación específica total durante el año de balance, por ejemplo, año hidrológico.

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 9 de 16

Balance de masa total o ponderado

Balance de masa integrado a toda la superficie o área del glaciar después de un proceso de interpolación. La ponderación del balance específico según las áreas por rangos relativos, el balance de masa total B_n se expresa como:

$$B_n = \frac{1}{S} \left(\sum_{i=1}^j b_i S_i \right)$$

donde S corresponde a la superficie total del glaciar estudiado; b_i al balance ponderado por área S_i dentro de los rangos de altura (j)

Balance de masa acumulado

La suma algebraica de balances de masa periódicos o parciales.

Línea de equilibrio altitudinal

El conjunto de puntos en la superficie del glaciar donde el balance de masa es cero en un determinado momento; la línea de equilibrio (Equilibrium-line altitude ELA) separa las zonas de acumulación y ablación. Se determina a partir del gráfico de regresión lineal del balance de masa específico de cada punto (baliza) en función de la altitud de ese punto (es la intersección de la abscisa -altitud- con la ordenada cero del balance de masa). Es un parámetro usado en el mundo para seguir el impacto del actual cambio climático en los glaciares y como un indicador indirecto de su intensidad.

6. EXPLORACIÓN DE FUENTES DE DATOS

Comprobación de la disponibilidad de datos

Por la naturaleza de los datos producidos en el proceso estadístico y el fenómeno natural estudiado, no existen otras operaciones estadísticas en el SEN y en otra entidad de alcance nacional o regional que produzcan información estadística que satisfaga las necesidades identificadas alrededor de *la dinámica de la pérdida o ganancia de masa en los glaciares colombianos*.

La principal característica de esta operación es que es única en su tipo, por ello la entidad productora es la única con disponibilidad de datos con este alcance temático. En vista de la exclusividad y carácter único y especial de los datos producidos, la OE BMG tiene varias características que permiten concluir lo siguiente:

- a) Reconociendo la inexistencia actual de datos oficiales de otras fuentes en el país, el IDEAM está comprometido con la calidad de la producción del registro al ser la única fuente oficial de datos.
- b) Es el único registro existente en el país que puede dar respuesta a solicitudes de información provenientes de requerimientos internacionales por este tipo de información específica. Esta comprobación de disponibilidad de datos permite identificar al IDEAM como la fuente idónea de datos para el plan general de la operación estadística.

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 10 de 16

- c) En el ámbito mundial, la información estadística de balance de masa es calculada en todos los continentes y en la mayoría de los países bajo la misma metodología.
- d) Es el único registro que permite responder a necesidades de política pública intersectorial o territorial en dicho tema, por lo tanto, puede ser fuente para algunos de los sistemas de información sectoriales de interés para el país o el territorio en lo referente al estado de los glaciares colombianos.
- e) El indicador ambiental institucional ‘Balance de Masa Glaciar’ ha permitido la construcción de esta operación estadística.

Determinación de la fuente de datos

La fuente de información es primaria, corresponde con los datos capturados en los puntos de observación sobre la superficie de los glaciares objeto de estudio directo por parte del IDEAM. El tipo de operación estadística se cataloga como un *muestreo no probabilístico* por conveniencia, en donde se seleccionan muestras de la población por conveniencia técnico-científica en la cual cada muestra tiene su propio comportamiento sin que ello afecte la representatividad respecto al universo de estudio.

7. EXPLORACIÓN METODOLÓGICA

Metodología a desarrollar

Los conceptos y variables de la operación estadística son una adopción y aplicación de directrices y experiencias internacionales existentes sobre el objeto (los glaciares) y método (balance de masa) de estudio. En aras de ello, se toman conceptos estandarizados de referencia internacional como el Servicio Mundial de Monitoreo Glaciar, el ‘Método de Observación de Glaciares en los Andes Tropicales’ del Instituto francés de Investigación para el Desarrollo IRD (Francou y Pouyaud, 2004) y los glosarios del Programa Hidrológico Internacional-(PHI-UNESCO) y la Asociación Internacional de Ciencias Criosféricas (IACS) (Cogley et.al., 2011) o del Informe Especial sobre los Océanos y la Criósfera en un clima cambiante del IPCC (2019).

La posición geográfica de los glaciares colombianos, aproximadamente entre los 3° y 11° de latitud norte, los clasifica como glaciares ecuatoriales; lo que implica una alta sensibilidad al desplazamiento intraanual de la Zona de Confluencia Intertropical y a fenómenos extremos de variabilidad climática interanuales como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Su ubicación ecuatorial implica igualmente que el seguimiento a la dinámica glaciar en Colombia se debe abordar de acuerdo a la especificidad de cada glaciar, con base en su dinámica propia, las condiciones atmosféricas locales u otros factores que reflejan la necesidad o prioridad por parte del Instituto para ejecutar dicho proceso. Los nevados colombianos son particularmente sensibles a las condiciones climáticas actuales, pero a pesar de que existe una condición global de cambio climático, hay circunstancias locales que acentúan o menguan la reducción.

En Colombia actualmente existen seis masas glaciares clasificadas como ecuatoriales por su posición latitudinal:

Nevado	Coordenadas geográficas del punto central	Altitud máxima aproximada
Sierra Nevada de Santa Marta	6° 30’N; 72° 15’W	5380m
Sierra Nevada El Cocuy o Güicán	10° 50’N; 73° 41’W	5775m
Volcán Nevado del Ruiz	4° 53’N; 75° 19’W	5330m

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 11 de 16

Volcán Nevado Santa Isabel	4° 48' N; 75° 22' W	4968m
Volcán Nevado del Tolima	4° 39' N; 75° 19' W	5280m
Volcán Nevado del Huila	2° 55' N; 76° 01' W	5364m

Los actuales seis glaciares o nevados del territorio colombiano desde el punto de vista teórico, pueden ser objeto de la operación estadística. No obstante, teniendo en cuenta tanto la experiencia científica de 15 años del IDEAM en el tema de monitoreo glaciar, es necesario seleccionar las áreas de estudio. Esto debido fundamentalmente a la dificultad logística, técnica y económica de realizar mediciones directas sobre todos los glaciares del país. El IDEAM atiende criterios científicos, técnicos y logísticos de desagregación y cobertura geográfica del universo de estudio. Se define por tanto una red de medición para dos sitios de observación que permiten lograr los objetivos de la operación estadística, seleccionando las muestras a partir de los siguientes criterios:

- Representatividad del glaciar
- Viabilidad, accesibilidad y seguridad.
- Morfología de la cuenca
- Estado del frente glaciar e hidrología


A partir de la evaluación de los cuatro (4) criterios anteriormente mencionados, la muestra queda conformada por dos unidades de observación y análisis.

- El Volcán Nevado Santa Isabel (sector Conejeras)
- La Sierra Nevada El Cocuy o Güicán (sector Ritacuba Blanco).

Esta muestra se mantiene estable en el tiempo y en el espacio, siendo reevaluada cada dos años para confirmar si continúa con las características que permiten su estudio.

Ambas unidades permiten abarcar el criterio del tamaño del sitio de estudio, ya que tanto un glaciar pequeño como el glaciar en el sector Conejeras es más vulnerable, en extinción y responde rápidamente a los pequeños cambios atmosféricos, así como un glaciar más grande como la Sierra Nevada El Cocuy el sector Ritacuba Blanco, permite realizar un estudio más extenso a lo largo del tiempo. Es importante recalcar que, estadísticamente, es viable incluir más glaciares o cambiar las unidades de observación en el proceso estadístico y el marco muestral es susceptible de actualizaciones o novedades en el transcurso del tiempo, teniendo en cuenta estos mismos criterios.

La metodología explorada requiere de la visita periódica a los glaciares, pues la implementación y mantenimiento de la red de instrumentos de medición, así como la recolección de los datos dependen de ello. En cuanto a la periodicidad definida por la exploración metodológica aquí reseñada, se prevé visitas de campo mensuales para el volcán nevado Santa Isabel y bimestrales para la sierra nevada El Cocuy o Güicán. Esta periodicidad en las observaciones en terreno se debe principalmente a la posición ecuatorial de los glaciares colombianos, que implica un comportamiento climático estacional diferente a los regímenes climáticos de altas latitudes, marcados por una periodicidad bianual (fin del verano y fin del invierno). Así mismo, la diferenciación entre las mediciones mensuales o bimestrales, responde básicamente a características propias de cada glaciar objeto de estudio en lo relativo a la altitud y el tamaño. Por un lado, el volcán nevado Santa Isabel (altitud máxima 4968 m. aprox.) es el de menor altitud y el más pequeño de los glaciares colombianos; esta condición hace que sea muy dinámico y tenga una variabilidad muy alta entre meses. Por otro lado, la sierra nevada El Cocuy o Güicán (altitud máxima 5330 m. aprox.) es el complejo glaciar más grande del país, lo cual lo hace relativamente más estable.

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 12 de 16

Método de recolección

La operación responde a la aplicación del método glaciológico y las correspondientes técnicas de recopilación de los datos, todo lo cual surge de la identificación y aplicación de conceptos estandarizados de referencia internacional y la metodología de *balance de masa glaciar*, utilizados por el Servicio Mundial de Monitoreo Glaciar (WGMS) a escala mundial. En Latinoamérica son especialmente importantes los aportes científicos de los glaciólogos francés Bernard Francou y austriaco Georg Kaser, quienes con sus trabajos en diferentes países de los Andes centrales constituyen un hito en los aportes de la glaciología mundial y latinoamericana en el tema, lo cual ha permitido homologar las metodologías en la región².


El método de recolección de datos usado para un sector específico y un período de determinado de tiempo, es el método glaciológico de forma directa o in-situ, que consiste en realizar mediciones directamente en el terreno, las cuales se efectúan después de instalar una serie de estacas o balizas (tubos delgados de plástico, metal o madera) en forma vertical y enterradas a algunos metros de profundidad, con el fin de medir los cambios de la nieve y el hielo en la superficie glaciar, los cuales se calculan teniendo en cuenta la división del terreno en rangos altitudinales a criterio del investigador. Dentro de cada rango altitudinal se selecciona al menos un punto también a criterio de los expertos, en el cual se realiza el levantamiento de datos primarios.

Además de este método, existen otros para estimar el balance volumétrico de masa como los métodos topográfico/geodésico o de restitución aerofotogramétrica o método indirecto por balance hidrológico³. No obstante, el método glaciológico, también conocido como directo, es el más común en todo el mundo para medir el cambio de masa de un glaciar (Francou y Pouyaud, 2004). Además, se considera el método más preciso hasta la fecha y proporciona la información más detallada sobre la variación espacial de las magnitudes del balance de masa (Kaser et.al., 2003). Complementariamente, puede lograr la mayor precisión, pero se basa en mediciones de campo repetidas, que deben llevarse a cabo en condiciones a veces bastante desafiantes, por lo que implica una tasa de adquisición de datos lenta y gastos que pueden ser elevados en cuanto a logística y mano de obra (Kaser et.al., 2003). Concluyentemente, el único método para el monitoreo detallado y a largo plazo del balance de masa es el método glaciológico directo; no sin dejar claro que las series de datos climatológicos e hidrológicos representan un complemento para realizar un análisis más detallado y una mejor interpretación de los datos (Kaser et.al., 2003).

Instrumento de recolección apropiado

² Para mayor alcance ver fundamentalmente el *manual para monitorear el balance de masa en glaciares de montaña* de Georg Kaser, Andrew Fountain y Peter Jansson (Kaser et.al., 2003) y los *métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales: mediciones de terreno y procesamiento de datos* de Bernard Francou y Bernard Pouyaud (Francou y Pouyaud, 2004).

³ Acorde con Kaser (et.al., 2003) el método topográfico/geodésico tiene varias limitaciones. Este debe aplicarse sobre toda la superficie del glaciar, lo cual puede resultar complicado. Además, el levantamiento de la superficie requiere que todas las partes del glaciar estén cubiertas, incluidas las regiones muy empinadas y con grietas. En cuanto a las imágenes remotas, normalmente tienen problemas en la zona de acumulación donde una definición de superficie insuficiente puede conducir a errores significativos en la estimación de la elevación de la superficie. Sumado a esto, la densidad de la neviza y del cuerpo de hielo debe ser muy parecida; por lo cual los cambios importantes en las áreas de acumulación son difíciles de determinar con precisión. Finalmente, este método no arroja valores puntuales de balance de masa, como su variación con la elevación (Kaser et.al., 2003). El método por restitución aerofotogramétrica se ve limitado en los Andes centrales por la calidad de las fotografías aéreas como la resolución espacial (Francou y Pouyaud, 2004) y el método indirecto hidrológico implica mediciones comparadas, a escala anual, entre la cantidad de hielo acumulado por las precipitaciones sólidas medidas/estimadas y la ablación medida/estimada por evaporación y sublimación (Francou y Pouyaud, 2004), lo cual hace que sea mucho más apto para un régimen climático de otra latitud.

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 13 de 16

La medición directa, es decir, sobre la superficie del glaciar, se lleva a cabo a partir de la instalación de una red de balizas o estacas (*balises* o *stakes* en francés e inglés respectivamente) en una parte del glaciar y atendiendo a un criterio de distribución espacial lo más uniformemente posible. No obstante, debido a condiciones fácticas de la naturaleza de los glaciares como su topografía o dinamismo, es imposible establecer una red perfectamente equidistante desde el punto de vista cartesiano. Generalmente dichas estacas se utilizan para medir la ablación glaciar; pero en la zona alta de un glaciar, donde en condiciones normales la acumulación supera la ablación, se excavan pozos (*puits* o *pits* en francés e inglés respectivamente) donde se mide directamente la cantidad de nieve o de hielo acumulada(o) entre el inicio y el fin del año hidrológico (Francou y Pouyaud, 2004).

En términos generales, el procesamiento de datos por este método se lleva a cabo a través de tres etapas. La primera es una división del glaciar de estudio en porciones denominadas rangos o franjas altitudinales relativamente paralelas que fluctúan generalmente entre 50 y 100 metros de diferencia altitudinal. En la segunda etapa cada rango de estos es afectado por el valor medido con la baliza (o del pozo) localizada en el rango en cuestión. Finalmente, se pondera y calcula el balance total para el glaciar.

Infraestructura requerida

Para su aplicación, la metodología definida requiere de la visita periódica a los glaciares, pues la implementación y mantenimiento de la red de instrumentos de medición, así como la recolección de los datos dependen de ello.

Los aspectos técnicos, tecnológicos e informáticos requeridos para la recolección, el procesamiento, el análisis y la difusión consisten de manera general en:

- Estructura operativa para ejecución de comisiones de campo.
- Equipos especializados para monitoreo glaciar en campo (Perforadora de hielo, GPS, sonda de nieve, cámara fotográfica).
- Vestimenta apropiada para trabajos en altitud.
- Programas computacionales para procesamiento, análisis y almacenamiento (Microsoft Office, ArcGis, Pix4D).
- Suministro y mantenimiento de equipos de cómputo.


Pruebas previstas

Con el fin de probar el funcionamiento del diseño de la operación estadística se prevé la realización de pruebas de funcionamiento a los instrumentos de recolección y las herramientas tecnológicas requeridas, las cuales se especifican en la fase de diseño del documento metodológico de la operación.

8. DIAGNÓSTICO DEL MARCO ESTADÍSTICO

Acorde con la Norma Técnica de la Calidad del Proceso Estadístico (NTCPE 1000:2020), la determinación de un marco estadístico sólo aplica para operaciones estadísticas censales o por muestreo probabilístico.


9. PLAN DE ACTIVIDADES, CRONOGRAMA Y PRESUPUESTO

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 14 de 16

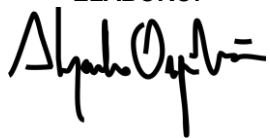
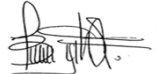


Como parte integral del plan general se establece un plan de actividades por fases para el desarrollo de la operación estadística con su respectivo cronograma, el cual se encuentra como anexo y parte de los documentos de la operación estadística Balance de Masa Glaciar. Este se documenta en el formato *Plan de actividades, cronograma y presupuesto para la operación estadística balance de masa glaciar*. El presupuesto general de las fases de la operación estadística Balance de Masa Glaciar se contempla en el formato *Plan de actividades, cronograma y presupuesto para la operación estadística balance de masa glaciar*, el cual hace parte integral del presente documento.

RELACIÓN DE AUTORES Y VERSIÓN DEL PLAN GENERAL

RELACIÓN DE AUTORES, VERSIÓN Y CONTROL DE CAMBIOS DEL PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA BALANCE DE MASA GLACIAR			
Fecha	Versión	Datos del autor o de quien ajustó la guía	Descripción de los ajustes
04/06/2021	1.0	Jorge Luis Ceballos Liévano Profesional Especializado Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental jceballos@ideam.gov.co Leslie Briyith Sacristán Vega Contratista Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental lsacristan@ideam.gov.co Jose Alejandro Ospina Niño Consultor Programa Páramos y Bosques Chemonics - IDEAM jaospina@ideam.gov.co	Creación del documento
30/06/2022	2.0	Jorge Luis Ceballos Liévano Profesional Especializado Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental jceballos@ideam.gov.co Leslie Briyith Sacristán Vega Contratista Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental lsacristan@ideam.gov.co Jose Alejandro Ospina Niño Consultor Programa Páramos y Bosques Chemonics - IDEAM jaospina@ideam.gov.co Cítese como:	Ajustes en la distribución y contenido del documento acorde con la implementación de plan de mejora del proceso estadístico.

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA "BALANCE DE MASA GLACIAR"	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 15 de 16

	Ceballos J. L., Sacristán L.B., Ospina J.A (2022). Plan general para la operación estadística "Balance de masa glaciar" (Versión 2,0). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. 16 pág.	
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

ELABORÓ:  José Alejandro Ospina Niño Contratista Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental  Leslie Briyith Sacristán Vega Contratista Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental	REVISÓ:  Jorge Luis Ceballos Liévano Profesional Especializado Subdirección de Ecosistemas e Información	APROBÓ  Ana Celia Salinas Martín Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

DOCUMENTOS RELACIONADOS


DANE. *Norma Técnica de la Calidad del Proceso Estadístico (NTCPE 1000:2020)* Recuperado de <https://www.sen.gov.co/files/RegulacionEstadistica/NTC%20PE%201000-2020.pdf> [fecha de consulta: 31 de enero de 2022]

DANE. *Guía para la elaboración del plan general de las operaciones estadísticas.* Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/sistema-estadistico-nacional-sen/normas-y-estandares/lineamientos> [fecha de consulta: 31 de enero de 2022]

IDEAM. *M-GCI-G002 Guía de elaboración del plan general para las operaciones estadísticas.* Recuperado de: <http://sgi.ideam.gov.co/generacion-de-conocimiento>

BIBLIOGRAFÍA

- Cogley, G., Hock, R., Rasmussen, A., Arendt, A., Bauder, A., Braithwaite, R., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. y Zemp, M. 2011. Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms, IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, COGLEY ET.AL.-IHP. Paris.
- Francou y Pouyaud .2004. Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Great Ice. IRD. Francia

	PLAN GENERAL PARA LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA “BALANCE DE MASA GLACIAR”	Código: M-GCI-E-M030
		Versión: 02
		Fecha: 30/06/2022
		Página: 16 de 16

- IDEAM (2012). *Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo*. IDEAM. Bogotá. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. 2012. Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. 344p
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- Kaser, G., Fountain, A., & Jansson, P. (2003). A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers. IHP-VI- Technical documents in hydrology.
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, C., Muñoz, C., Vuille, M. 2016. Balance de masa glaciar. Ediciones CECs. Valdivia, Chile
- Schoolmeester, T., Johansen, K.S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., y Verbist, K., 2018. Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. UNESCO y GRID-Arendal.