

## PROTOCOLO DE MONITOREO HIDROLÓGICO EN PÁRAMOS

Contrato No.: 17-14-331-123PS para la “Elaborar un protocolo de monitoreo hidrológico en páramos siguiendo las directrices del Programa Nacional de Monitoreo den el marco del proyecto Páramos Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes Norte” entre el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt y Martha de la concepción García Herrán”

**Contratista: Martha García Herrán\***

\* Magister en Ingeniería: Tecnología de Recursos Hídricos. Universidad de Birmingham, Inglaterra  
Correo electrónico: martha\_ghl@yahoo.com

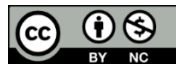
**Supervisor: Juan Pablo Romero Rodríguez**

Investigador Asistente III, Proyecto Páramos, Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte

Entidad financiadora



Delegación de la Unión Europea en Colombia



Atribución-No Comercial 4.0 Internacional

**Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt**  
Bogotá, D.C., 2018

Protocolo de monitoreo hidrológico en páramos / Martha García Herrán.  
Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von  
Humboldt, 2018.

174 p.

Incluye bibliografía, tablas, mapas, fotos a color

1. Isotopía 2. Agua atmosférica 3. Sensores remotos 4. Teledetección 5. Lluvia  
horizontal 6. Recursos hídricos – agua subterránea 7. Bioindicadores I. García  
Herrán, Martha II. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander  
von Humboldt

## Resumen

El documento presenta una propuesta inicial de Protocolo de Monitoreo Hidrológico en Páramos que parte de una serie de preguntas de gestión planteadas por autoridades ambientales regionales, por lo tanto tiene una aproximación pragmática, realista y orientada desde la técnica. Dichas preguntas apuntan a entender mejor el funcionamiento del sistema hidrológico de este ecosistema a nivel de complejo. El protocolo propuesto está enmarcado en el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico que se encuentra en proceso de reglamentación, y trabaja sobre componentes como los sensores remotos, isotopía y bioindicación.

**Palabras clave:** Isotopía, agua atmosférica, agua superficial, agua subterránea, lluvia horizontal, sensores remotos, modelación, monitoreo, protocolo de monitoreo, gestión de páramos, bioindicación.

## Abstract

The document presents an initial proposal of Hydrological Monitoring Protocol in Moors that starts from a series of environmental management questions proposed by regional environmental authorities, therefore it has a pragmatic, realistic and technically oriented approach. These management questions aim to better understand the functioning of the hydrological system of this ecosystem at a large scale. The proposed protocol is framed in the National Water Resource Monitoring Program, which is in the process of being officially adopted, and works on components such as remote sensing, isotopy and bioindication.

**Keywords:** Isotopy, atmospheric water, surface water, groundwater, horizontal rain, remote sensing, modeling, monitoring, monitoring protocol, moors management, bioindication.

## Introducción

Esta introducción fue desarrollada por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

El documento de línea base del Grupo de Trabajo Técnico en Incentivos a la Conservación – GTT en Incentivos a la Conservación del Proyecto Páramos, Biodiversidad y Recursos Hídricos de los Andes del Norte financiado por la Unión Europea y coordinado por el Instituto Humboldt, identificó que a pesar de que los servicios hidrológicos estaban fuertemente asociados al ecosistema de páramo, no existía un buen entendimiento de dichos servicios.

Lo anterior significa en la práctica que hoy en día, el país no sabe qué tanto aporta el páramo a la regulación hídrica de los diferentes cuerpos de agua que allí nacen y por lo tanto, no sabe cómo este servicio ecosistémico es afectado por las intervenciones como la conservación, la restauración y la reconversión productiva. Sobre esto es importante observar que tampoco es claro cómo estas intervenciones afectan la calidad del agua.

Lo anterior en términos de política pública representa una oportunidad de mejoramiento gigantesca en la medida en la que conocer mejor el funcionamiento del sistema hidrológico de los páramos no solo da cumplimiento a los requerimientos contenidos en el artículo 16 del decreto ley 870 de 2017, también aumentaría la eficiencia de los recursos invertidos que le apuntan a dar sostenibilidad a la regulación hídrica provista por estos ecosistemas.

Entendiendo lo anterior, la coordinación del proyecto páramos entró en contacto con la Subdirección de Hidrología del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM para entender cómo desde el proyecto se podía aportar al mejoramiento del entendimiento de los servicios ecosistemas hidrológicos del páramo. Como resultado de estos encuentros se concluyó que, toda vez que el país contaba con un Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico que estaba en proceso de reglamentación, existía la posibilidad de generar un protocolo que siguiera estos principios y por lo tanto el paso a seguir era formular las preguntas de gestión que debía atender dicho protocolo.

La formulación de las preguntas se realizó con base en los hallazgos de la línea base del grupo técnico de trabajo de incentivos a la conservación, que en términos generales se desprendían de requerimientos de gestión manifestados por instituciones del orden nacional y regional.

El desarrollo del protocolo observó diferentes retos, dentro de los cuales se observó que mucho del trabajo desarrollado en términos hidrológicos se ha realizado en escalas relativamente pequeño frente a las preguntas de gestión que a nivel nacional se hacen a nivel de complejo, adicionalmente, se observó que aproximar el monitoreo de páramos desde el balance hidrológico de cuencas tenía implícito un costo operativo muy alto, que no podría ser asumido por el país ni en el corto, ni en el mediano, ni en el largo plazo.

Con base en lo anterior, la consultora en conjunto con el IDEAM hizo el planteamiento metodológico que fue sometido a un grupo de expertos nacionales e internacionales en el taller de expertos en monitoreo hidrológico en páramos de Colombia desarrollado en la ciudad de Bogotá el 7 de junio de 2018 y como resultado de este evento se refinó la versión inicial del protocolo.

Este documento es útil ya que a pesar que aún no es un protocolo adoptado oficialmente por el IDEAM, se convierte en un hito técnico que permitirá orientar el debate alrededor de este tema desde un planteamiento bien planteado y estructurado.

## Contenido

<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>i</b>
I. Antecedentes y justificación .....	ii
II. Marco de conceptos .....	iii
III. Objetivos y alcance del protocolo .....	iv
IV. Componentes del protocolo de monitoreo hidrológico en paramo .....	iv
V. Metodología.....	vi
VI. Métodos y técnicas .....	viii
VII. Implementación del protocolo. Hoja de ruta general.....	ix
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>SIGLAS .....</b>	<b>4</b>
<b>PARTE I. CONTEXTO.....</b>	<b>6</b>
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>7</b>
<b>2. MARCO NORMATIVO E INSTITUCIONAL.....</b>	<b>8</b>
2.1 Marco normativo .....	8
2.2 Marco institucional.....	12
<b>3. MARCO DE CONCEPTOS PARA EL MONITOREO HIDROLOGICO EN PARAMOS ....</b>	<b>14</b>
3.1 Referentes de contexto .....	14
3.2 Ciclo del agua en los páramos, procesos y características .....	20
3.3 Modelo básico para el monitoreo del agua en los páramos.....	42
<b>4. PROCEDIMIENTO METODOLOGICO PARA CONSTRUCCION DEL PROTOCOLO ....</b>	<b>44</b>
<b>5. ESTADO DEL MONITOREO HIDROLOGICO EN PARAMOS DE COLOMBIA.....</b>	<b>45</b>
<b>PARTE 2. PROTOCOLO DE MONITOREO HIDROLOGICO .....</b>	<b>50</b>
<b>1. OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROTOCOLO.....</b>	<b>51</b>



<b>2. COMPONENTE ESTRATÉGICO.....</b>	<b>52</b>
2.1 Preguntas a responder con el monitoreo hidrológico en los páramos .....	53
2.2 Propósito del monitoreo hidrológico en ecosistemas de páramo en Colombia .....	54
2.3 Alcance estratégico.....	55
<b>3. COMPONENTES PROGRAMÁTICO Y OPERATIVO .....</b>	<b>57</b>
3.1 Procedimiento general.....	57
3.2 Monitoreo agua atmosférica y superficial, modelos de análisis .....	60
3.3 Monitoreo de flujos y conexiones entre aguas superficiales, sub superficiales y subterráneas. Aporte de la isotopía y la hidroquímica .....	70
3.4 Monitoreo de la calidad del agua en páramos .....	81
3.5 Sistema de observación y medición, formulación del programa de monitoreo hidrológico en un complejo de paramo .....	103
3.6 Gestión de datos información.....	105
<b>4. MÉTODOS, TÉCNICAS Y TECNOLOGÍAS .....</b>	<b>108</b>
4.1 Variables atmosféricas .....	111
4.2 Variables agua superficial .....	125
4.3 Parámetros calidad de agua .....	137
4.4 Flujos e interacciones: agua atmosférica - superficial-subsuperficial y subterránea.....	141
<b>5. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOCOLO. HOJA DE RUTA GENERAL.....</b>	<b>143</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>146</b>

## Lista de figuras o ilustraciones

<b>Figura 1.</b> Sistema Nacional Ambiental.....	13
<b>Figura 2</b> Ciclo hidrológico en páramos.....	16
<b>Figura 3</b> Flujo de la información y el sistema de observación medición y vigilancia del agua.....	19
<b>Figura 4.</b> Flujos de agua subterránea regionales, intermedios y locales.....	25
<b>Figura 5.</b> Calidad ecológica de sistemas acuáticos.....	32
<b>Figura 6.</b> Conceptos base que crean la determinación de la calidad en función del uso posterior.....	33
<b>Figura 7.</b> Resumen de aportes de parámetros hidrobiológicos para suplir las limitaciones físico químicas.....	34
<b>Figura 8.</b> Tipos de bioindicadores usados en Europa según la Directiva Marco del Agua.....	39
<b>Figura 9.</b> Representación gráfica del concepto de "Ecological Quality Ratio".....	41
<b>Figura 10.</b> Procedimiento metodológico para la construcción del Protocolo de Monitoreo Hidrológico en Páramos.....	44
<b>Figura 11</b> Complejos de Páramo en Colombia.....	46
<b>Figura 12.</b> Complejos de Páramo versus la zonificación hidrográfica.....	48
<b>Figura 13.</b> Unidades de análisis y escalamiento del monitoreo hidrológico en los páramos.....	56
<b>Figura 14.</b> Proceso metodológico para monitoreo hidrológico en páramos.....	58
<b>Figura 15.</b> Metodología de trabajo. Adaptado de Camacho (2003).....	62
<b>Figura 16.</b> Esquema de modelamiento de las zonas de páramo.....	67
<b>Figura 17.</b> Proceso metodológico para monitoreo hidroquímico e isotópico en áreas seleccionadas.....	73
<b>Figura 18.</b> Procedimiento para mediciones de isotopía e hidroquímica.....	74
<b>Figura 19.</b> Localización zona de estudio proyecto Mutiscua.....	76
<b>Figura 20.</b> Variación temporal de la composición isotópica de la precipitación.....	77
<b>Figura 21.</b> Línea Meteorica Regional.....	78
<b>Figura 22.</b> Propuesta de hoja de ruta para la implementación del análisis de calidad de agua en los páramos.....	83
<b>Figura 23.</b> Hidro-ecoregiones definidas para Colombia.....	85
<b>Figura 24.</b> Gestión de Datos en Información.....	106
<b>Figura 25.</b> Diferentes formas de pluviómetros normalizados.....	114



<b>Figura 26.</b> Sección transversal de una corriente, en la que figura la posición de los puntos de observación .....	129
<b>Figura 27.</b> Aforo con flotadores .....	131

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Tabla comparativa de parámetros biológicos y fisicoquímicos.....	38
<b>Tabla 2.</b> Estaciones hidrológicas y meteorológicas en Complejos de Paramo .....	47
<b>Tabla 3.</b> Parámetros generales dentro del modelo.....	61
<b>Tabla 4.</b> Variables y frecuencia de monitoreo del componente hidroquímico e isotópico.....	80
<b>Tabla 5.</b> Criterios de selección de la ubicación de las estaciones Tipos de Estación.....	89
<b>Tabla 6.</b> Tipos de comunidades a estudiar en los dos principales tipos de ecosistemas acuáticos.....	92
<b>Tabla 7.</b> Variables recomendadas y mínimas para el monitoreo de calidad de agua en páramos.....	96
<b>Tabla 8.</b> Clasificación de las lluvias en función de la acidez.....	98
<b>Tabla 9.</b> Valores generales de límites entre clases para el índice ICA.....	103
<b>Tabla 10.</b> Exactitud recomendada (nivel de incertidumbre), expresada en el intervalo de confianza del 95 por ciento.....	110
<b>Tabla 11.</b> Condiciones de uso de los métodos de aforo.....	135
<b>Tabla 12.</b> Tipos de equipo para aforo según el método.....	136
<b>Tabla 13.</b> Material mínimo para el monitoreo de variables fisico-químicas.....	137
<b>Tabla 14.</b> Material mínimo para el muestreo de variables hidrobiológicas.....	138
<b>Tabla 15.</b> Material de campo requerido para el monitoreo de las variables mínimas para agua subterránea.....	138
<b>Tabla 16.</b> Materiales de muestreo de agua lluvia.....	139

# RESUMEN EJECUTIVO

Identificada la necesidad de contar con información y conocimiento sobre la hidrología en los ecosistemas de páramo y los servicios ambientales que prestan en relación con sus reconocidas características de regulación, provisión y calidad de agua, el Instituto Humboldt-IAvH como coordinador del Proyecto Páramo Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte adelanta el desarrollo de acciones para fortalecer la gestión y el monitoreo del páramo andino. En este contexto y con el concurso del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM se desarrolló un Protocolo que orienta y da lineamientos estratégicos y programáticos para abordar el monitoreo hidrológico en los Paramos de Colombia, particularmente escaso en estos ecosistemas a pesar su importancia. Con la aplicación del protocolo se espera incrementar el monitoreo, la generación de información y conocimiento sobre los procesos hidrológicos en los páramos, sobre la regulación hídrica, la cantidad y la calidad del agua que proveen estos ecosistemas y las afectaciones de estos servicios debido al uso del suelo y sus formas de manejo. Para este propósito se identifican variables a monitorear que permiten evaluar y hacer seguimiento de la dinámica espacial y temporal y su cuantificación teniendo como base los flujos y procesos característicos del comportamiento del agua en sus componentes atmosférico, superficial y subterráneo. El Protocolo se desarrolla en el marco de las líneas estratégicas del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, basado en protocolos y estándares nacionales e internacionales, orientado en particular a la institucionalidad pública y propone se integre con estrategias y programas de monitoreo existentes (nacional, regional, local). Se espera abordar el monitoreo con diferentes niveles de aproximación, con una estructura que sea funcional e interoperable entre lo nacional, regional y local, articulado a sistemas de información para que los datos estén disponibles para diferentes propósitos. Metodológicamente se plantea la combinación de herramientas y técnicas (sensores remotos, técnicas isotópicas e hidroquímica, bioindicación) modelación y monitoreo convencional (red estaciones) para poder tener cubrimiento de grandes áreas. Finalmente se plantea una hoja de ruta general para avanzar en la implementación de este protocolo inicialmente con su aplicación en un Complejo de Páramo como proyecto piloto para probar la viabilidad de la propuesta.

## I. Antecedentes y justificación

En Colombia se estima que la superficie de páramos alcanza los 29.061 km<sup>2</sup> (2.5% del territorio continental, de esta superficie el 45% se encuentra protegido bajo alguna de las categorías del Sistema Nacional de Áreas Protegidas. En los páramos de Colombia nacen muchos de sus grandes ríos tales como; Magdalena, Cauca, Patía, Meta, Guaviare, Putumayo, Atrato y Ranchería, de los cuales se abastecen acueductos y población de cientos de municipios y veredas del país. Igualmente estos ríos que nacen en los páramos son fuente de agua para sectores como el agropecuario (grandes y medianos distritos de riego) y para grandes hidroeléctricas. Según información del Atlas de Páramos, 400 municipios (36% del total) tienen territorio en los complejos de páramo, diez municipios tienen más del 70% de su área en páramo y 32 más del 50%. En estos 32 municipios viven cerca de 7 millones de habitantes. (Sarmiento, Cadena, Sarmiento, Zapata, & León, 2013).

Los ecosistemas de páramo cumplen importantes funciones naturales y prestan múltiples servicios ecosistémicos relacionados con su capacidad de interceptar, almacenar y regular los flujos hídricos superficiales de las partes altas de las cuencas hidrográficas, favorecer los procesos de recarga de acuíferos e interacción entre los sistemas hídricos subterráneos y superficiales. Adicionalmente, albergan los nacimientos de los ríos, las zonas de recarga de acuíferos e importantes complejos de humedales, lagunas, pantanos, entre otros.

El monitoreo del agua en páramos es muy escaso y se ha identificado que no existen planes específicos para el monitoreo hidrológico en estos ecosistemas que atiendan sus particularidades, los cuales han sido priorizados como ecosistemas estratégicos en la ley, en la política para la gestión integral del recurso hídrico y en el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico como marco que orienta e integra estrategias y acciones para mejorar la generación de conocimiento e información para la gestión integral del recurso hídrico en el ámbito nacional y regional.

El territorio que integra los 36 Complejos de Páramo del país tiene área en 127 de las 316 subzonas hidrográficas y de las cuales solo 37 tienen algún tipo de estación hidrometeorológica y 15 de estas subzonas tienen alguna medición hidrológica. Actualmente solo se cuenta con 200 estaciones activas entre las operadas por IDEAM y otras entidades, concentradas en los páramos de Chingaza, Nevados y Sumapaz.

Adicionalmente, en el proceso de desarrollo del Proyecto Páramo Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte el IAVH identificó que no se conoce como influyen los cambios de uso de suelo en los servicios ecosistémicos de regulación, provisión y calidad hídrica que prestan los páramos lo cual dificulta

la gestión de recursos para financiar estrategias de gestión en el páramo a través del Pago por Servicios Ambientales y sus esquemas de inversión.

En este contexto El Instituto Humboldt en común acuerdo con el IDEAM consideraron importante el desarrollo de un Protocolo que orientara y diera lineamientos desde la perspectiva del agua para el monitoreo hidrológico en páramo como soporte de investigación, gestión y aplicación del Decreto (No 870 mayo 2017) pago por servicios ecosistémicos, en particular los de regulación, provisión y calidad de agua.

## II. Marco de conceptos

Los flujos, procesos y balances hídricos característicos del ciclo del agua y su expresión especial en los ecosistemas de páramo son la base que soporta el monitoreo hidrológico en los páramos. Por tanto es este ciclo el objeto de observación y medición para conocer y hacer seguimiento a las interacciones del agua con el medio natural y con los procesos de intervención antrópica.

Como se expresa en el documento “Definición de criterios hidrológicos e hidrogeológicos para la delimitación de páramos” (García M. , 2010) como aporte al documento general de criterios para la delimitación de páramos publicado, el páramo es un ecosistema donde elementos como la vegetación, el suelo y subsuelo, han desarrollado un gran potencial para interceptar, almacenar y regular el agua; la importancia de este ecosistema radica en fundamentalmente en regular los flujos hídricos superficiales y subterráneos y prestar servicios ambientales principalmente como cuencas abastecedoras de agua para consumo, actividades productivas e hidroenergéticas, así como áreas de influencia de los principales embalses, represas y estrellas hidrográficas” (MAVDT - IAvH, 2010).

Estos ecosistemas de páramo están conformados por sistemas hídricos de interacción de agua atmosférica, superficial y subterránea cuya dinámica determina en gran medida el comportamiento hídrico en el ecosistema y la expresión de las fases del ciclo del agua, incluyendo su estrecha relación con humedales, glaciares y bosques de alta montaña.

El monitoreo se centra en las variables que permiten la representación básica de los procesos, la interpretación de sus dinámicas, la cuantificación y evaluación de sus alteraciones. Los procesos naturales e interacciones que hacen parte del ciclo del agua son muy complejos y es imposible cubrirlos en su integridad teniendo en cuenta su variación continua en el tiempo y en el espacio. Para la representación básica y por ende para el monitoreo y seguimiento del agua es necesario contar con un mínimo de variables y elementos en determinados puntos en el espacio y en el tiempo. Las variables permiten a su vez representar

los procesos como funciones continuas o discretas sobre coordenadas de referencia y construir modelos. Con la valoración de los elementos se logra el conocimiento sobre la naturaleza y es posible el seguimiento y la simulación de sus procesos. Por ello, las variables relacionadas con tales elementos, referenciadas sobre el tiempo y el espacio, son la base del sistema de información, monitoreo y seguimiento del medio natural.

En este contexto el monitoreo del agua es entendido como un sistema continuo de observaciones, de medidas y evaluaciones para cumplir unos propósitos estratégicos definidos en un programa (Sors, 1987).

### III. Objetivos y alcance del protocolo

El propósito del protocolo es orientar el monitoreo desde la perspectiva del agua y el ecosistema, dar lineamientos sobre qué monitorear, cómo y dónde en los ecosistemas de páramo de Colombia con énfasis en agua superficial, subterránea y atmosférica.

El protocolo comprende los componentes estratégico, programático, incluyendo métodos, técnicas y tecnológicas y elementos operativos. *El componente estratégico* se refiere a lo que se debe conocerse del agua en los ecosistemas de páramo, a que se tiene que dar respuesta, el propósito del monitoreo hidrológico y los alcances esperados. *El componente programático* plantea lineamientos para formular el programa de monitoreo para estos ecosistemas especiales en el marco del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico. Este componente trata también sobre métodos, técnicas y tecnologías, incluyendo la combinación de herramientas de modelación, uso de sensores remotos, isotopía e hidroquímica para validar hipótesis y la bioindicación en el tema de calidad de agua. Como complemento para cada temática, se referencian algunos elementos específicos para la programación de mediciones en campo, programación de campañas y mantenimiento evolutivo de los modelos.

Por último el Protocolo incluye una hoja de ruta inicial para avanzar en la implementación y aplicación del protocolo orientada a analizar la viabilidad y sostenibilidad del monitoreo, el rol de las instituciones y el esquema de articulación para operar y generar información y conocimiento sobre el agua en los páramos de Colombia y los servicios ecosistémicos que presta.

### IV. Componentes del protocolo de monitoreo hidrológico en páramo

Las preguntas e intereses identificados abarcan los componentes básicos del ciclo del agua e involucran la necesidad de generar datos e información a varios niveles de resolución espacial y temporal. Esto indica que es necesario definir diferentes niveles de aproximación para generar conocimiento e información de

manera gradual y sistemática que aporte a procesos de planificación, gestión y toma de decisiones sobre el agua en los ecosistemas de páramo.

Con base en los intereses y retos que se enfrentan y las principales preguntas el propósito del monitoreo hidrológico en páramos Colombia, como se concibe en este protocolo, se orienta a conocer, evaluar y hacer seguimiento del estado, composición, dinámica e interacciones de los procesos del ciclo del agua en los páramos-y por ende de los servicios que prestan estos ecosistemas andinos en términos de disponibilidad hídrica, capacidad de regulación y condiciones de calidad del agua.

El monitoreo hidrológico debe generar datos e información que sirvan para varios intereses y objetivos asociados con los procesos hidrológicos característicos de cada uno de los complejos páramo del país, razón por la cual se plantea que tenga un cubrimiento regional con jerarquización para alcanzar los objetivos por fases. Se espera genere insumos para la zonificación ambiental que realizan las autoridades ambientales regionales de Colombia y para el Plan y Programa Nacional de que trata el Decreto 870 de 2017. Igualmente el monitoreo hidrológico debe permitir la construcción de una línea de referencia para el seguimiento de los servicios ambientales que prestan los ecosistemas de páramo y evaluar las afectaciones en la regulación hídrica, la cantidad y calidad de agua por cambios en el uso del suelo en estos ecosistemas. Por último este monitoreo debe ser viable y sostenible en el tiempo.

En este sentido el alcance del protocolo apunta a obtener información para diferentes niveles de aproximación utilizando la observación y mediciones in situ como puntos de relevancia que sirvan además para ajustar otros métodos de obtención de la información y calibrar o validar modelos hidrológicos.

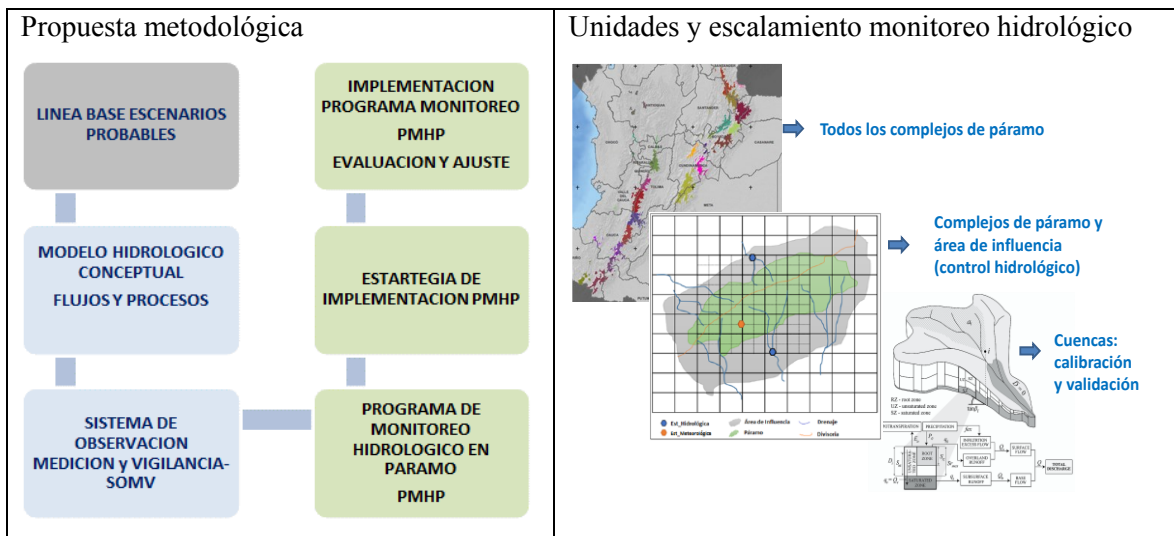
Como parte determinante para dimensionar el monitoreo hidrológico en los páramos se plantea potenciar al máximo el uso de información proveniente de la red de estaciones que ya existe en los complejos de páramo y sus áreas de influencia y que cuentan con series históricas de diferentes longitudes para las variables hidrológica y meteorológicas.

Por otro lado en estos lineamientos se propone el uso de técnicas y tecnologías que ayuden a mejorar el cubrimiento espacial y temporal de la información obtenida a partir de las variables medidas in situ, con la obtención de variables a partir de sensores remotos (de uso libre), la modelación y técnicas de isotopía e hidroquímica. Se espera hacer eficiente y viable la medición in situ a partir de estaciones o puntos de monitoreo continuo.

La isotopía e hidroquímica son particularmente relevantes para mejorar la comprensión de los procesos que ocurren en acuíferos complejos donde la identificación de zonas de recarga y las conexiones entre las aguas superficiales y subterráneas y su variabilidad en el espacio y el tiempo, precisa la utilización de técnicas multidisciplinarias para dar respuestas a interrogantes concretos.

## V. Metodología

El procedimiento general para avanzar en el monitoreo hidrológico en los páramo de Colombia, considera desde unidades de trabajo a la escala de los complejos de ecosistemas de páramo hasta unidades de mayor resolución priorizadas en función de tener un control hidrológico para calibración y validación de modelos. El siguiente esquema sintetiza la propuesta metodológica, así como, las unidades y escalamiento del monitoreo para análisis hidrológico.



La propuesta conforma tres grupos de actividades de las cuales las dos primeras están en función de las unidades de análisis espaciales, resolución de la información y grado de incertidumbre en particular asociados con los proceso de verificación, calibración y validación de los modelos. El tercer grupo tiene relación con la formulación de los programas de monitoreo, así como su estrategia de implementación, evaluación y ajuste.

- Línea base y escenarios probables



*El primer grupo* considera como unidad de análisis los Complejos de páramo, incluyendo áreas de influencia (en función de estaciones de monitoreo hidro-meteorológicas existentes). A partir de las características biofísicas y con variables climatológicas obtenidas por sensores remotos y estaciones en tierra, para verificación, se consigue una primera aproximación de características de los complejos en su conjunto y por complejo. Se obtienen datos de variables principales en toda el área tanto en el páramo como en el área de influencia mediante sensores remotos y estaciones hidro-meteorológicas. Con base en el análisis de las características y criterios definidos en función de los objetivos del monitoreo *se construye una línea base de escenarios probables* y se establecen las unidades hídricas (cuencas) por complejo de páramo. En paralelo, con base en el análisis de las características biofísicas y de variables hidrológicas y meteorológicas, se validan las hidro-ecoregiones preliminares que definió el IDEAM para el establecimiento de estaciones de referencias de monitoreo de calidad de agua.

- Modelo hidrológico conceptual y sistema de observación medición y vigilancia hidrológica -SOMV

*El segundo grupo* considera como unidad de análisis cada complejo de páramo. Para el complejo en estudio se hace análisis de las principales variables (Insumos) para realizar modelación hidrológica y balance hídrico por celda (no menores de 50 km<sup>2</sup>). La modelación hidrológica (en área de páramo y área de influencia definida para el Complejo) se realiza con modelos acoplados los cuales responden cada uno a diferentes variables. Los modelos se calibran y validan donde se cuenta con estaciones de control hidrológico (caudales). Con base en lo anterior *se establece el modelo hidrológico conceptual y balance hídrico para unidades hídricas del área de estudio*.

Con base en los resultados y para mejorar la calibración de los modelos se identifica donde es prioritario hacer análisis de precipitación horizontal, flujos subterráneos y conexiones agua superficial- agua subterránea, esto último con apoyo de técnicas de isotopía e hidroquímica en estas unidades. No se cambian los datos para que calibre el modelo sino se analizan los procesos físicos y la forma de determinar y cuantificar las variables. La aplicación de estas técnicas es parte del sistema de observación y medición que se diseñó para el Complejo de páramo en estudio.

Para cuencas de similares características dentro del mismo Complejo o en otros complejos se deduce que el modelo es aplicable y no se tendría que instalar estaciones de monitoreo nuevas mientras las condiciones no cambien, principalmente de cobertura vegetal y uso del suelo. Para cuencas donde no hay estaciones es necesario incluir puntos de monitoreo dentro del diseño del sistema de monitoreo y el programa de monitoreo.

Con los análisis de las principales variables, balances hídricos y la validación de modelos de algunas unidades hídricas se *diseña el sistema de observación y medición para el complejo* teniendo en cuenta las estaciones existentes y los requerimientos prioritarios de monitoreo de variables en cuencas donde no se cuenta con estaciones. En el análisis se incluye también el de gradiente ambiental para el monitoreo de calidad de agua y la definición de índices.

- Programa de monitoreo hidrológico en páramo – PMHP

*El tercer grupo se relaciona con la formulación de programa de monitoreo hidrológico a corto, mediano y largo plazo* de los componentes atmosférico, superficial y subterráneo (cantidad, calidad, variabilidad). En este programa se tiene como base el diseño del sistema de observación y medición, criterios de operación y mantenimiento y los costos. Para viabilizar el programa se define una estrategia de implementación para el complejo de paramo cuyo proceso inicial se orienta a obtener la línea de referencia para su evaluación y ajuste.

Tanto el sistema de observación y medición como el programa de monitoreo deben ser parte integral de los Programas Institucionales de Monitoreo del Recurso Hídrico de las entidades que tienen esta función misional.

## VI. Métodos y técnicas

El SOMV define la red de estaciones hidrológicas y meteorológicas, variables a medir, ubicación de las estaciones de monitoreo, los métodos y las técnicas apropiadas, según los procesos característicos de cada páramo en particular. Este sistema incluye el diseño de la red (puntos), áreas de observación y medición en función de los objetivos de monitoreo (variables frecuencia, métodos, etc.); así como los mecanismos y protocolos de transmisión; instrumentos y métodos de observación; tratamiento de datos primarios y su ingreso al sistema de información (incluyendo análisis básico y control calidad).

El protocolo incluye métodos y técnicas de medición y observación de las principales variables atmosféricas, de agua superficial, de agua subterránea, de calidad ecológica del agua, así como, de flujos e interacciones a partir de técnicas isotópicas e hidroquímicas. En todos los campos mencionados se referencian publicaciones y documentos nacionales e internacionales que aportan mayor detalle sobre estos métodos técnicas y tecnologías, las direcciones de los sitios web de IDEAM como ente rector de la hidrología y meteorología en el país y de OMM como organismos internacional de Meteorología (tiempo, clima y agua) que fomenta la normalización de las observaciones meteorológicas y conexas, y las

actividades en la esfera de la hidrología operativa. Se referencian igualmente las direcciones de sitios web para imágenes satelitales y modelos hidrológicos de libre acceso que permiten obtener información espacial de diferentes temáticas.

Se hace particular ampliación en los procedimientos metodológicos y aplicación de técnicas de isotopía e hidroquímica en el monitoreo hidrológico, las variables y frecuencia de medición, incluyendo síntesis de casos de aplicación de hidrología isotópica en páramos de Colombia y los sistemas relacionados. Igualmente se enfatiza en la aplicación de técnicas de bioindicación para el monitoreo de la calidad ecológica del agua, frecuencia de monitoreo, tratamiento y análisis de datos.

## VII. Implementación del protocolo. Hoja de ruta general

Para la implementación de este protocolo, complementación y ajustes si es necesario se plantea una hoja de ruta general que se concentra en los siguientes puntos:

- Aplicar el Protocolo de Monitoreo en un Complejo de Páramo como proyecto piloto para analizar la viabilidad de la propuesta, fortalecer el trabajo interinstitucional y evaluar posibles estrategias de implementación. El proyecto estaría liderado entre el IAvH e IDEAM con la participación y alianzas estratégicas con entidades públicas y privadas con competencias en el Complejo que se seleccione.
- Integrar el Protocolo de Monitoreo Hidrológico en Páramos en el desarrollo el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, actualmente en proceso de aprobación y adopción por parte del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS.
- En el marco de la estrategia integral de monitoreo de la alta montaña, en proceso de formulación, actualizar y complementar el estado del arte del monitoreo hidrológico e hidrogeológico en páramos de Colombia, con los estudios e investigaciones desarrollados por las instituciones, universidades, centros de investigación.
- Desarrollar una propuesta de arreglo institucional y operativo orientada a garantizar la sostenibilidad del monitoreo hidrológico en páramos que se enfoque en: la generación de datos, información y conocimiento sobre el agua en los ecosistemas de páramo y sobre los servicios ecosistémicos que prestan, en particular de regulación, provisión y agua de buena calidad.

# INTRODUCCION

El Proyecto Páramo Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte tiene como objetivo contribuir al mantenimiento de la capacidad de regulación hidrológica y la biodiversidad del ecosistema de páramo en áreas clave focalizadas de los andes del norte y fortalecer la capacidad de gestión articulada de las comunidades e instituciones involucradas en el manejo de los páramos para conservar la biodiversidad.

En el marco de este Proyecto el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, adelanta el desarrollo de actividades relacionadas con consolidar un conjunto de recursos para la gestión y el monitoreo del páramo andino.

Dentro del proceso de conformación de la línea base del Proyecto Páramo se reconoce que no es claro cómo influyen los cambios de uso de suelo en los servicios ecosistémicos de regulación, provisión y calidad hídrica que prestan los páramos lo cual dificulta la gestión de recursos para financiar estrategias de gestión en el páramo a través del Pago por Servicios Ambientales y sus esquemas de inversión.

Como parte de la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM formuló el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, actualmente en proceso de revisión por parte del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS para su posterior adopción. Una de las líneas de trabajo del Programa es el mejoramiento del monitoreo del agua en ecosistemas especiales en Colombia (glaciares, páramos, humedales, aguas marinas y costeras) atendiendo a sus particularidades.

El Instituto Humboldt en común acuerdo con el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales consideraron importante el desarrollo de un Protocolo que orientara y diera lineamientos desde la perspectiva del agua para el monitoreo hidrológico en los ecosistemas de páramo.

Los dos Institutos identificaron la necesidad de desarrollar un protocolo que oriente y de lineamientos estratégicos y programáticos para el monitoreo hidrológico en Páramos como soporte de investigación, gestión y aplicación del Decreto (No 870 mayo 2017) pago por servicios ecosistémicos, en particular los de regulación, provisión y calidad de agua.

En este contexto se construyó el documento “Protocolo de Monitoreo Hidrológico en Paramos” siguiendo las directrices del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico en el marco del Proyecto Páramos Biodiversidad y Recurso Hídricos en los Andes Norte.

Este documento de Protocolo se divide en dos partes. La Parte I considera el contexto y la Parte II desarrolla el Protocolo de Monitoreo Hidrológico en sus componentes.

La Parte I consta de cinco capítulos, que dan un contexto y soporte a lo desarrollado en el Protocolo, que cubren: antecedentes, una síntesis del marco normativo e institucional, un marco de conceptos para el monitoreo hidrológico en páramos, el procedimiento metodológico que se siguió para la construcción del Protocolo y un resumen del estado del monitoreo en los páramos de Colombia.

En la parte II del documento se desarrolla el Protocolo en cinco capítulos que comprenden:

Capítulo 1. Objetivos y alcance del Protocolo

Capítulo 2. Componente estratégico que aborda preguntas que se quieren responder, el propósito del monitoreo hidrológico en estos ecosistemas de páramo y plantea un alcance estratégico orientado a identificar diferentes niveles de aproximación para generar conocimiento e información de manera gradual y sistemática que aporte a procesos de planificación, gestión y toma de decisiones sobre el agua en los ecosistemas de páramo.

Capítulo 3. Con base en el propósito y alcance estratégico se desarrollan los componentes programático y operativo del Protocolo. Este capítulo incluye el procedimiento general de la metodología desde los análisis iniciales aplicables en todos los complejos de páramo, hasta los criterios de diseño y principales características del sistema de observación y medición, así como, del programa de monitoreo hidrológico para un complejo de páramo.

Capítulo 4. Por la relevancia en la implementación del Protocolo se desarrolló un capítulo aparte sobre los métodos, técnicas y tecnologías aplicables en el monitoreo hidrológico para variables atmosféricas, de agua superficial y de calidad de agua. Igualmente se presentan las técnicas para el monitoreo de variables asociadas con flujos e interacciones entre agua atmosférica, superficial y subterránea.

Capítulo 5. Implementación del Protocolo. En el marco de lo propuesto y teniendo en cuenta las características del proceso planteado para formular los programas y desarrollar el monitoreo hidrológico en los ecosistemas de páramo se presenta una hoja de ruta inicial orientada a avanzar en la aplicación de la metodología, complementación y ajustes si es necesario.

Es importante reconocer los aportes realizados para el desarrollo del Protocolo en los temas de isotopía e hidroquímica de Ana Karina Campillo, de calidad de agua y bioindicación a Laura García, de modelos de

análisis combinando sensores remotos, modelación hidrológica e información de estaciones hidrometeorológicas a Omar Mercado y análisis de capas espaciales a Omar Jaramillo.

Con estos lineamientos se espera avanzar en un monitoreo hidrológico en páramos que integre el monitoreo que existe y combine herramientas de modelación y técnicas como sensores remotos, isotópica e hidroquímica y bioindicación. De igual manera que su implementación sea de una manera gradual pero sistemática, articulada y coherente a través de estrategias viables y sostenibles.

## SIGLAS

BMWP	Biological Monitoring Working Party
CE	Conductividad Eléctrica
CERA	Proyecto Calidad Ecológica de Ríos Altoandinos
CIRMAG	Centro de Investigación Científica del Río Magdalena
CRNR	Código de Recursos Naturales Renovables
DAMA	Departamento Técnico Administrativo Del Medio Ambiente
DBO5	Demanda Biológica de Oxígeno en 5 días
DIMAR	Dirección General Marítima
DMA	Directiva Marco del Agua – Comisión Europea
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá
EPA	US Environmental Protection Agency
EPM	Empresas Públicas de Medellín
EQR	Ecological Quality Ratio
GIRH	Gestión Integrada del Recurso Hídrico
HER	Hidro-Ecoregiones
IAP	Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico
IAvH	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
ICA	Índice de Calidad del Agua
IDEAM	Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales
IIAP	Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico John Von Neumann
INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible
NH4	Amonio
NO2	Nitritos
NO3	Nitratos

NSF	National Sanitation Foundation
NT	Nitrógeno total
OD	Oxígeno Disuelto
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OMS	Organización Mundial de la Salud
PH	Potencial de Hidrógeno
PMHP	Programa de monitoreo hidrológico en páramo
PNGIRH	Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico
PNMRH	Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico
PNN	Parques Naturales Nacionales
PPA	Proyecto Páramos Andinos
PT	Fósforo total
Q	Caudal
RAS	Reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SINCHI	Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas
SIRH	Sistema de Información del Recurso Hídrico
SOMV	Sistema de Observación Medición y Vigilancia
SS	Sólidos en Suspensión
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos Totales
SZH	Subzona Hidrográfica
T	Temperatura
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
UNAL	Universidad Nacional de Colombia



# PARTE I. CONTEXTO



# 1. ANTECEDENTES

El monitoreo del agua en páramos es muy escaso y se ha identificado que no existen planes específicos para el monitoreo hidrológico en estos ecosistemas, los cuales han sido priorizados como ecosistemas estratégicos en la ley y en la política para la gestión integral del recurso hídrico y como ecosistemas especiales en el El Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico.

Los ecosistemas de páramo cumplen importantes funciones naturales y prestan múltiples servicios ecosistémicos relacionados con su capacidad de interceptar, almacenar y regular los flujos hídricos superficiales de las partes altas de las cuencas hidrográficas, favorecer los procesos de recarga de acuíferos e interacción entre los sistemas hídricos subterráneos y superficiales. Adicionalmente, albergan los nacimientos de los ríos, las zonas de recarga de acuíferos e importantes complejos de humedales, lagunas, pantanos, entre otros.

En Colombia se estima que la superficie de páramos alcanza los 29.061 km<sup>2</sup> (2.5% del territorio continental). Esta cifra obtenida de los estudios y delimitación detallada que adelantó el Instituto Humboldt, escala 1:100.000, como resultado de la actualización del Atlas de Páramos (2012). De esta superficie el 45% se encuentra protegido bajo alguna de las categorías del Sistema Nacional de Áreas Protegidas.

Los Páramos en Colombia, como están considerados en el Atlas, se clasifican en cinco grandes Sectores en trece Distritos y estos en treinta y seis Complejos como un nivel más detallado de los Distritos. En términos hidrográficos la zonificación hidrográfica elaborada por IDEAM comprende cinco grandes Áreas, en un segundo nivel cuarenta y dos Zonas y estas a su vez en treientos dieciséis Subzonas hidrográficas. A nivel hidrogeológico el país se divide en dieciséis Provincias y tiene identificados sesenta y un sistemas acuíferos.

En los páramos de Colombia nacen muchos de sus grandes ríos tales como; Magdalena, Cauca, Patía, Meta, Guaviare, Putumayo, Atrato y Ranchería, de los cuales se abastecen acueductos y población de cientos de municipios y veredas del país. Igualmente estos ríos que nacen en los páramos son fuente de agua para sectores como el agropecuario (grandes y medianos distritos de riego) y para grandes hidroeléctricas.

Según información del Atlas de Páramos, 400 municipios (36% del total) tienen territorio en los complejos de páramo, diez municipios tienen más del 70% de su área en páramo y 32 más del 50%. En estos 32 municipios viven cerca de 7 millones de habitantes. (Sarmiento, Cadena, Sarmiento, Zapata, & León, 2013).

El Proyecto Páramo Biodiversidad y Recursos Hídricos en los Andes del Norte (Contrato IAvH - UNIÓN EUROPEA (2014 -2018) tiene como objetivo “contribuir al mantenimiento de la capacidad de regulación hidrológica y la biodiversidad del ecosistema de páramo en áreas clave focalizadas de los andes del norte y fortalecer la capacidad de gestión articulada de las comunidades e instituciones involucradas en el manejo de los páramos para conservar la biodiversidad”.

El Programa Nacional de monitoreo del Recurso hídrico formulado en 2015 por IDEAM con el apoyo del MADS y en proceso de revisión para la adopción por parte del Ministerio, determina el marco que orienta e integra estrategias y acciones para mejorar la generación de conocimiento e información para la GIRH en el ámbito nacional y regional.

En este contexto el IAVH e IDEAM identificaron la necesidad de desarrollar un protocolo que oriente y de lineamientos estratégicos, programáticos y operativos para el monitoreo hidrológico en Páramos como soporte de investigación, gestión y aplicación del Decreto (No 870 mayo 2017) pago por servicios ecosistémicos, en particular los de regulación, provisión y calidad de agua.

## 2. MARCO NORMATIVO E INSTITUCIONAL

En este capítulo se consideran los aspectos normativos más relevantes que dan soporte al monitoreo hidrológico y las instituciones que tienen por norma la función directa de monitoreo del agua en Colombia.

### 2.1 Marco normativo

Como en el Programa Nacional de Monitoreo, el monitoreo del agua en páramos se sustenta legalmente en el marco jurídico ambiental que se ha desarrollado en Colombia en torno a la protección de los recursos naturales y la regulación de las relaciones hombre naturaleza.

La normatividad ambiental del país es muy amplia y ha tenido importante desarrollo desde el Código Nacional de los Recurso Naturales. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible realizó una compilación de la normatividad ambiental vigente a mayo de 2015 y expidió el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 1076 de 2015. Este decreto incluye todas las normas institucionales y técnicas sobre las cuales se ha soportado la gestión integral del agua desde el Decreto - Ley 2811 de 1974, Código de Recursos Naturales Renovables -CRNR- el cual consolida los

principios fundamentales y se constituye en el principal antecedente de la legislación y normatividad sobre los recursos naturales renovables y la protección al medio ambiente.

La Constitución Política de 1991 contiene aproximadamente sesenta disposiciones que se relacionan directa o indirectamente con el tema ambiental, elevando así el tema ambiental a rango constitucional. Frente a las responsabilidades ambientales asignadas por la Constitución el Estado colombiano se consideró necesario crear un sistema ambiental liderado por un ente de la más alta jerarquía administrativa, que estuviese en capacidad de dar respuesta adecuada tanto a los mandatos de la nueva Carta Política, como a los compromisos internacionales asumidos por el país (IDEAM, 2002).

La Ley 99 de 1993 creó el Ministerio del Medio Ambiente (Art. 2), como ente rector de la gestión ambiental del país, encargado de definir las políticas y regulaciones a las que se debe sujetar la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables y el medio ambiente a fin de asegurar el desarrollo sostenible. Organizó el Sistema Nacional Ambiental -SINA-, bajo la coordinación del Ministerio, conformado por el conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten el desarrollo de los principios y reglas contenidas en esta ley.

Esta Ley contiene los principios generales que rigen la política ambiental colombiana entre los que sobresale la declaración de que los páramos, subpáramos, nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de especial protección, y que en la utilización de los recursos hídricos el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso, Art. 1,4 y 5) (Ponce, 2000).

Unido a lo anterior toda la normatividad relacionada con las instituciones del Sistema Nacional Ambiental junto con las normas técnicas, de planificación, de los sistemas de información e instrumentos económicos se constituyen en los referentes que conforman la base para la formulación del PNMRH.

#### · Monitoreo del agua

Directamente relacionado con el monitoreo del agua y en particular con el Programa Nacional de Monitoreo el Decreto 1640 de 2012 “Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos”, en sus artículos 5, 16 y 17 (Título III) se dictan disposiciones específicas sobre el PNMRH:

*Artículo 5.* “... Los instrumentos que se implementarán para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, son:

Planes Estratégicos, en las Áreas Hidrográficas o Macrocuencas.

Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, en las Zonas Hidrográficas.

Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas, en Subzonas Hidrográficas o su nivel subsiguiente.

Planes de Manejo Ambiental de Microcuencas, en las cuencas de nivel inferior al del nivel subsiguiente de la Subzona Hidrográfica.

Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos”.

*Artículo 16.* Campo de acción, objetivo y definición de competencias.

“El Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico se adelantará a nivel de las Zonas Hidrográficas definidas en el mapa de zonificación ambiental del IDEAM...”

“El programa será implementado por el IDEAM y el -INVEMAR en coordinación con las autoridades ambientales competentes, de conformidad con las funciones establecidas en el Decreto 1323 de 2007 "Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico –SIRH”.

*Artículo 17.* De la Red Regional de Monitoreo del Recurso Hídrico

“La autoridad ambiental competente, implementará en su respectiva jurisdicción la Red Regional de Monitoreo, con el apoyo del IDEAM y el INVEMAR, en el marco del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico.

El MADS con base en los insumos técnicos suministrados por las entidades científicas adscritas y vinculadas adoptará mediante acto administrativo el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico”.

La Ley 1753 de 2015, con la que se adopta el Plan Nacional de Desarrollo 2014 -2018 ordena la formulación y adopción del PNMRH.

- Servicios ecosistémicos

En relación con los servicios ecosistémicos el reciente Decreto 870 de 2017, establece el Pago por Servicios Ambientales y otros incentivos a la conservación, da énfasis en los servicios prestados previamente de los páramos, por lo que se requiere un mayor estudio de estos con el objetivo de poder implementar correctamente esta normatividad. El IAvH ha dado prioridad al mismo y este protocolo tiene como objetivo

principal soportar la generación de datos, información y conocimiento para hacer seguimiento y cuantificación de los servicios ecosistémicos.

- Normas calidad de agua

Se hace alusión a la normatividad sobre la calidad de aguas, las leyes, decretos y similares relacionado con la calidad físico-química y la calidad basada en Bioindicación

La normatividad en relación con los parámetros físico químicos, tiene un enfoque direccionado hacia el uso posterior de las aguas y una determinación de los parámetros físico-químicos a analizar para el consumo humano, pero no se observan límites admisibles de variables indicadoras de contaminación en función de la calidad ecológica de los cuerpos acuáticos. Las autoridades ambientales deben determinar sus límites de calidad según el Decreto 3930 de 2010.

Tras una revisión de la normativa medioambiental no hay leyes, decretos o similares en relación a la bioindicación. La única norma que establece la obligatoriedad del uso de los bioindicadores para la determinación de la calidad de las aguas es la Ley 2811 de 1974: la cual sienta el precedente de la Bioindicación en Colombia al determinar que el Estado debe “Promover y fomentar la investigación y el análisis permanente de las aguas interiores y de las marinas, para asegurar la preservación de los ciclos biológicos y el normal desarrollo de las especies, y para mantener la capacidad oxigenante y reguladora del clima continental” (artículo 174). Por tanto existe una necesidad inminente de crear un marco normativo de calidad de las aguas que involucre la bioindicación que fortalezca al uso y establecimiento de dicha herramienta.

*En relación con normas asociadas con la calidad del agua en páramos* no se encuentra norma que haga referencia específica a los ecosistemas de páramos, por lo que se deberá extrapolar la normatividad nacional de cuerpos de aguas superficiales. Como se puede observar, la legislación per se existente usa los parámetros físico-químicos y microbiológicos para la determinación de la calidad del agua, pero no tiene en cuenta las comunidades hidrobiológicas, mientras que los documentos técnicos emitidos por el IDEAM comienzan a contemplar su uso.

Igualmente cabe señalar que las Corporaciones Autónomas Regionales deben determinar los límites u objetivos de calidad a corto, medio y largo plazo en sus respectivas jurisdicciones (Decreto 3930 de 2010), por lo que las autoridades ambientales cuyo territorio de control incluya ecosistemas de páramos, deben contar con estudios y monitoreo para determinar dichos límites de calidad.

En general, las normas, decretos y leyes existentes sobre calidad de aguas subterráneas son relacionados con los vertimientos a las mismas, la cantidad y las concesiones (ej. Decreto 3930 de 2010 y Ley 373 de 1997).

Cabe señalar la Resolución N° 250 de 1997 de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá en la que se obliga a la determinación anual de los niveles estáticos y dinámicos y el monitoreo fisicoquímicos de las aguas subterráneas, cuyo artículo 4 indica que “Los usuarios de aguas subterráneas deberán enviar anualmente al D.A.M.A., información sobre el estado de los niveles estáticos y dinámicos en el sitio de extracción así como las características físico - químicas del agua. Los parámetros físico-químicos y biológicos solicitados incluyen como mínimo: Temperatura, PH, Dureza, Alcalinidad, Sólidos Suspendidos, Hierro Total, Fosfatos, Coliformes, Salinidad, Amoníaco, Conductividad, Aceites y Grasas, DBO, Oxígeno Disuelto”. Esta es la única normatividad encontrada donde se especifiquen parámetros mínimos físico-químicos y biológicos a medir para determinar el estado de las aguas subterráneas.

Se podría decir que no existe normatividad específica para la calidad de aguas subterráneas, debido a que se aplica la misma que para las aguas superficiales. Esto es cierto hasta cierto punto como en el caso de las aguas destinadas para consumo humano, las cuales deben tener las mismas condiciones físico-químicas y biológicas provengan de aguas subterráneas o de aguas superficiales. Pero en el caso de la calidad ecológica, la cual se ha medido ampliamente en aguas superficiales mediante parámetros físico-químicos, no puede ser determinada de la misma forma en el caso de las aguas subterráneas por la diferente naturaleza de la misma.

## 2.2 Marco institucional

En la Ley 99 de 1993 se distribuyen las competencias ambientales relacionadas con las aguas que están a cargo del Ministerio-MADS, de las Autoridades Ambientales Regionales (Corporaciones Autónomas Regionales -CAR-, Autoridades Ambientales Urbanas y Parques Naturales Nacionales), principales administradoras del recurso hídrico. En el esquema del Sistema Nacional Ambiental (Figura 1) se resalta la institucionalidad que por norma tiene directa relación con el monitoreo del agua continental y marino costera, en el ámbito nacional y regional. El MADS es responsable de la PNGIRH y por ende del liderazgo de los programas del Plan Hídrico Nacional y de manera particular del PNMRH.





**Figura 1.** Sistema Nacional Ambiental

En el ámbito nacional el monitoreo de los recursos hídricos está a cargo del IDEAM en la parte continental, y del INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras) en la franja marino costera con aportes de los institutos de investigación: SINCHI Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, IAP (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico) y el Instituto Humboldt en las jurisdicciones y áreas específicas de competencia. La DIMAR (Dirección General Marítima) en territorio marítimo colombiano cuenta con un sistema de medición para obtener en tiempo real datos relacionados con condiciones oceánicas y atmosféricas que dispone en su Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina -SMPOMM-. En el ámbito regional la competencia es atribuida a las autoridades ambientales: Corporaciones Autónomas Regionales, Unidades Ambientales Urbanas y la Unidad Administrativa de Parques Naturales Nacionales en sus respectivas jurisdicciones (Artículo 17 del Decreto 1640).



## 3. MARCO DE CONCEPTOS PARA EL MONITOREO HIDROLOGICO EN PARAMOS

Con base en los documentos de conceptualización y estado del arte del monitoreo hidrológico en los páramos y el análisis de la literatura tanto nacional e internacional se presentan los elementos conceptuales que dan soporte a la guía y propuesta de protocolo de monitoreo hidrológico en los páramos.

14

### 3.1 Referentes de contexto

Como referentes iniciales se considera, con una mirada desde el agua, el modelo conceptual socio ecológico e integridad ecológica utilizado en la delimitación de los páramos, documento *“Definición de criterios para la delimitación de los diferentes tipos de páramos del país y de lineamientos para evitar efectos adversos sobre su integridad ecológica”* (MAVDT - IAvH, 2010) y el enfoque conceptual del *“Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico”* (IDEAM - MADS, 2016), en proceso de adopción por parte del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

En ambos enfoques el ciclo del agua, sus procesos, flujos y balances hídricos son el marco teórico de referencia para el monitoreo hidrológico. El PNMRH además del ciclo del agua incluye el enfoque de gestión integrada del recurso hídrico, concepto básico adoptado en la Política de GIRH (MADS 2010).

El propósito de mejorar la cobertura y generación de conocimiento e información para la gestión integral del recurso hídrico en el ámbito nacional y regional no es viable si no se garantizan las fases del flujo de la información desde el diseño del monitoreo en el marco del Sistema de Observación, Medición y Vigilancia hasta la difusión de la información a la comunidad.

El ecosistema de Páramo reúne características climáticas, hidrológicas, de flora y faunas únicas a nivel mundial, por tal motivo es necesario entender su funcionamiento y establecer un monitoreo que permita su conservación.

Los conceptos para este protocolo de monitoreo hidrológico de páramos se sustentan en lo característico del comportamiento hídrico en estos ecosistemas (flujos y procesos). Se identifican los parámetros y variables básicas que determinan la dinámica, la variabilidad espacial y temporal del agua en los páramos.

Estas características y el concepto de balance hídrico (de masas) permiten la cuantificación de las variables en unidades espaciales y temporales de análisis, base para generar información y conocimiento sobre los servicios ambientales (hidrológico) del ecosistema de páramo y hacer el seguimiento.

Las características y el comportamiento de estas variables determinan los principales servicios ambientales (hidrológico) del ecosistema de páramo, el área a considerar, incluyendo la influencia de los glaciares, la dinámica del flujo regional de agua subterránea y la relación con el bosque alto andino, entre otros. A partir del balance hídrico en los complejos de páramo y en las cuencas de su área de influencia se cuantifican estos servicios, su dinámica y seguimiento a sus cambios por influencia de actividades antrópicas, variabilidad y cambio climático.

Esta orientación inicial sirvió de base para el análisis de la bibliografía nacional e internacional, con énfasis en las investigaciones y publicaciones recientes, el cual se presenta en el documento en el ítem estado *de conocimiento e información sobre el agua en páramo*. El análisis del estado de conocimiento se centra principalmente en los avances en información e investigación sobre los temas relacionados con: ciclo del agua en los páramos, variables clave y características, servicios ecosistémicos y tipología de los páramos diferentes conceptos y en particular desde lo hídrico.

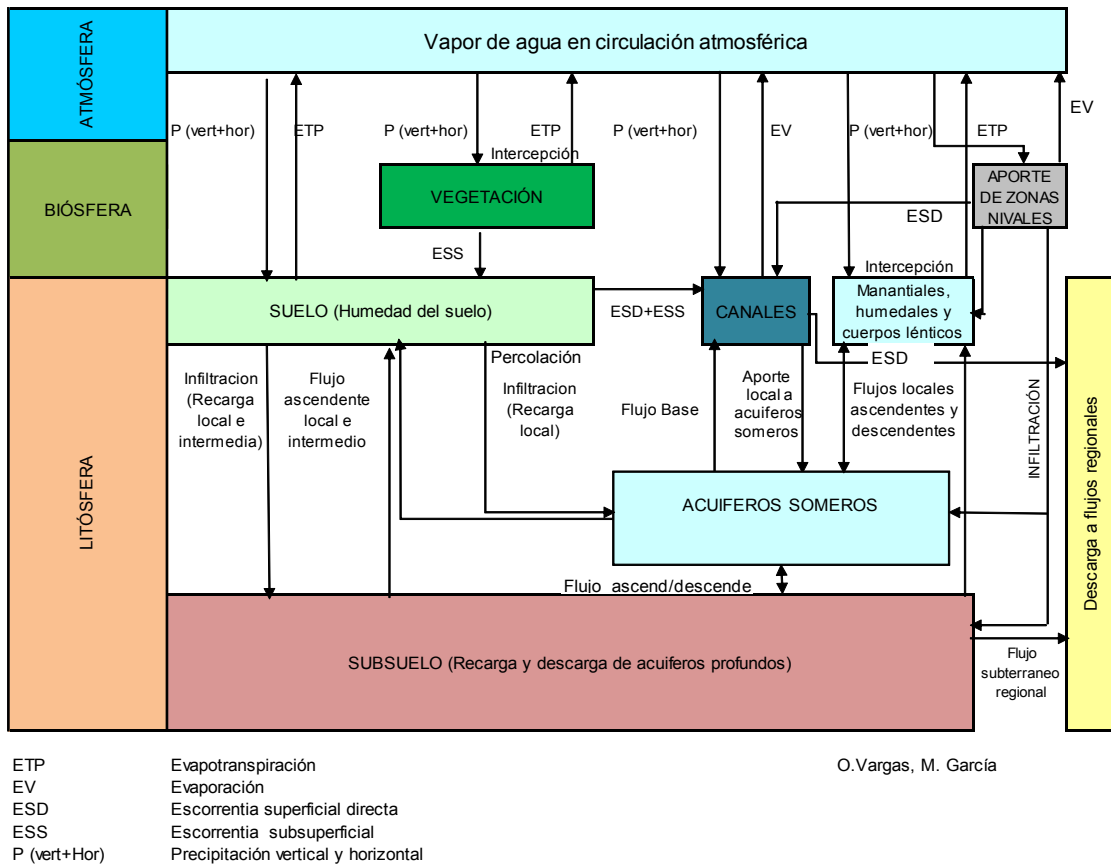
### 3.1.1 Criterios hidrológicos e hidrogeológicos para delimitación de páramos

Se toma como referente el documento “Definición de criterios hidrológicos e hidrogeológicos para la delimitación de páramos” (García M. , 2010) que aportó al documento general de criterios para la delimitación de páramos publicado (MAVDT - IAvH, 2010) y en (Rivera, Rodríguez, & MAVDT -IAvH, Guía divulgativa de criterios para la delimitación de los páramos de Colombia, 2011). En este documento se resalta que “El páramo es un ecosistema donde elementos como la vegetación, el suelo y subsuelo, han desarrollado un gran potencial para interceptar, almacenar y regular el agua; la importancia de este ecosistema radica fundamentalmente en su capacidad para interceptar y almacenar agua, y regular los flujos hídricos superficiales y subterráneos y prestar servicios ambientales principalmente como cuencas abastecedoras de agua para consumo, actividades productivas e hidroenergéticas, así como áreas de influencia de los principales embalses, represas y estrellas hidrográficas.”

Se aborda desde tres aspectos: ciclo del agua en el páramo; papel de los humedales en la dinámica, comportamiento y servicios ambientales; y flujos de agua subterránea. En este sentido, se considera que el monitoreo desde el punto de vista hidrológico, debe apuntar a generar insumos para evaluar los procesos

que gobiernan la regulación hídrica y la oferta del agua (superficial y subterránea) en el Páramo y sus ecosistemas asociados.

En este contexto en el documento se presenta un esquema con un modelo del *ciclo hidrológico en los páramos* que incluye las características especiales que determinan su dinámica. La Figura 2 muestra las principales variables y procesos del ciclo hidrológico en páramos en relación con la dinámica y estado del agua. El esquema ilustra sobre las relaciones entre los diferentes componentes del ciclo hidrológico en los páramos.



Fuente: (García M. , 2010)

Figura 2 Ciclo hidrológico en páramos.

Este esquema atiende a particularidades en el comportamiento de las variables hidroclimáticas como componente hidrológico e hidrogeológico para la delimitación de los páramos y en la publicación que

integra los criterios de todos los componentes. (García M. , 2010) (MAVDT - IAvH, 2010). Se enfatiza igualmente en el papel de los humedales en la dinámica y comportamiento del agua, en las características de los flujos de agua subterránea y sus relaciones con el agua superficial.

Estos conceptos se asumen para el modelo integral que se presenta como soporte conceptual para el monitoreo hidrológico y construcción del protocolo.

### 3.1.2 Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico

Uno de los objetivos en la construcción del protocolo de monitoreo hidrológico en páramos es que esté enmarcado dentro del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, uno de los once Programas que hacen parte de la Política para la Gestión integral del Recurso Hídrico.

Este Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, en proceso de adopción en el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS, se estructura sobre tres aspectos conceptuales básicos: a) el ciclo del agua, sus procesos y balances hídricos; b) el enfoque de gestión integral del recurso hídrico adoptado en la Política y; c) el de garantizar el flujo de la información. Se parte de la necesidad de mejorar la información y conocimiento sobre el agua en los ámbitos nacional y regional (en relación con su estado y dinámica, cuantificación, distribución espacial y temporal) para dar soporte a los procesos de evaluación, planificación y gestión ambiental, sectorial y del desarrollo, además que permita la validación de modelos que representen los procesos e interacciones del agua con el medio natural y las intervenciones antrópicas (MADS -IDEAM, 2016).

El soporte de una gestión integral del agua está dado por el conocimiento, cuantificación, análisis y seguimiento de los procesos e interacciones en los sistemas hídricos.

El modelo conceptual que soporta la generación de información para la gestión integral del agua tiene como base una visión sistémica de los ciclos y procesos de la naturaleza, de sus manifestaciones y relaciones, considerando el agua como elemento del medio natural y como recurso.

El seguimiento y monitoreo de la dinámica, composición y estado del agua en cada una de las fases que forman parte de estos procesos e interacciones son determinantes para que ésta gestión sea cada vez más eficiente y eficaz y esté orientada a alcanzar la sostenibilidad de los ecosistemas, del recurso hídrico y de las actividades sociales y económicas que de él dependen. (IDEAM, 2006). Este modelo se constituye en la base para representar y hacer seguimiento soportado en un monitoreo de procesos y variables (asociadas con la dinámica, cantidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas; la variación de los niveles y

calidad de aguas marino costeras; la dinámica y cuantificación de los sedimentos, ecosistemas acuáticos especiales) se constituyen en la base de soporte del monitoreo del agua y del recurso hídrico sobre la cual se formula el PNMRH. (MADS -IDEAM, 2016).

Los procesos naturales e interacciones que hacen parte del ciclo del agua son muy complejos y es imposible cubrirlos en su integridad teniendo en cuenta su variación continua en el tiempo y en el espacio. Para la representación básica y por ende para el monitoreo y seguimiento del agua es necesario contar con un mínimo de variables y elementos en determinados puntos en el espacio y en el tiempo. Elementos que sirven como indicadores básicos de aquella característica o propiedad física, química o biológica, con la cual es posible juzgar sobre el estado, composición del agua y dinámica de los procesos que hacen parte de la hidrosfera, y a partir de observaciones y mediciones en el tiempo y espacio se da una valoración cuantitativa de estos elementos lo cual se conoce como variables (IDEAM, Pabón y Garcia, 1996).

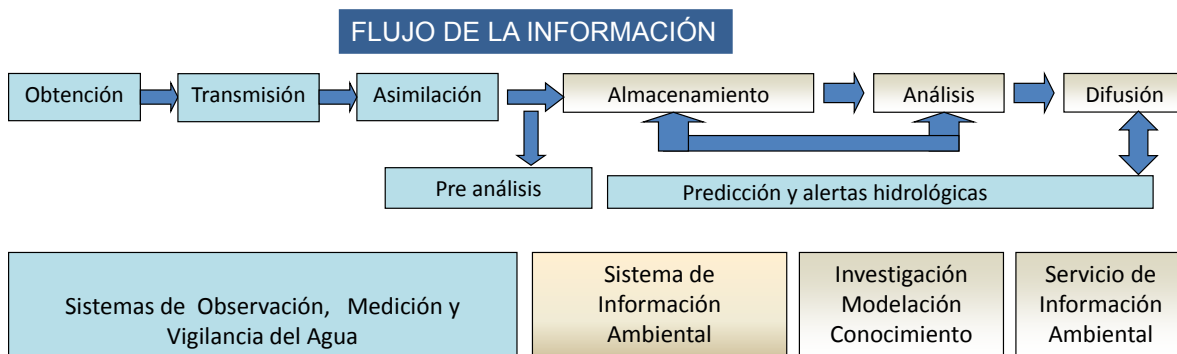
Estos elementos y variables junto con los que determinan la dinámica de uso y aprovechamiento del agua que intervienen y alteran los procesos y el estado del agua, permiten evaluar en alguna medida las condiciones de cantidad - calidad, oferta - demanda de agua tanto superficial como subterránea, alimentar los indicadores mínimos ambientales, de gestión y desarrollo sostenibles definidos para el seguimiento del recurso hídrico.

Las variables permiten a su vez representar los procesos como funciones continuas o discretas sobre coordenadas de referencia y construir modelos. Con la valoración de los elementos se logra el conocimiento sobre la naturaleza y es posible el seguimiento y la simulación de sus procesos. Por ello, las variables relacionadas con tales elementos, referenciadas sobre el tiempo y el espacio, son la base del sistema de información, monitoreo y seguimiento del medio natural.

El monitoreo se centra en las variables que permiten la representación básica de los procesos, la interpretación de sus dinámicas, la cuantificación y evaluación de sus alteraciones. Igualmente, las variables permiten generar los indicadores mínimos necesarios para el seguimiento y toma de decisiones en los ámbitos nacional y regional (MADS -IDEAM, 2016).

En este contexto el monitoreo del agua es entendido como un sistema continuo de observaciones, de medidas y evaluaciones para cumplir unos propósitos estratégicos definidos en un programa (Modificado de Sors, 1987) (Sors, 1987).

El esquema de la Figura 3 muestra las diferentes fases que deben surtir para que de una forma sistemática, coherente y articulada se garanticen este flujo y como resultado se tengan acceso a información sobre el agua de manera oportuna y de calidad para la toma de decisiones (MADS -IDEAM, 2016).



**Fuente:** Programa Nacional de Monitoreo (MADS -IDEAM, 2016)

**Figura 3** Flujo de la información y el sistema de observación medición y vigilancia del agua

El flujo completo comprende los procesos relacionados con: a) el Sistema de Observación, Medición y Vigilancia; b) el Sistema de Información Ambiental; c) la fase de análisis, modelación e investigación como soporte de la generación de información, conocimiento, indicadores y productos y d) difusión a través del servicio de información a la comunidad. El PNMRH se centra en los dos primeros, incluyendo el monitoreo asociado con los sistemas de alerta temprana y predicciones hidrológicas (MADS -IDEAM, 2016).

El Sistema de Observación, Medición y Vigilancia ambiental, componente agua, comprende las mediciones in situ en determinado punto del espacio y del tiempo, y se considera como el medio esencial sobre el cual se basan los demás métodos de obtención de la información lo cual resalta la importancia de la red de estaciones hidrológicas y meteorológicas y ambientales relacionadas con el agua (IDEAM, 2006). La otra forma de obtener información es a partir de observaciones por área o por volumen realizadas a partir de sensores remotos.

En este sentido el Sistema de Observación, Medición y Vigilancia comprende, entre otros, el diseño de la red (puntos), áreas de observación y medición en función de los objetivos de monitoreo (variables frecuencia, métodos, etc.); así como los mecanismos y protocolos de transmisión; instrumentos y métodos de observación; tratamiento de datos primarios y su ingreso al sistema de información (incluyendo análisis básico y control calidad).

Una red hidrometeorológica es definida como un conjunto de estaciones en las cuales se hacen observaciones sobre variables hidrometeorológicas como función del tiempo, y son un medio para obtener información que soporte la toma de decisiones en lo concerniente a la administración y manejo de los recursos (DNP, 2012).

El Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico considera dentro de sus líneas de trabajo “el mejoramiento del monitoreo del agua en ecosistemas especiales en Colombia, (glaciares, páramos, humedales, aguas marinas y costeras), atendiendo a sus particularidades” (MADS -IDEAM, 2016).

### 3.2 Ciclo del agua en los páramos. procesos y características

Existen múltiples definiciones sobre el concepto de ecosistema de páramo lo cual se hace explícito en (Hofstede & et. al., 2014) con “El concepto de páramo incorpora múltiples elementos, factores, límites, zonificaciones, herencias, perturbaciones, migraciones, biomas, fisionomías, estructuras, funcionamiento, evolución y configuraciones, y por esto ninguna definición es perfecta”.

Este mismo estudio plantea que la definición más amplia y también la más práctica para aplicar a la mayoría de los lugares que se consideran páramo es: “un ecosistema húmedo tropical zonal, caracterizado por una vegetación dominada por vegetación herbácea y arbustiva, y ubicada predominantemente a partir del límite superior del bosque” (Cuatrecasas 1958, Monasterio & Molinillo 2003, Rangel 2000), citados en (Hofstede & et. al., 2014).

Lo que es claro también es que estos ecosistemas están conformados por sistemas hídricos de interacción de agua atmosférica, superficial y subterránea cuya dinámica determina en gran medida el comportamiento hídrico en el ecosistema y la expresión de las fases del ciclo del agua, incluyendo su estrecha relación con humedales, glaciares y bosques de alta montaña.

Como complemento a lo expuesto en el punto 3.1 de este protocolo con respecto al ciclo del agua en los páramos en el documento “*Páramos ¿Que sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*”, (Hofstede & et. al., 2014) se describe el estado del arte en materia de páramos a nivel regional, dándole especial atención a los efectos del cambio climático. Presenta un análisis de la producción de conocimiento científico sobre el socio – ecosistema del páramo a nivel regional, utilizando múltiples fuentes bibliográficas, analizando también la información.

Basado en una revisión y análisis de la literatura se cuenta con una visión general del avance en el conocimiento del páramo, se indican los temas, áreas y disciplinas que han sido cubiertos, pero también

cuales son los vacíos en temas y áreas geográficas. Igualmente, basado en este análisis, se hacen recomendaciones para desarrollos futuros de investigación (Ibid.).

En relación con la hidrología se resalta el valor del ecosistema de páramo como proveedor de agua de los Andes de Venezuela, Colombia y Ecuador. Se referencia y se presenta información sobre la gran dependencia de los sistemas de riego, hidroenergía, abastecimiento doméstico, entre otros, del agua proveniente de los páramos y de su servicio de regulación para estos países, y también en Costa Rica, Panamá y Perú (Ibid.).

Según el artículo sobre el estudio del ciclo del agua a través de los átomos “El ciclo hidrológico ha sido estudiado sistemáticamente desde mediados del siglo XIX. A pesar de los avances que se han logrado, todavía existen dificultades para cuantificar de manera precisa cada uno de los procesos” (Massone, Martínez, & Quiroz, Estudio del ciclo del agua a través de los átomos, 2014).

El ecosistema de Páramo reúne características climáticas, hidrológicas, de flora y faunas únicas a nivel mundial, por tal motivo es necesario entender su funcionamiento y establecer un monitoreo que permita su conservación.

Teniendo en cuenta lo anterior, el monitoreo desde el punto de vista hidrológico, debe apuntar a generar insumos para evaluar los procesos que gobiernan la regulación hídrica y la oferta del agua (superficial y subterránea) en el Páramo y sus ecosistemas asociados.

En este sentido la hidrología isotópica e hidroquímica constituyen herramientas indispensables para estudiar estos procesos. Gracias a la utilización de trazadores como los isótopos estables del agua, la conductividad eléctrica y las concentraciones del ión cloruro (Cl<sup>-</sup>), es posible precisar los aportes y conexiones entre las aguas superficiales y subterráneas, los aportes y procesos que ocurren en las épocas de sequía. Por lo tanto, estas mediciones, acompañadas del monitoreo hidrológico convencional, pueden mejorar el conocimiento sobre la regulación hídrica y la generación de oferta en una cuenca determinada.



A pesar de la importancia del agua en estos ecosistemas no se ha considerado una clasificación a partir de su hidrología<sup>1</sup>, aunque el ciclo del agua y sus procesos hidrológicos se expresan de manera diferente en los Páramos en función de su interacción con el medio natural (físico, químico y biológico) y la interrelación con la actividad antrópica. El conocimiento e investigación sobre el comportamiento del agua en la alta montaña y el Páramo en particular es limitado, aunque en la última década se han incrementado las investigaciones.

En general en la documentación los páramos se analizan desde tipologías biofísicas desde el clima, la biogeografía y de suelos pero no se profundiza en tipologías asociadas con el agua (hidrología e hidrogeología).

La propuesta de tipología socioecológica de los páramos de Colombia que guía los criterios para la delimitación de páramos revisó el estado del arte de tipologías de páramo desde: a) lo biofísico (climática, biogeográfica, vegetación y suelos); b) desarrollo desde la perspectiva sociocultural y desde la teoría del disturbio (MAVDT - IAvH, 2010).

En esta propuesta a partir de variables de clima, regímenes de propiedad, patrón de asentamientos, tenencia de la tierra, entre otras, plantea una tipología socioecológica. Sin embargo las variables hidrológicas e hidrogeológicas no fueron consideradas explícitamente en las 43 tipológicas según la tabla 3 del anexo 1 del documento sobre criterios para la delimitación de páramos (MAVDT - IAvH, 2010).

### 3.2.1 Variables y sus características

Como ha sido ampliamente documentado y se reitera en el análisis sobre que sabemos del páramo (Hofstede & et. al., 2014) los sistemas hidrológicos de alta montaña en los páramos están determinados por las condiciones climáticas propias de estas zonas: precipitación de moderada a alta y frecuente, alta humedad

---

<sup>1</sup> De acuerdo con el Glosario Hidrológico Internacional, 2007. “Hidrología es la ciencia que estudia las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, y su aparición, circulación y distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, sus propiedades biológicas, químicas y físicas, sus reacciones con el entorno, incluyendo su relación con los seres vivos. Igualmente “la ciencia que estudia los procesos que rigen el agotamiento y recarga de los recursos hídricos continentales, y que trata las diversas fases del ciclo hidrológico “

relativa del aire y baja evapotranspiración. Aparte del clima, son las condiciones edáficas las que explican la alta capacidad de regulación hídrica del páramo.

Otros factores que determinan las características de los procesos hidrológicos en los páramos están asociados a: la presencia de niebla, baja radiación solar, vientos fuertes, baja variabilidad de la temperatura media y alta variabilidad durante día, menores pérdidas por interceptación comparado con los bosques y alta humedad del suelo.

Estos factores característicos de los ecosistemas de páramo determinan en gran medida la capacidad de regulación hídrica y de almacenamiento de agua que a su vez influye en tener un flujo base sostenido de las corrientes que nacen en los páramos que soportan épocas de sequía, capacidad de purificar el agua y de retener nutrientes y sedimentos lo cual controla la erosión.

Sin embargo, en relación con la alta retención de agua en el suelo hay autores que consideran que esta alta retención no contribuye significativamente al ciclo del agua en el páramo debido a “que la alta retención de agua a  $-1500$  kPa indica un predominio de los microporos en el suelo y presencia de un gran reservorio de agua inactiva” Hidrología de Paramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad (W Buytart et., 2006).

En los estudios sobre lo que se conoce del impacto del cambio climático en los páramos hay consenso en que “la estacional pluvial es más pronunciada, mayor intensidad de precipitación en época de lluvia y épocas de estiaje más prolongadas”, con mucha variabilidad a nivel local, pero con poca claridad sobre el total de la precipitación. También hay consenso sobre “aumento de la base de las nubes y la menor ocurrencia de neblina en páramos” y sobre el descongelamiento de los glaciares con importantes implicaciones para los caudales de quebradas y ríos. La principal conclusión de la discusión presentada en el documento (Hofstede & et. al., 2014) sobre el impacto del cambio es la mucha incertidumbre sobre la hidrología en los Andes.

### 3.2.2 Dinámica, flujos y procesos agua atmosférica -superficial – subterránea

El esquema que ilustra sobre las relaciones entre los diferentes componentes del ciclo hidrológico en los páramos se presenta en la Figura 2.

Este esquema atiende a particularidades en el comportamiento de las variables hidroclimáticas, el cual se elaboró para el componente hidrológico e hidrogeológico para la delimitación de los páramos y en la publicación que integra los criterios de todos los componentes (García M. , 2010) (MAVDT - IAvH, 2010).

En este documento se resalta el *papel de los humedales en la dinámica y comportamiento del agua en los páramos y en los servicios ambientales* que se prestan desde estos ecosistemas como parte determinante en el ciclo del agua que en sus muy diversas formas, tamaños y características revisten una importancia decisiva en las funciones de regular la cantidad, calidad y seguridad del agua como recurso a medida que pasan por sus diferentes estados a través del ciclo en Lineamientos acerca del agua (RAMSAR, 2007).

En su mayoría, los humedales de páramo son sistemas o complejos esenciales para la dinámica de microcuencas de la alta montaña y de los grandes sistemas hidrográficos del país: cuencas de los ríos Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas, los que drenan al océano Pacífico y al mar Caribe.

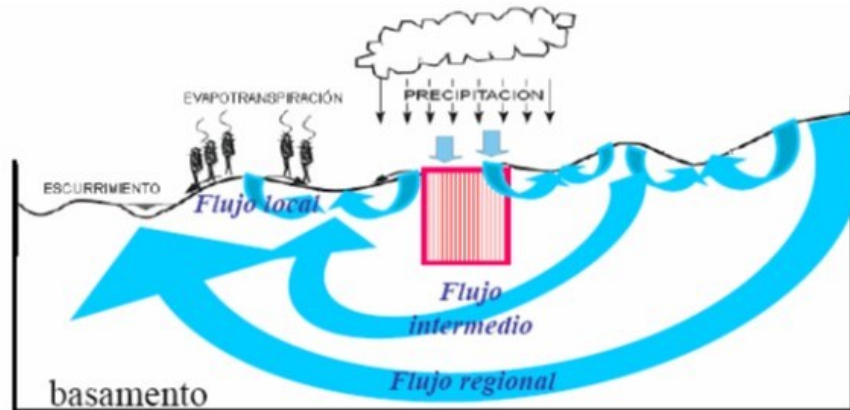
Se reconoce en el documento (García M. , 2010) que” muchos humedales en ecosistemas de páramo están estrechamente asociados con las aguas subterráneas, ya sea que dependen de los caudales procedentes del acuífero o son fuente de recarga de los acuíferos. Por tanto el conocimiento sobre los vínculos hidrológicos entre los humedales y flujos subterráneos en los ecosistemas de páramo es particularmente relevante para determinar los impactos en las funciones hidrológicas y beneficios que prestan los ecosistemas de páramo”.

*Flujos de agua subterránea.* Como se expresa en el marco conceptual para los criterios hidrogeológicos de delimitación de páramos lo que menos se ha documentado es el papel de los páramos en la recarga de acuíferos y las condiciones de descarga natural a través de manantiales, humedales, lagos y lagunas. En este sentido, juega un importante papel el concepto de sistemas de flujo que a futuro debe ser estudiado en los páramos para entender su dinámica hidrológica (García M. , 2010), (MAVDT - IAvH, 2010) .

Se ha reconocido en los páramos alta capacidad de infiltración y altas conductividades eléctricas asociadas a sistemas de flujo regionales, intermedio y locales, que pueden ser identificados con análisis hidroquímico e isotopía para resolver hipótesis sobre direcciones de flujo y determinación de zonas de recarga, tránsito y descarga. Este enfoque permitirá reconocer que el aporte de los páramos a la escorrentía aguas abajo corresponde al agua que discurre por los canales de drenaje y al agua de recarga que se reconoce en los hidrogramas aguas abajo como caudal base (García M. , 2010). El origen de estos caudales base aguas abajo bien podría proceder de recarga en los páramos por flujos regionales o por los flujos intermedios de agua subterránea responsables de procesos de remoción en masa en territorios donde se han alterado por acción antrópica las condiciones naturales del páramo.

Los flujos locales e intermedios están asociados a la permanencia de humedales y manantiales. La distribución de estos cuerpos de agua está determinada por la topografía, la geomorfología y la geología de

los páramos. Estos flujos subterráneos deben ser entendidos para definir estrategias de manejo y preservación del ecosistema (Carrillo, Cardona, & Huizar, 2007).



**Fuente:** (Toth, 1963 en Carrillo, Cardona, Huizar. 2007).

**Figura 4.** Flujos de agua subterránea regionales, intermedios y locales

### 3.2.2.1 Isotopia en el ciclo del agua

Teniendo en cuenta lo mencionado en puntos anteriores sobre el ciclo del agua y sus procesos en ecosistemas de páramo la hidrología isotópica e hidroquímica constituyen unas herramientas pertinentes para estudiar estos procesos. Gracias a la utilización de trazadores como los isótopos estables del agua, la conductividad eléctrica y las concentraciones del ión cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), es posible precisar los aportes y conexiones entre las aguas superficiales y subterráneas, los aportes y procesos que ocurren en las épocas de sequía. Por lo tanto, estas mediciones, acompañadas del monitoreo hidrológico convencional, pueden mejorar el conocimiento sobre la regulación hídrica y la generación de oferta en una cuenca determinada.

La dificultad de la aplicación de estas técnicas corresponde a la ausencia de modelos hidrológicos e hidrogeológicos que de manera conjunta expliquen el comportamiento del ciclo hidrológico, el desconocimiento de técnicas de muestreo y el costo económico de los análisis isotópicos. Sin embargo, es pertinente insistir sobre su utilidad para la toma adecuada de decisiones en las autoridades ambientales responsables de elaborar los planes de manejo de páramos.

En este aparte se presentan los resultados de la revisión bibliográfica consultada sobre los temas citados anteriormente para generar bases y plantear el enfoque del monitoreo en el ecosistema de Páramo. El

documento ha sido construido a partir de información secundaria, de la cual se resalta el texto “Isótopos ambientales en ciclo hidrológico: Principios y Aplicaciones” producido por la Agencia Internacional de Energía Atómica y editado por Mook, W.G en el año 2002. (OIEA, SF).

“La hidrología isotópica es una técnica nuclear que utiliza tanto isótopos estables como radiactivos para seguir los movimientos del agua en el ciclo hidrológico. Los isótopos pueden utilizarse para investigar las fuentes de aguas subterráneas y determinar su origen, su forma de recarga, si existe riesgo de intrusión o contaminación por agua salada, y si es posible utilizarlas de manera sostenible”.

“En las fases de evaporación y condensación, la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno en una molécula de agua sufre pequeños cambios. Como resultado de ello, en diferentes etapas del ciclo hidrológico el agua queda marcada, de manera natural, con huellas isotópicas que varían en función del historial de una masa de agua en particular y de su recorrido por el ciclo hidrológico. Se denominan isótopos a los átomos de un elemento que son químicamente idénticos y físicamente diferentes. Las ciencias nucleares pueden distinguir entre ellos valiéndose de la espectrometría de masas para “pesarlos”.

En cada etapa del ciclo hidrológico, se registra un pequeño cambio consistente en una diferencia en la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno en el agua que es tan singular como una huella dactilar. Los isótopos de los contaminantes, como trazas metálicas o compuestos químicos disueltos en agua, también ofrecen pistas sobre sus orígenes.

El cuadro resultante permite a los hidrólogos trazar mapas de las fuentes de agua subterránea; por su parte, los climatólogos pueden reunir datos más fiables sobre la evolución climática y determinar la repercusión de sucesos futuros cuando se producen los cambios climáticos. Los isótopos ofrecen la posibilidad de abarcar períodos prolongados de fenómenos meteorológicos de miles de años de duración. Sus firmas quedan preservadas dondequiera que se registra el ciclo del agua, en sedimentos de océanos y lagos, en las incisiones anulares de los árboles, en glaciares y casquetes polares, en depósitos en cuevas y en aguas subterráneas” (Ibid.).

En la naturaleza, se encuentran isótopos tanto estables (que no cambian en el tiempo) o radioactivos (que siguen una ley de decaimiento).

*Los isótopos estables en la evaluación del estado y dinámica del agua en el ecosistema de Páramo.*

El conocimiento del funcionamiento y estado de los sistemas acuíferos suele ser el elemento limitante para entender estos procesos. Este conocimiento sólo es posible con la utilización de herramientas geocientíficas

que integran un conjunto de diferentes disciplinas relacionadas con la geología, hidrología, hidráulica, hidrogeoquímica e isotopía, las cuales contribuyen a la construcción de mejores modelos hidrogeológicos conceptuales y a representar adecuadamente el funcionamiento de acuíferos complejos.

La hidrogeología ha progresado con el uso de nuevas técnicas para mejorar la comprensión de los procesos que ocurren en acuíferos complejos donde la identificación de zonas de recarga y las conexiones entre las aguas superficiales y subterráneas, precisa la utilización de técnicas multidisciplinarias para dar respuestas a interrogantes concretos.

Es necesario identificar las interconexiones entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas y su variabilidad en el espacio y el tiempo, debido a que puede presentarse una recarga indirecta desde los ríos hacia el agua subterránea, pero además, el agua subterránea juega un papel importante en el mantenimiento del caudal base en los ríos y puede, eventualmente, mantener el nivel de los humedales en la zona de descarga.

“La composición isotópica de las aguas subterráneas es controlada por la contribución de la precipitación local, ríos y otros cuerpos de agua superficial. Los ríos usualmente tienen origen en las partes altas, donde la precipitación es más empobrecida que en las zonas planas. Por lo tanto, los ríos normalmente, se encuentran empobrecidos isotópicamente con respecto al agua subterránea y a la precipitación local en las zonas planas. Especialmente en regiones donde las alturas superan los 3.000m.s.n.m como en el ecosistema de páramo” (Shahul Hameed, Resmi, Suraj, Unnikrishnan, & Sudheesh, 2015).

“En contraste, los cuerpos de agua superficiales en las planicies, se encuentran enriquecidos en isótopos más pesados debido a la continua evaporación, por lo tanto, realizando un monitoreo continuo de la composición isotópica del agua proveniente de la precipitación, del agua subterránea y del agua superficial es factible estimar la contribución de la recarga de la lluvia y ríos al agua subterránea o viceversa”. (Ibid.). Este monitoreo debe ir acompañado de una red de monitoreo de niveles piezométricos en captaciones cercanas (menos de 500m) de los ríos de la zona de estudio con el fin de contrastar la variación de los niveles de ambas fuentes.

### *Los isótopos radioactivos*

Son empleados para la datación de las aguas subterráneas. Determinar la edad del agua subterránea o tiempo de residencia, se ha convertido en un requerimiento esencial para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, puesto que permite identificar qué tan renovable es el recurso hídrico y en ese sentido planificar de una

mejor manera el aprovechamiento para las presentes y futuras generaciones. En el caso particular de los ecosistemas de Páramo, pueden aportar información sobre la edad del agua presente en los diferentes flujos (locales, intermedios, regionales).

Los isótopos radioactivos más utilizados, se enuncian a continuación:

- $^3\text{H}$  (tritio): con un período de vida media de 12,32 años, es útil para datar aguas recientes o jóvenes.
- $^{14}\text{C}$  (carbono 14): con un período de vida media de 5730 años, es útil para datar aguas con tiempo de residencia medio.
- $^{36}\text{Cl}$  (cloruro 36): con un período de vida de media de 301000 años, empleado para datar aguas ancianas.

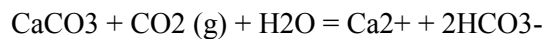
### 3.2.2.2 Hidroquímica en el estudio de la hidrología del Páramo y sus sistemas asociados

“Los estudios hidroquímicos revelan una cantidad cada vez mayor de información que está codificada en el agua durante el ciclo hidrológico” (Mazor, 2004), aportando insumos sobre las conexiones entre el agua de precipitación, subsuperficial, superficial y subterránea.

“En contraposición al agua oceánica la salinidad media de los ríos del mundo es baja. Del contenido medio de sales de 120 mg/L, el carbono (en forma de bicarbonato) representa 58 mg/L, y el calcio, el azufre (en forma de sulfato) y el silicio (en forma de ácido silícico monomérico disuelto) constituyen un total de 39 mg/L. Los 23 mg/L restantes están formados predominantemente de cloro, sodio y magnesio (de mayor a menor importancia)” (Mook, 2000).

“Por lo general la composición del agua del río está controlada por las interacciones agua-roca con la lluvia y las aguas vadasas cargadas de dióxido de carbono con los minerales de las rocas continentales. El contenido en dióxido de carbono del agua de lluvia y del agua edáfica es de particular importancia en los procesos de meteorización. La composición química del agua de lluvia experimenta un gran cambio después de penetrar en el terreno. La parte superior del terreno es una zona de intensa actividad bioquímica.” (Ibíd.).

“Uno de los principales procesos bioquímicos de las bacterias es la oxidación de la materia orgánica, lo que conlleva a un aumento del dióxido de carbono en el gas del terreno. Por encima de la zona saturada los gases del terreno pueden contener de 10 a 40 veces más dióxido de carbono que la atmósfera libre. Este  $\text{CO}_2$  provoca un conjunto de reacciones meteóricas, como por ejemplo la disolución congruente de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en un terreno con roca caliza” (Ibíd.).



“La cantidad de CO<sub>2</sub> que se disuelve de acuerdo con la reacción anterior, depende principalmente de la temperatura y de la presión parcial del dióxido de carbono. Por ejemplo, para una presión del dióxido de carbono atmosférico de 10–2 atmósferas y para un ambiente sólido que contenga dióxido de carbono puro, la cantidad de calcio que se puede disolver (a 25°C) hasta llegar a la saturación es de 65 y 300mg/L, respectivamente.” (*Ibid.*).

“Los iones calcio y bicarbonato que se liberan en el agua vadosa y en el agua subterránea alcanzan eventualmente los sistemas fluviales. El agua que se obtiene de la reacción citada anteriormente contiene, bicarbonato, potasio y silicatos disueltos en proporciones de 1:1:2.” (*Ibid.*).

Teniendo en cuenta las fuentes de los minerales encontrados en las aguas superficiales y el objetivo de generar insumos para mejorar el conocimiento de los procesos que gobiernan la regulación hídrica y la oferta de agua en cantidad y calidad, se propone realizar una revisión bibliográfica en los siguientes temas:

Utilización de la conductividad eléctrica como trazador de flujos en zonas de alta montaña, aportes de humedales y lagos de alta montaña a la escorrentía superficial y conexiones con los flujos subterráneos.

Aplicación del ion conservativo cloruro (Cl<sup>-</sup>) para la identificación de procesos de conexión entre aguas superficiales y subterráneas, así como para el cálculo del caudal base.

### 3.2.3 Servicios ecosistémicos

Es ampliamente reconocido y documentado que el páramo es un importante proveedor de servicios ecosistémicos. En Colombia, Venezuela y Ecuador se han elaborado estudios sobre diferentes aspectos del funcionamiento del ecosistema de páramo. En el campo de la hidrología Ecuador ha avanzado especialmente. Sin embargo como se mencionó anteriormente muchos estudios son muy locales, los cuales a su vez han mostrado que hay grandes diferencias en los procesos ecológicos entre diferentes paramos, razón por la cual el gran volumen de estudios sobre la hidrología, como en el Azuay, son poco extrapolables a otros Paramos. (Hofstede & et. al., 2014). Se referencian en este mismo documento los esfuerzos que se adelantan por compensar este conocimiento mediante el mejoramiento de las aproximaciones teóricas pero también con propuestas de monitoreo, particularmente hidrológico.

En la declaración de Paipa Congreso Nacional de Páramos "Conservación con Equidad" Mayo 29 de 2009, se reconoce la importancia del páramo y la necesidad de conocer y valorar los servicios ambientales que



presta. “A pesar del reconocimiento de la importancia del páramo, es necesaria la valoración de sus servicios ambientales, ya que servirán de base para la priorización en los planes ambientales y sectoriales, la gestión de recursos, la asignación presupuestal desde la política pública para la inversión y la generación de incentivos para la conservación, conocimiento, restauración y manejo sostenible del páramo.”

En la Política Nacional para la gestión integral de la biodiversidad se diferencian los conceptos de servicios ambientales y servicios ecosistémicos con las siguientes definiciones:

“**Servicios ambientales:** Servicios relacionados con el ambiente que no necesariamente son generados gracias al funcionamiento y manejo de los ecosistemas, sino que están relacionados con el suministro de recursos ambientales o saneamiento ambiental prestados por industrias y organizaciones sociales, como los servicios de alcantarillado, recogida y disposición de basuras, saneamiento y servicios similares, al igual que servicios de reducción de emisiones de los vehículos y servicios de reducción del ruido.

**Servicios ecosistémicos:** Aquellos procesos y funciones de los ecosistemas que son percibidos por el humano como un beneficio (de tipo ecológico, cultural o económico) directo o indirecto. Incluyen aquellos de aprovisionamiento, como comida y agua; servicios de regulación, como la regulación de las inundaciones, sequías, degradación del terreno y enfermedades; servicios de sustento como la formación del sustrato y el reciclaje de los nutrientes; y servicios culturales, ya sean recreacionales, espirituales, religiosos u otros beneficios no materiales” (MADS -IAvH, 2011).

La evaluación de Ecosistemas del Milenio (Millenian Ecosystem Assesment-MEA 2005) reconoce entre los cuatro principales servicios ecosistémicos los de aprovisionamiento y el de regulación y soporte y los considera como:

**Servicios de aprovisionamiento** los “constituidos por el conjunto de bienes y productos que se obtienen de los ecosistemas como alimentos, fibras, maderas, leña, *agua*, suelo, recursos genéticos, pieles, mascotas, entre otros (MEA 2005. Ecosystems and human Well-Being: Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, USA).

**Servicios de regulación y soporte** como los “beneficios resultantes de la regulación de los procesos ecosistémicos, incluyendo el mantenimiento de la calidad del aire, *la regulación del clima*, el control de la erosión, el control de enfermedades humanas y *la purificación del agua* (MEA 2005).

De otro lado, los de soporte son servicios y procesos ecológicos necesarios para el aprovisionamiento y la existencia de los demás servicios ecosistémicos.”

Los páramos son proveedores de estos servicios ecosistémicos: de provisión, regulación y calidad de agua, sin desconocer otros como los de la función ecológica.

- **Provisión:** uno de los principales servicios que se le ha reconocido al páramo andino es ser proveedor del recurso agua. La combinación de las características climáticas, geomorfológicas, edáficas y de vegetación del páramo hacen de este ecosistema una fuente permanente de agua de alta calidad (Vivas 1992).
- **Regulación de los flujos de agua:** a pesar de que no se conoce a ciencia cierta el origen de este servicio ecosistémico, sí se sabe con certeza que el páramo tiene una capacidad de regulación del agua muy importante que permite mantener un flujo base sostenido de agua. Por ello, el agua de los páramos ha sido utilizada para el consumo humano, ya que permite asegurar la provisión del servicio de acueducto.
- **La calidad del agua:** en la mayoría de los casos, las cabeceras de los ríos poseen una calidad de agua elevada debido a la baja influencia antrópica que han recibido. Esto se extiende a las cuencas hidrográficas, siendo los páramos, en algunos casos, la parte más elevada de la cuenca, con menor influencia humana y con menor recorrido a lo largo de la cuenca lo que aumenta la concentración de elementos provenientes de la erosión natural y/o artificial de los suelos y rocas. Esto permite asegurar que los páramos, en condiciones naturales, proporcionan una calidad de agua muy elevada, que es otro motivo por el que sus aguas son usadas para la provisión de agua potable en grandes ciudades como Quito y Bogotá D.C.
- **Función ecológica:** los páramos son ecosistemas especiales debido a las condiciones climáticas, de altura, etc. que posee. Es por ello, que poseen una biota endémica que debe ser conservada para mantener el equilibrio del ecosistema.

#### 3.2.4 Condiciones de calidad del agua en paramo

Dentro de todas las metodologías de análisis de la calidad del agua, tradicionalmente se ha determinado en función del uso posterior que se diera al recurso hídrico, es decir, la aptitud para un uso, como se demuestra en la legislación vigente (Resolución 2115 de 2007, Decreto 1575 de 2007, etc.). En el caso de, por ejemplo, los ríos, donde el marco legislativo está más desarrollado, los objetivos de calidad se determinan por tramos de corriente donde se analizan las presiones ejercidas por las actividades antropogénicas.

Desde este punto de vista, no se especifica si la falta de calidad se deba a causas naturales o contaminación antropogénica. La calidad del agua superficial ha sido determinada principalmente en función de parámetros físico-químicos y microbiológicos. En las últimas décadas, esta definición de calidad del agua ha ido cambiando, a medida que se introducía el *concepto de ecología en el análisis*.

3.2.4.1 Calidad ecológica de las aguas

La calidad ecológica se puede definir como una “*expresión de la calidad de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos asociados a las aguas superficiales*”<sup>2</sup>, donde el objetivo es determinar la modificación de las características del agua en función de un punto de referencia relativo (estado natural determinado mediante las condiciones de referencia) y no absoluto (normativa). Por tanto, la calidad de una masa de agua natural se relaciona con su cercanía al estado natural y la pérdida de calidad se identificaría con su alejamiento de las condiciones naturales (contaminación). El objetivo final del uso de la calidad ecológica es determinar la desviación de las condiciones naturales del cuerpo acuático, y por tanto, se refiere a un potencial de conservación de un ecosistema.

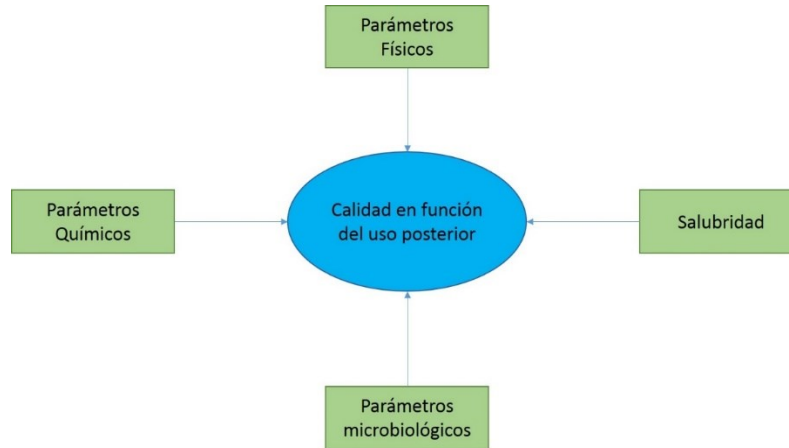
Los conceptos inmersos en la calidad ecológica de los sistemas acuáticos se muestran en la Figura 5 y los conceptos que se asocian con el uso posterior se esquematizan en la Figura 6.



Fuente: García L, 2017

Figura 5. Calidad ecológica de sistemas acuáticos

<sup>2</sup> Tomado de la página web del Ministerio de Medio Ambiente de España en lo referente al estado y calidad de las aguas <http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/concepto-estado/>



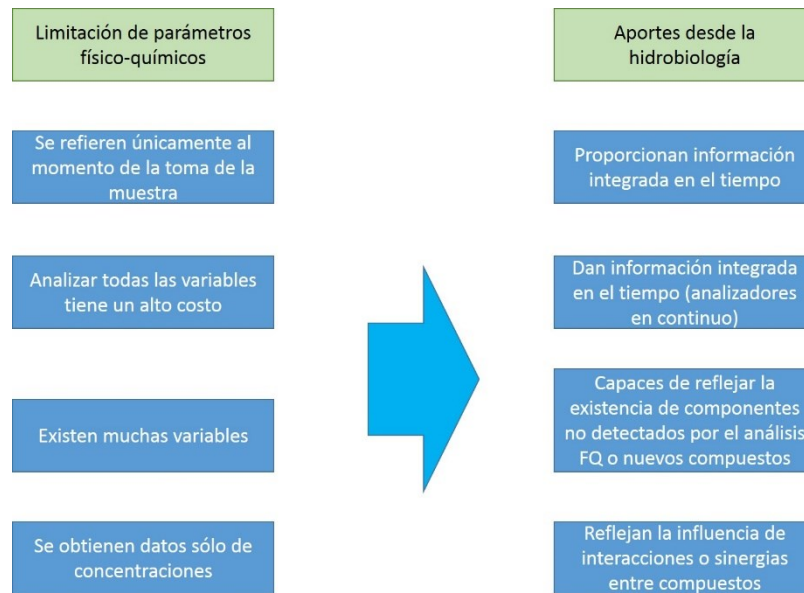
Fuente: García L, 2017

**Figura 6.** Conceptos base que crean la determinación de la calidad en función del uso posterior

Dentro del concepto de calidad ecológica se incluyen parámetros indicadores más allá de los físico-químicos, debido a la introducción del concepto de ecología y ecosistema donde las relaciones entre componentes y sus efectos en la vida acuática son imprescindibles. Por esto, se añaden a la lista de parámetros comunidades hidrobiológicas como los macroinvertebrados o las diatomeas que proporcionan esa información complementaria.

Además, los parámetros hidrobiológicos proporcionan una opción para suplir las limitaciones de los parámetros físico-químicos pero no son una alternativa a los mismos, sino un complemento. Por tanto, deben ser usados en paralelo, al igual que la hidromorfología o los indicadores de hábitat. Esto supone un aumento de la información obtenida en el muestreo y análisis de la calidad del agua, que permite un mayor conocimiento de los procesos y sus efectos.

A continuación, en la Figura 7 se muestra como los parámetros hidrobiológicos suplen las limitaciones de los físico-químicos:



**Fuente:** García L, 2017

**Figura 7.** Resumen de aportes de parámetros hidrobiológicos para suplir las limitaciones físico químicas

Las comunidades biológicas sufren los efectos de las contaminaciones químicas y físicas, por lo que no sólo indican el grado de contaminación sino el efecto biológico de los contaminantes. A pesar de todo ello, los parámetros físico-químicos siguen siendo necesarios para determinar el grado de contaminación, ya que estos aportan una información detallada de los compuestos y sus concentraciones.

*La calidad ecológica* se determina a partir de parámetros físico-químicos en el monitoreo de cuerpos acuáticos; la bioindicación como herramienta para la evaluación de la calidad de las aguas; y parámetros microbiológicos.

*Las variables físico-químicas* analizadas en cuerpos de agua han sido ampliamente utilizadas, siendo la base del conocimiento de la contaminación y de las condiciones naturales de los ríos y lagos estudiados históricamente. Esto se debe al amplio conocimiento existente sobre dichas variables y su comportamiento en el medio natural.

*Los bioindicadores*, tienen capacidad integradora de la información sobre la contaminación, frente a la información puntual suministrada por los indicadores clásicos. Estos proporcionan información sobre la calidad ecológica del agua de las últimas semanas o meses, mientras que los parámetros físico-químicos

sólo proporcionan información del momento de muestreo. Además, los indicadores biológicos proporcionan información ecológica del hábitat que no puede ser obtenida mediante los físico-químicos.

*Los parámetros microbiológicos* son estudiados independiente de los bioindicadores en el monitoreo de calidad de las aguas debido a su relevancia para la salud humana, más que para el estado ecológico de los ríos.

Para identificar de manera sistemática la calidad de los cuerpos acuáticos de páramos que sirvan para la creación de una línea de referencia, control y seguimiento de los servicios ecosistémicos y fortalecimiento del conocimiento de la calidad del agua en los páramos a continuación se relacionan los principales parámetros y conceptos asociados

Parámetros físico-químicos en el monitoreo de cuerpos acuáticos

Las variables físico-químicas más comúnmente utilizadas en los análisis de calidad de las aguas a nivel mundial, y su relevancia.

- Conductividad eléctrica (CE): es un indicador de la concentración de iones disueltos en el medio, por lo que tiene una relación directa con la salinidad y con la concentración de iones y de sólido disueltos. Este parámetro es importante en la determinación de la calidad del agua, ya que proporciona una primera información fácilmente medible sobre la posibilidad de aumento de contaminación.
- pH: sirve para expresar la concentración y actividad del ión hidrógeno, indicando el comportamiento ácido o básico del agua. Este factor tiene gran relevancia ya que afecta a los procesos químicos y biológicos que tienen resultado en los ecosistemas acuáticos. Las aguas naturales tienen un pH alrededor de la neutralidad que oscila entre 6.5 y 8.5, por lo que estas son ligeramente básicas.
- T: este factor tiene una alta variabilidad a lo largo del día y de las estaciones del año. En el caso de los páramos de los trópicos, las variaciones se producen a lo largo de las 24 horas del día y no tanto a lo largo del año. Dado que la temperatura es un factor importante para la vida en el agua afectando, por ejemplo, la actividad enzimática, así como para los procesos químicos que se producen en el medio, el conocimiento de su variación es importante. Además, dado que afecta a la actividad y comportamiento de otras variables, se requiere la toma de la temperatura al llevar a cabo el muestreo físico-químico.

- SST: los sólidos suspendidos totales indican la cantidad de material particulado en suspensión en las aguas superficiales. Este factor es importante para la producción primaria en los cuerpos acuáticos, ya que un aumento de los SST implica una disminución de la penetración de la luz, lo que disminuye la fotosíntesis. Además, estos sólidos particulados pueden adsorber nutrientes y contaminantes.
- OD: este parámetro puede ser determinado mediante dos variables, los mg por litro de oxígeno disuelto en el agua y el porcentaje de saturación. Este último tiene en cuenta las variaciones naturales del oxígeno disuelto en función de la altura, la temperatura, etc. Evidentemente, el OD es un factor importante en la determinación de la calidad del agua, ya que proporciona información sobre la condición aerobia o anaerobia del medio, lo que afecta drásticamente los seres vivos.
- DBO5: la demanda bioquímica de oxígeno es una medida de la cantidad de materia orgánica que puede ser degradado mediante procesos biológicos en 5 días. A mayor concentración de materia orgánica en el medio, mayor es el consumo del oxígeno del medio por las bacterias, por tanto, la DBO5 es un indicador de contaminación de materia orgánica.
- DQO: la Demanda Química de Oxígeno determina la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica en el agua, por tanto es un indicador de la cantidad materia orgánica, biodegradable y no biodegradable, disponible en el medio.
- Nutrientes: los principales nutrientes que se analizan en muestras de agua son el nitrógeno y el fósforo que son los elementos básicos y los nutrientes limitantes en la mayoría de los ecosistemas, por lo que son los elementos que pueden producir una eutrofización en caso de encontrarse en una alta concentración. .

*Nitrógeno:* las formas principales son nitratos (NO<sub>3</sub>), nitritos (NO<sub>2</sub>) y nitrógeno amoniacal (NH<sub>4</sub>). Los nitrato y nitritos son indicadores de contaminaciones domésticas, industriales y agropecuarias, mientras que el NH<sub>4</sub> es indicador de contaminación reciente o de condiciones anaeróbicas.

*Fósforo:* este elemento puede proceder del suelo en condiciones naturales, o de contaminaciones agrícolas o por detergentes. En aguas se puede determinar el fósforo total como medida de la concentración de este elemento biológicamente disponible, así como los fosfatos que es el estado en el que se encuentra normalmente en el agua.

- Metales pesados: existe una gran diversidad de metales pesados, por lo que su análisis suele depender del objetivo del muestreo y de los impactos existentes en la zona de estudio. En el caso

de cuencas afectadas por minería, es evidente que el análisis de metales pesados es necesario, en cambio en zonas sin grandes impactos, o donde los impactos sean producidos por agricultura extensiva, no se requería su análisis, excepto en el caso de la determinación de condiciones de referencia para la cuenca de estudio. Algunos de los metales más analizados en el agua son el mercurio, el cadmio, el plomo y el cromo que pueden ser incorporados en la cadena trófica acumulándose en los tejidos de los organismos.

Mediante el análisis físico-químico completo de una muestra de agua, se puede determinar el grado de contaminación de la misma, así como, determinar la fuente de contaminación (en general, se puede diferenciar entre contaminación doméstica, agrícola, pecuaria e industrial, aunque no siempre es posible). Esto da una gran relevancia e importancia al estudio de estos parámetros.

Además, un factor importante en estos análisis es que se determina el grado de contaminación, lo que implica, el uso necesario de las variables físico-químicas en cualquier análisis de aguas.

#### 3.2.4.2 La bioindicación como herramienta para la evaluación de la calidad de las aguas

Los parámetros hidrobiológicos solo están justificados en el monitoreo de cuerpos de agua superficiales. En las aguas subterráneas, debido a las condiciones de ausencia de luz, no hay producción primaria fotosintética, por lo que no existen ninguno de los bioindicadores que se van a desarrollar a continuación. En general, en aguas subterráneas no se llevan a cabo análisis hidrobiológicos pero sí microbiológicos.

**Un bioindicador** es un organismo, una parte de un organismo o una comunidad de organismos que contiene información sobre la calidad del ambiente o parte del ambiente (Market B., 2003). El uso de organismos *in situ* para la identificación y cuantificación de los tóxicos o contaminantes en el medio ambiente es conocido como biomonitoreo (Chaphekar, 1991). Esta técnica usa los organismos que responden de manera sensitiva y específica a los contaminantes con el objetivo de detectar y evaluar la contaminación acuática. El biomonitoreo aprovecha, entre otras, la habilidad de los organismos para acumular contaminantes en sus tejidos mediante bioconcentración o biomagnificación (Lovett-Doust, 1994).

Pratt (Pratt, 1998) realiza una comparación de las ventajas de los métodos físico-químicos y los biológicos, que se muestra en la Tabla 1. Dentro de las ventajas de los bioindicadores, cabe destacar su capacidad integradora de la información sobre la contaminación, frente a la información puntual suministrada por los indicadores clásicos. Además, los indicadores biológicos proporcionan información ecológica del hábitat que no puede ser obtenida mediante los físico-químicos. Esto es sumamente importante cuando los estudios



de calidad del agua se realizan, no sólo con el objetivo de detectar contaminaciones o vertimientos, sino con el objetivo de proteger los sistemas naturales.

**Tabla 1.** Tabla comparativa de parámetros biológicos y fisicoquímicos.

Biológicos	Físico-químicos
Realizan integración espacial y temporal de la contaminación	Determinan del contaminante específico
Dan respuesta a contaminaciones crónicas y puntuales	Permiten la observación de los cambios temporales detallados
Miden degradación del hábitat	Son de fácil estandarización
Se pueden realizar estudios de bioacumulación.	

Fuente: (García L. , 2015)

En base a esta comparación, se puede deducir que los parámetros biológicos no sustituyen a los fisicoquímicos, sino que deben ser utilizados en paralelo puesto que se complementan mutuamente y el uso de ambos mejora la calidad de la información obtenida.

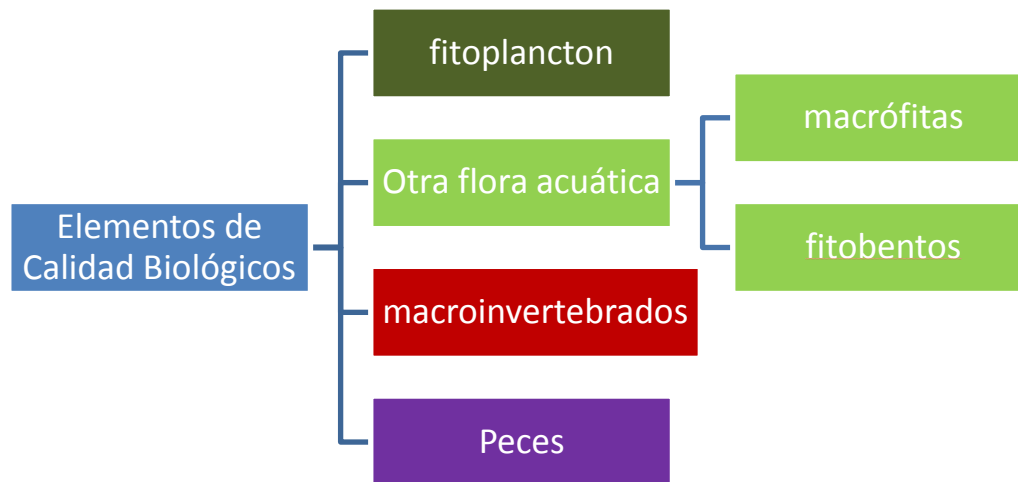
Además los indicadores biológicos poseen una serie de ventajas, como: (l'eau Agences de, 2000):

- Son sedentarios o relativamente sedentarios, ya que poseen una movilidad reducida (como muchos de unos pocos metros) por lo que son indicadores de la calidad del agua del punto exacto de muestreo,
- Debido a su ciclo biológico corto, reaccionan a la contaminación rápidamente,
- Las comunidades presentan un gradiente de respuesta de acuerdo a la intensidad y la naturaleza del estrés,
- El ciclo de vida es lo suficientemente largo como para obtener un registro de la información integrada de la calidad medioambiental,
- Son ubicuos en la red hidrográfica, y
- Existe una amplia bibliografía disponible para su identificación taxonómica y sus características ecológicas.

Teniendo en cuenta la definición de bioindicador proporcionada previamente, se deduce que cualquier organismo puede ser utilizado como indicador de la calidad del agua. En relación a esto, se han determinado

los grupos o comunidades de organismos más eficaces en la tarea. Según la Directiva Marco del Agua - DMA (Comisión Europea, 2000) los indicadores biológicos o Elementos de Calidad Biológicos para sistemas lóticos son los que se muestran en la Figura 8.

Por norma general, en las redes de monitoreo desarrolladas en otros países como son los Estados Miembros de la Unión Europea y los Estados Unidos de América, se utilizan dos representantes del compartimiento vegetal (macrófitas y diatomeas para ríos) y dos del compartimiento animal (peces y macroinvertebrados para aguas corrientes).



**Fuente:** (García L. , 2015)

**Figura 8.** Tipos de bioindicadores usados en Europa según la Directiva Marco del Agua

Si lo que se pretende es determinar la calidad del agua en función del uso al que se va a destinar la misma, los indicadores biológicos sólo proporcionarían más información sobre el estado de los cuerpos de agua en los últimos meses, gracias a su efecto integrador de la información.

Pero, si lo que se pretende es la conservación y protección de los sistemas acuáticos, independientemente del uso al que irán destinados sino, simplemente, por su valor ambiental, los bioindicadores proporcionan casi toda la información necesaria al respecto. Dado que son organismos que habitan en el propio medio, proporcionan la información ecológica necesaria sobre el impacto o ausencia del mismo en las comunidades biológicas. Como se ha indicado anteriormente, proporcionan información sobre el estado ecológico y

general de los cuerpos de agua, por lo que son una herramienta imprescindible en la conservación del medio ambiente (García L. , 2015).

#### 3.2.4.3 Conceptos sobre parámetros microbiológicos

Los parámetros microbiológicos son presentados independiente de los bioindicadores en el monitoreo de calidad de las aguas debido a su relevancia para la salud humana, más que para el estado ecológico de los ríos.

Estos parámetros han sido ampliamente estudiados en todos los cuerpos de agua continentales en la mayoría de países debido a su importancia en la transmisión de enfermedades a los seres humanos, así como a los animales domésticos, ya que algunos son agentes patógenos transmitidos por el agua. Estos pueden ser, principalmente, bacterias, virus, protozoos y helmintos.

En cuanto al estado ecológico, sin tener en cuenta el uso posterior que se le va a dar al recurso hídrico, estos parámetros solo tienen relevancia si existen condiciones de referencia sobre el estado de la cuenca de estudio en condiciones prístinas. Esto es debido a que los microorganismos pueden encontrarse, y se encuentran, de forma natural en los cuerpos acuáticos y su presencia no tiene por qué ser debida a un foco de contaminación.

Hay que destacar que en la mayoría de los casos los parámetros microbiológicos que se estudian son los *coliformes totales*, *los coliformes fecales* y *Escherichia coli*, los cuales están directamente relacionados con enfermedades humanas y con desechos antrópicos por lo que son indicadores de vertimientos de aguas residuales. En concreto son indicadores de contaminación fecal de origen animal o antrópico, por lo que su presencia indica actividad ganadera o vertimientos de aguas residuales. En cambio, si se realizan estudios microbiológicos completos, muchos de los microorganismos que se encuentran son naturales de la zona de estudio.

En el marco de los ecosistemas de páramos, el uso de los parámetros microbiológicos es necesario, puesto que, gran cantidad del agua de consumo humano en Colombia, proviene de estas zonas emblemáticas.

#### 3.2.4.4 Condiciones de referencia para los parámetros físico-químicos y biológicos para aguas superficiales

Las condiciones de referencia han sido ampliamente conocidas, pero su uso se ha generalizado en los últimos años a nivel internacional. Hoy en día son usadas en Europa según la Directiva Marco del Agua (Comisión Europea, 2000), en EE.UU están siendo utilizadas por la EPA (US Environmental Protection Agency)

(&Simon, 1995), en el Reino Unido para la clasificación de ríos (Wright, 1995), en Australia para el “National River Health Program” (Parson, 1996) y en Sur África para el “River Health Programme” (Eehout, 1996).

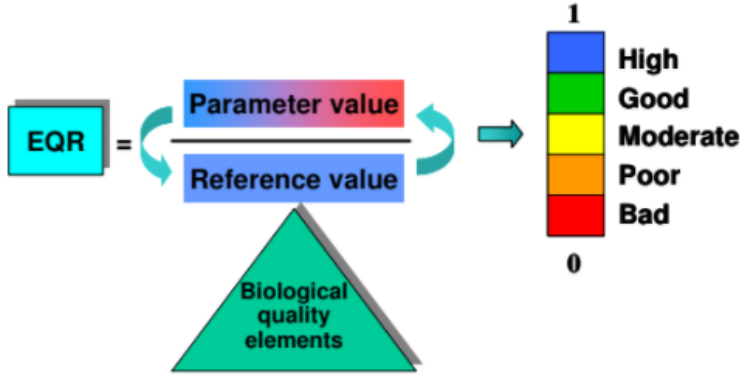
Una estación con *condición de referencia es definida* como “aquella que tiene valores físico-químicos, hidromorfológicos y biológicos correspondientes a las estaciones no perturbadas, y que además, deben tener concentraciones de contaminantes específicos sintéticos o no, cercanas a cero o al menos indetectables” (Owen, 2001), o más generalmente, como “el estado que ha existido antes de las perturbaciones humanas, o al menos sin influencias humanas que hayan alterado de manera significativa las características naturales de un río” (Chavarec, 2000).

Por tanto, las *condiciones de referencia son las que se encuentran en estaciones sin impacto* antrópico o con un mínimo impacto, es decir, son las condiciones naturales que tendría el ecosistema acuático.

El uso de estas condiciones se puede llevar a cabo mediante el “Ecological Quality Ratio” (EQR) el cual establece la variación de las condiciones medidas respecto de las condiciones de referencia o naturales. La ecuación que simplifica esta explicación es:

$$EQR = \frac{\text{valor medido del parámetro}}{\text{valor referencia del parámetro}}$$

Este sencillo cálculo permite proporcionar un valor entre 0 y 1 para indicar el valor de desviación desde las condiciones de referencia establecidas previamente, siendo 1 el valor de mayor conservación o menor degradación, y 0 el valor que indica el mayor impacto antropogénico y degradación del ecosistema acuático.



Fuente: (Communities, 2007)

Figura 9. Representación gráfica del concepto de "Ecological Quality Ratio"

En conclusión, la determinación de estas condiciones de referencia permite el conocimiento exacto del efecto de las actividades humanas en el medio acuático, lo que permite realizar seguimiento y cuantificación para la conservación de la calidad de las aguas.

Cabe señalar que en el caso de no encontrar estaciones que puedan considerarse de referencia en un ecosistema o cuenca hidrográfica debido al alto impacto antrópico en todo el área de estudio, se ha desarrollado la modelación para establecer estas condiciones.

### 3.3 Modelo básico para el monitoreo del agua en los páramos

Los procesos característicos del comportamiento del agua en los ecosistemas de páramo van a determinar los objetivos, alcances y condiciones metodológicas del desarrollo programático del monitoreo hidrológico en el páramo. Los componentes estratégicos, programáticos, métodos y técnicas para el monitoreo hídrico en los páramos, deben dar cuenta de los procesos en el ciclo del agua en estos ecosistemas y sus interacciones, considerando aguas atmosférica, superficiales y subterráneas.

Teniendo en cuenta que uno de los principales objetivos del monitoreo es conocer, evaluar y hacer seguimiento de los servicios de provisión, regulación hídrica y calidad de agua que prestan los diferentes ecosistemas de páramo en el país, las variables y el planteamiento del sistema de monitoreo debe considerar el páramo en su conjunto (siendo el ecosistema - Complejo la unidad de análisis) de tal manera que genere datos hidrológicos a mediano y largo plazo en función de estos objetivos.

Los sistemas de monitoreo que se definan, incluyendo las metodologías y técnicas, deben articularse con los sistemas de información ambiental y del recurso hídrico y permitir la validación de modelos creados bajo las condiciones de los ecosistemas andinos con el fin de determinar las mejores acciones de manejo de cuenca.

En este contexto el protocolo de monitoreo hidrológico de ecosistemas de páramo, además de enmarcarse en los lineamientos del PNMRH, será coherente con los protocolos y estándares oficiales en particular del IDEAM como el Protocolo de Monitoreo del Agua. Igualmente considerará las guías de monitoreo hidrológico como la de Prácticas Hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial y la Guía Metodológica para el Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos promovida, entre otros, para acceso e intercambio de información entre los países. En esta última guía se enfatiza sobre la prioridad de realizar un monitoreo sencillo “mínimo” en muchos sitios que un monitoreo detallado en pocos sitios.

El modelo de monitoreo de agua que da soporte al protocolo de monitoreo hidrológico considera la isotopía, la hidroquímica y la bioindicación para obtener nuevas respuestas y comprender el modelo conceptual del funcionamiento del sistema hidrológico en el marco de los procesos del ciclo del agua y su expresión en los ecosistemas de páramo y sus áreas de influencia, incluyendo sus interacciones con el medio natural y los efectos de actividades antrópicas.

La propuesta de evaluación de la calidad de las aguas se basa, principalmente, en dos conceptos: Ecohidrología y Soluciones Basadas en la Naturaleza.

La ecohidrología es una línea incipiente en relación a la Gestión Integral del Recurso Hídrico que ha sido promovida, principalmente, por la UNESCO, la cual desarrolló este concepto en el Programa Internacional Hidrológico. Esta disciplina considera las interrelaciones funcionales entre la hidrología, el proceso de los ecosistemas acuáticos y la biota. En tanto que “es una ciencia transdisciplinaria, proporciona un enfoque sistemático para la regulación de la relación ciclo hidrológico-biota (regulación dual) de tal manera que se mejore la capacidad de carga de una cuenca por medio de una gestión integrada de los recursos hídricos, la biodiversidad, la capacidad de resiliencia y los bienes y servicios ecosistémicos” (UNESCO - PHI, 2018)

A tal efecto, el Plan Estratégico PHI-VIII 2014-2021: “Seguridad hídrica: respuestas a los desafíos locales, regionales, y mundiales” incluye el Tema 5: “Ecohidrología: creación de armonía para un mundo sustentable que comprende, entre otras, las siguientes áreas focales:

- Conformación de la estructura ecológica de una cuenca para el potencial mejoramiento del ecosistema: productividad biológica y biodiversidad
- Soluciones sistémicas ecohidrológicas e ingeniería ecológica para el mejoramiento de la resiliencia hidrológica y ecosistémica y de los servicios ecosistémicos” (Ibid).

Teniendo en consideración este nuevo enfoque para la GIRH y considerando la visión, también incipiente, de las Soluciones Basadas en la Naturaleza que promueve la IUCN y que consiste en las acciones que se apoyan en los ecosistemas y los servicios que estos proveen, para responder a diversos desafíos de la sociedad como el cambio climático, la seguridad alimentaria o el riesgo de desastres, en el Protocolo de Monitoreo de Ecosistemas de Páramo se propone la medición de la calidad del agua desde un enfoque diferente al usado hasta el momento.

Este nuevo enfoque se basa en la evaluación de la calidad del agua mediante la determinación de la “calidad ecológica” en la que se incluyen parámetros, no sólo físico-químicos, sino biológicos, hidromorfológicos y

de hábitat que permiten conocer los procesos de estos ecosistemas, así como las relaciones entre la hidrología y la ecología. Esto permitirá un mayor conocimiento de la biodiversidad, la capacidad de autodepuración y la resiliencia de estos sistemas, así como el mantenimiento de la calidad del agua.

Con las técnicas mencionadas anteriormente y con mediciones de los niveles de aguas superficiales y aguas subterráneas, es posible mejorar la comprensión de estos procesos.

## 4. PROCEDIMIENTO METODOLOGICO PARA CONSTRUCCION DEL PROTOCOLO

El procedimiento metodológico que se muestra en el esquema de la Figura 10 comprende tres grupos: a) identificación y definición de un marco de conceptos; b) análisis de bibliografía y consulta de expertos y; c) la estructuración y desarrollo del protocolo con sus componentes y una hoja de ruta inicial para su implementación. Los tres aspectos se trabajaron, en alguna medida, de forma paralela con un proceso de complementación y ajuste en función de avances en el análisis documental, debate técnico con los grupos de IDEAM, IAvH, consulta de expertos de la academia e institucionales y experiencias en proyectos específicos.

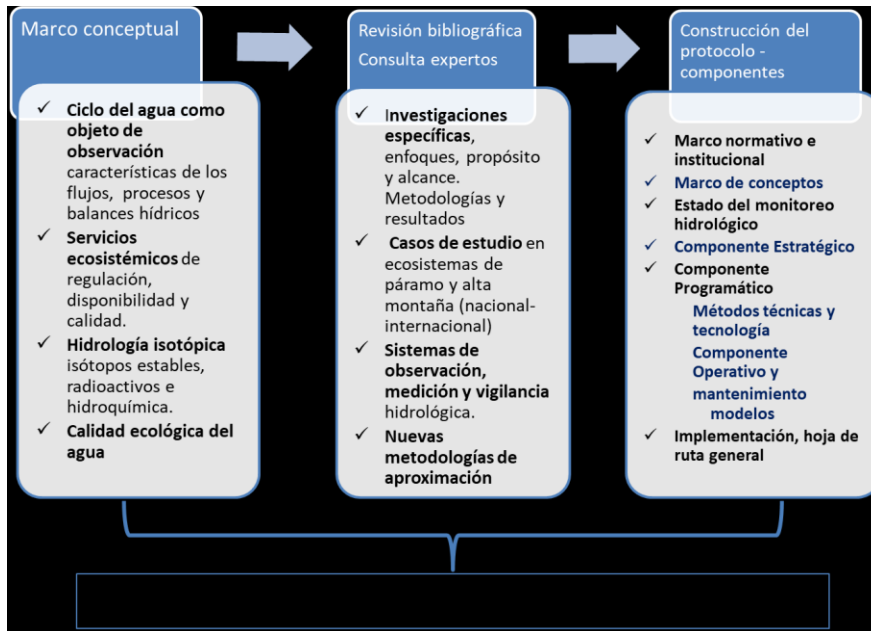


Figura 10. Procedimiento metodológico para la construcción del Protocolo de Monitoreo Hidrológico en Páramos

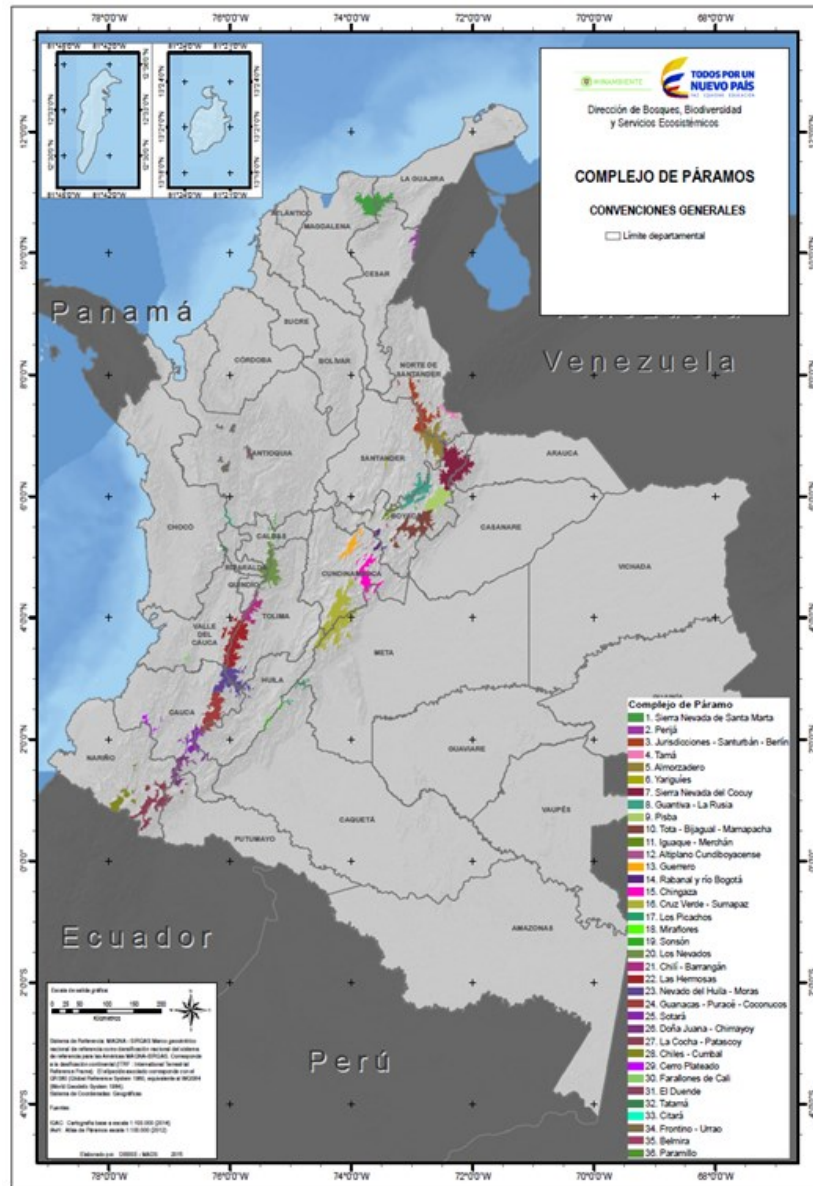
Como parte del proceso de identificación y definición de un marco de conceptos y del análisis de bibliografía y consulta de expertos, se construyeron los documentos soporte para el debate y desarrollo del Protocolos. Los documentos entregados al IAvH se denominan “Marco conceptual para el monitoreo hidrológico de paramos como base para determinar variables, indicadores, frecuencia de monitoreo, tecnologías métodos de monitoreo productos y reportes de análisis” y “Estado del arte nacional e internacional sobre monitoreo hidrológico en páramos”. Este último incluye información sobre los sistemas de monitoreo hidrológica existentes en los ecosistemas de paramo y alta montaña en Colombia.

## 5. ESTADO DEL MONITOREO HIDROLOGICO EN PARAMOS DE COLOMBIA

En Colombia se estima que la superficie de páramos alcanza los 29.061 km<sup>2</sup> (2.5% del territorio continental). Esta cifra como resultado de los estudios y delimitación detallada que adelantó el Instituto Humboldt, delimitación de páramos a escala 1:100.000 para la actualización del Atlas de Páramos (2012). De esta superficie el 45% se encuentra protegido bajo alguna de las categorías del Sistema Nacional de Áreas Protegidas.

Los Páramos en Colombia, como están considerados en el Atlas, se clasifican en cinco grandes Sectores en trece Distritos y en treinta y seis Complejos como un nivel más detallado de los distritos, los cuales se muestran en el mapa de la Figura 11. En términos hidrográficos la zonificación hidrográfica elaborada por IDEAM comprende cinco grandes Áreas, en un segundo nivel cuarenta y dos Zonas y estas a su vez en trecientos dieciséis Subzonas Hidrográficas. A nivel hidrogeológico el país se divide en dieciséis Provincias y tiene identificados sesenta y un sistemas acuíferos.





Fuente: SIAC – IDEAM, basado en (Sarmiento , Cadena, Sarmiento, Zapata, & León, 2013)

Figura 11 Complejos de Páramo en Colombia

En la

**Tabla 2.** Estaciones hidrológicas y meteorológicas en Complejos de Paramo Tabla 2, se resume la distribución de las 270 estaciones que han operado en áreas de Páramo. Se diferencian las estaciones de tipo hidrológico, meteorológico y combinado.

**Tabla 2.** Estaciones hidrológicas y meteorológicas en Complejos de Paramo.

SECTOR	DISTRITO	COMPLEJO	CLASE	TOTAL
Cordillera Central	Belmira	Belmira	MET	2
	Macizo Colombiano	Guanacas - Puracé - Coconucos	HID	4
			MET	14
		Sotará	MET	1
	Valle – Tolima	Las Herosas	MET	12
		Nevado del Huila - Moras	MET	4
	Viejo Caldas - Tolima	Chilí – Barragán	MET	2
		Los Nevados	HID	5
			MET	27
	Cordillera Occidental	Frontino – Tatamá	Tatamá	MET
Cordillera Oriental	Boyacá	Guantiva - La Rusia	HID	2
			MET	8
		Iguaque - Merchán	HID	3
			MET	1
		Pisba	MET	6
		Sierra Nevada del Cocuy	HMT	2
			MET	6
		Tota - Bijagual - Mamapacha	HID	3
			MET	9
		Cundinamarca	Chingaza	HID
	MET			35
	Cruz Verde – Sumapaz		HID	17
			HMT	1
			MET	31
	Guerrero		MET	4
	Rabanal y río Bogotá	HID	4	
		MET	9	
	Perijá	Perijá	MET	1
	Santanderes	Almorzadero	HID	1
			MET	4
Jurisdicciones - Santurbán - Berlín		HID	2	
		MET	4	
Tamá		HID	1	
MET	1			
Nariño - Putumayo	Nariño – Putumayo	Chiles – Cumbal	MET	1
		Doña Juana – Chimayoy	MET	1
		La Cocha – Patascoy	HID	1

		MET	5
<b>TOTAL ESTACIONES</b>			<b>270</b>

Se esperaba inicialmente que las subzonas hidrográficas (cuencas de dimensiones regionales) con mediciones hidrológicas fueran las unidades hídricas objeto de control hidrológico para los páramos. Sin embargo los patrones de múltiples drenajes que caracterizan la red hidrográfica que sale de estos ecosistemas sumado a que una subzona puede ser parte de hasta cinco complejos como la del río Bogotá (código 2120) y a su vez un complejo puede tener área en varias subzonas, estas unidades (SZH) de particular relevancia en la evaluación, planificación y gestión del agua a nivel regional no son las pertinentes para el monitoreo del agua en los páramos. La Figura 12 ilustra los dos casos.

48

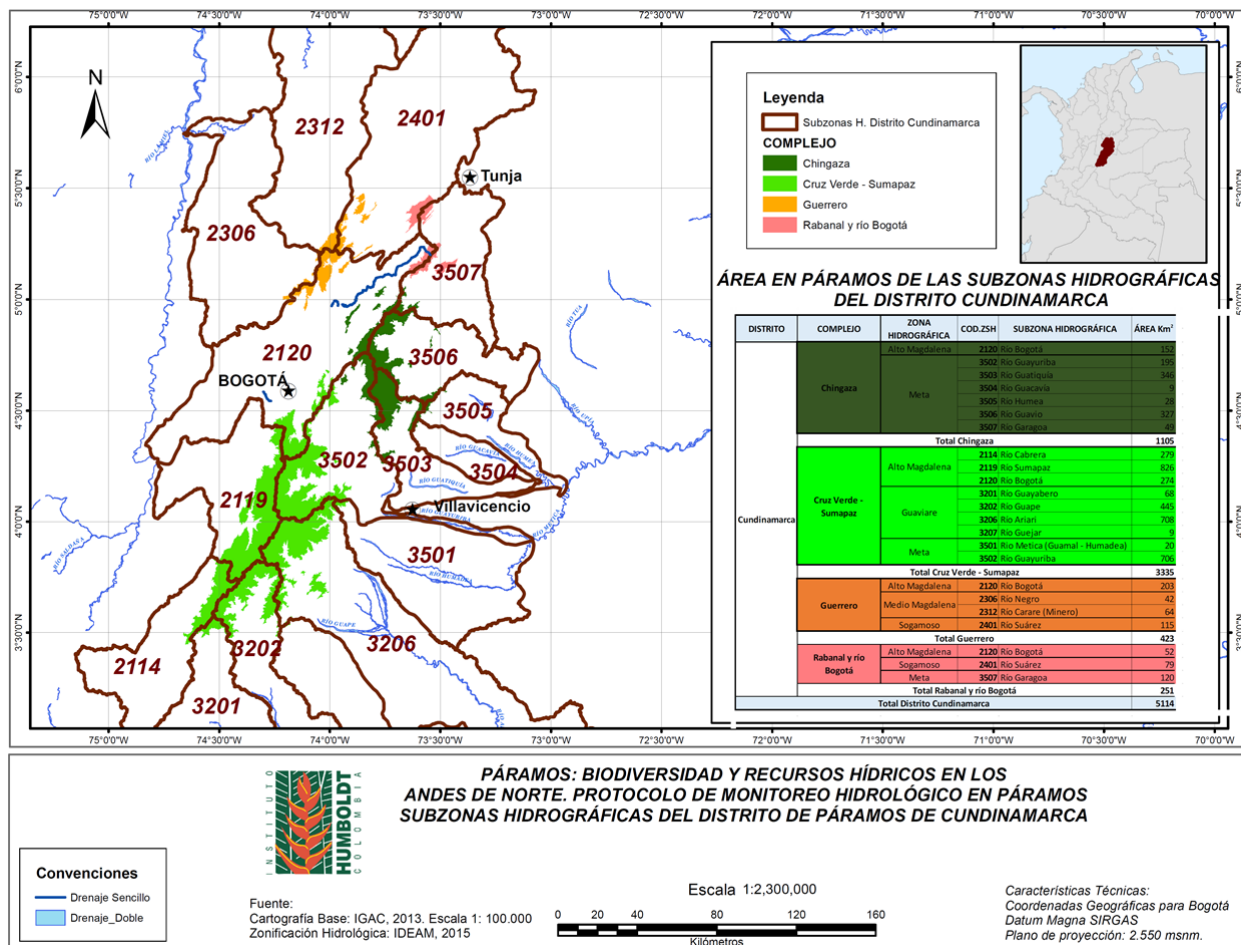


Figura 12. Complejos de Páramo versus la zonificación hidrográfica

Como se aprecia en la figura la cuenca del río Bogotá tiene en su territorio área de los complejos de páramo de Chingaza, Cruz Verde-Sumapaz, Guerrero y Rabanal-río Bogotá. A su vez el área del complejo de páramo Cruz Verde – Sumapaz cruza 9 subzonas hidrográficas.

En el documento sobre el estado del arte e información sobre los sistemas de monitoreo hidrológico existentes en los ecosistemas de páramo y alta montaña en Colombia se incluye el análisis del estado del monitoreo con cubrimiento sistemático, a partir de redes hidrológicas, meteorológicas diseñadas y en operación por parte de entidades del Sistema Nacional Ambiental en los ámbitos nacional y regional. En particular el monitoreo correspondiente a la red de referencia nacional operada por IDEAM, las redes hidrológicas y meteorológicas de las autoridades ambientales (Corporaciones Autónomas Regionales y Autoridades Ambientales Urbanas), Parques Nacionales Naturales y Empresas de abastecimiento de agua como EAAB y EPM.

## PARTE 2. PROTOCOLO DE MONITOREO HIDROLOGICO





# 1. OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROTOCOLO

## Objetivo

Orientar el monitoreo desde la perspectiva del agua y el ecosistema y dar lineamientos sobre qué monitorear, cómo y dónde en los ecosistemas de páramo de Colombia con énfasis en agua superficial, subterránea y atmosférica.

## Alcance

El protocolo comprende tres componentes principales que abordan lo estratégico, lo programático, métodos, técnicas y tecnológicas y elementos operativos para el monitoreo hidrológico en los páramos con el siguiente alcance:

*El componente estratégico* se refiere a lo que se debe conocerse del agua en los ecosistemas de páramo, a que va a dar respuesta, el propósito del monitoreo hidrológico y alcances esperados.

*El componente programático* plantea lineamientos para formular el programa de monitoreo para estos ecosistemas especiales en el marco del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico. Estos lineamientos se centran en el diseño de los sistemas de observación, medición y vigilancia entendido como “diseño de la red (puntos), áreas de observación y medición en función de los objetivos de monitoreo (variables frecuencia, métodos, etc.); así como los mecanismos y protocolos de transmisión; instrumentos y métodos de observación; tratamiento de datos primarios y su ingreso al sistema de información (incluyendo análisis básico y control calidad)” PNMRRH-2016.

Este componente trata también sobre métodos, técnicas y tecnologías, incluyendo la combinación de herramientas de modelación, uso de sensores remotos, isotopía e hidroquímica para validar hipótesis y la bioindicación en el tema de calidad de agua.

Como complemento del componente programático, métodos, técnicas y tecnologías para cada temática, se referencian algunos elementos específicos para la programación de mediciones en campo y programación de campañas. Igualmente, se considera el mantenimiento evolutivo de los modelos.

Por último incluye una hoja de ruta inicial para avanzar en la implementación que oriente la aplicación del protocolo, la sostenibilidad del monitoreo, el rol de las instituciones y el esquema de articulación para operar

y generar información y conocimiento sobre el agua en los páramos de Colombia y los servicios ecosistémicos que presta.

## 2. COMPONENTE ESTRATÉGICO

52

Se refiere a las principales preguntas a responder, al propósito del monitoreo hidrológico acorde con las necesidades específicas de información y conocimiento identificadas con énfasis en procesos característicos de los ecosistemas de páramo y su relación con la dinámica, cantidad y calidad del agua que emerge del funcionamiento de estos ecosistemas y que a su vez determinan los servicios ecosistémicos de regulación hídrica, capacidad de almacenamiento, cantidad y calidad de agua.

Como parte del desarrollo del componente se identifican los intereses y los retos que se enfrentan, las principales preguntas que se esperaría responder con los insumos y el propósito del monitoreo hídrico en los ecosistemas de páramo.

### **Intereses y retos identificados**

El monitoreo hidrológico en ecosistemas de páramo, como se concibe en este protocolo para su aplicación se orienta y se espera que:

- Sirva para varios intereses y objetivos
- Genere información sobre servicios ambientales que proveen las áreas de estos ecosistemas estratégicos.
- Tenga un cubrimiento regional (complejo de páramo) con jerarquización y priorización para alcanzar el objetivo por fases de conocer y hacer seguimiento a la regulación, disponibilidad hídrica y agua de buena calidad.
- Genere insumos para evaluar los procesos que gobiernan la regulación hídrica y la oferta del agua (superficial y subterránea) en el páramo y sus ecosistemas asociados.
- Genere insumo para la zonificación ambiental que deben realizar las autoridades ambientales regionales de Colombia y para el Plan y Programa Nacional de que trata el Decreto 870 de 2017.

- Permita conocer la dinámica y cuantificar (balance hídrico) las principales variables del ciclo del agua al interior del ecosistema, tales como precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía.
- Permita conocer la dinámica y cuantificar de las variables de caudal y flujos subterráneos que aporta el ecosistema de páramo a las cuencas y sistemas acuíferos.
- Permita determinar las características y condiciones de calidad del agua que aporta el páramo.
- Permita elaborar una línea de referencia para el seguimiento de los servicios ambientales que prestan los ecosistemas de páramo.
- Permita evaluar las afectaciones en la regulación hídrica, la cantidad y calidad de agua y cambios en el uso del suelo en estos ecosistemas.
- Sea un monitoreo viable y sostenible en el tiempo.

## 2.1 Preguntas a responder con el monitoreo hidrológico en los páramos

En el proceso de desarrollo del Protocolo se analizaron diferentes planteamientos sobre cómo abordar el monitoreo hidrológico en estos ecosistemas de tal manera que considere las necesidades e intereses y se oriente a dar respuesta a preguntas sobre:

- ¿Cuánta agua (flujo superficial y subterráneo) aportan los complejos de páramo de Colombia a las cuencas y acuíferos y a que altura?
- ¿Cómo se comportan las variables que intervienen en las fases del ciclo del agua (al interior del ecosistema) precipitación, evapotranspiración, infiltración, escorrentía?
- ¿Cuáles son las principales variables y parámetros a medir para cuantificar el agua que se produce en el páramo y su distribución espacial y temporal y como identificar las áreas estratégicas dentro de estos ecosistemas?
- ¿Cuál es la distribución espacial y temporal del agua (superficial y subterránea) que emerge de los páramos de Colombia, flujo base sostenido, recarga de acuíferos?
- ¿Cuál es la trayectoria de los flujos superficiales y subterráneos y las conexiones río-humedal-manantial-acuífero?
- ¿Cuáles son las características y condiciones de calidad ecológicas del agua que emerge del páramo, flujos superficiales y subterráneos en términos físicoquímicos e hidrobiológicos?



- ¿Cómo afecta el uso del suelo y sus formas de manejo (conservación, agropecuario, infraestructura) la regulación hídrica? Escalas: Local y regional.
- ¿Cómo afecta el uso del suelo y sus formas de manejo la cantidad de agua que provee el páramo? Escalas: Local y regional.
- ¿Cómo afecta el uso del suelo y sus formas de manejo la calidad de agua que provee el páramo? Escalas: Local y regional.
- ¿Cuáles son los principales factores que intervienen en la capacidad de retención y regulación hídrica como servicio ambiental que presta el páramo y como medir su efecto en la respuesta hidrológica superficial y subterránea?

## 2.2 Propósito del monitoreo hidrológico en ecosistemas de páramo en Colombia

El propósito del monitoreo hidrológico en los páramos de Colombia, como se concibe en este protocolo, es conocer, evaluar y hacer seguimiento del (estado, composición, dinámica e interacciones de los proceso del ciclo del agua en los páramos) y por ende de los servicios que prestan estos ecosistemas andinos en términos de disponibilidad hídrica, capacidad de regulación y condiciones de calidad del agua.

### Objetivos específicos

- Generar información y conocimiento sobre las variables del ciclo del agua en los páramos, sistemas de flujos superficiales, sub-superficiales y subterráneos y sus conexiones.
- Generar datos e información de variables del ciclo del agua en páramos que permitan el desarrollo, calibración y validación de modelos hidrológicos apropiados para estos ecosistemas, así como, la validación de variables generadas a partir de sensores remotos y otros métodos (Precipitación, evapotranspiración, humedad del suelo, humedad relativa) con cubrimiento regional de los complejos de páramos en el país.
- Aportar información hidrológica para la gestión integrada del agua en cuencas y acuíferos de orden regional (subzonas y niveles siguientes).
- Aportar insumos para la generación de información sobre efectos ocasionados en la hidrología por las acciones que se realicen sobre los páramos (deforestación, (re)forestación, agricultura, restauración u otras de interés).

### 2.3 Alcance estratégico

Las preguntas e intereses identificados abarcan los componentes básicos del ciclo del agua e involucran la necesidad de generar datos e información a varios niveles de resolución espacial y temporal. Esto indica que es necesario definir diferentes niveles de aproximación para generar conocimiento e información de manera gradual y sistemática que aporte a procesos de planificación, gestión y toma de decisiones sobre el agua en los ecosistemas de páramo.

Si bien los procesos naturales y la interacción mutua sociedad - naturaleza transcurren en el tiempo sobre el espacio tridimensional continuo se debería disponer de información casi en cada momento y en cada punto de este espacio. (Pabón, J.D García M., et al 1997 (base conceptual del diseño de una red de...)). Las mediciones in situ son el método básico para la obtención de datos sobre los procesos naturales pero estas mediciones son muy costosas. Por esta razón y dado que en la actualidad es posible obtener información a partir de otras tecnologías como los sensores remotos, la combinación de métodos de obtención de información hidrológica y meteorológica, y otras características es un camino pertinente y eficiente.

En este sentido el alcance del protocolo apunta a obtener información para diferentes niveles de aproximación utilizando la observación y mediciones in situ como puntos de relevancia que sirvan además para ajustar otros métodos de obtención de la información y calibrar o validar modelos hidrológicos.

Como parte determinante para dimensionar el monitoreo hidrológico en los páramos se plantea potenciar al máximo el uso de información proveniente de la red de estaciones que ya existe en los territorios de los complejos de páramo y sus áreas de influencia, que cuentan con series históricas de diferentes longitudes para las variables hidrológica y meteorológicas. Como se mencionó en el estado del monitoreo del agua en páramos, en el país operan actualmente al menos 200 estaciones de monitoreo en los complejos de páramo (delimitación escala 1:25000).

Por otro lado en estos lineamientos se propone el uso de técnicas y tecnologías que ayuden a mejorar el cubrimiento espacial y temporal de la información obtenida a partir de las variables medidas in situ, con la obtención de variables a partir de sensores remotos (de uso libre), la modelación y técnicas de isotopía e hidroquímica. Se espera hacer eficiente y viable la medición in situ a partir de estaciones o puntos de monitoreo continuo.

La isotopía e hidroquímica son particularmente relevantes para mejorar la comprensión de los procesos que ocurren en acuíferos complejos donde la identificación de zonas de recarga y las conexiones entre las aguas

superficiales y subterráneas y su variabilidad en el espacio y el tiempo, precisa la utilización de técnicas multidisciplinarias para dar respuestas a interrogantes concretos.

Con estas técnicas se espera identificar recargas indirecta desde los ríos hacia el agua subterránea, y el papel de estas en el mantenimiento del caudal base en los ríos y el nivel de los humedales en la zona de descarga. Con las técnicas mencionadas anteriormente y con mediciones de niveles de aguas superficiales y aguas subterráneas, es posible mejorar la comprensión de estos procesos.

Además se plantea el uso de bioindicadores los cuales proporcionan información sobre la calidad ecológica del agua de las últimas semanas o meses sobre contaminación. Estos bioindicadores complementan la información sobre parámetros físico-químicos que sólo proporcionan información del momento de muestreo. Los indicadores biológicos proporcionan información ecológica del hábitat que no puede ser obtenida mediante los físico-químicos. Esto es sumamente importante cuando los estudios de calidad del agua se realizan, no sólo con el objetivo de detectar contaminaciones o vertimientos, sino con el objetivo de proteger los sistemas naturales.

Con el alcance propuesto se espera dar lineamientos para tener un cubrimiento general a nivel de los 36 ecosistemas de páramo con algún grado de verificación y validación con estaciones existentes, con la modelación hidrológica (celdas) , balance hídrico en el área de estudio (Complejo de Páramo) identificar en estas áreas donde es preciso utilizar técnicas de isotopía e hidroquímica para mejorar el conocimiento de los procesos e interacciones, calibrar el modelo y mejorar el balance hídrico (**Figura 13**).



**Figura 13.** Unidades de análisis y escalamiento del monitoreo hidrológico en los páramos

## 3. COMPONENTES PROGRAMÁTICO Y OPERATIVO

Con base en el propósito y alcance estratégico se define un procedimiento y desarrollo general de la metodología desde los análisis iniciales aplicables en los 36 los complejos de páramo, hasta los criterios de diseño y principales características del sistema de observación y medición, así como el programa de monitoreo para un complejo de páramo una vez priorizado.

57

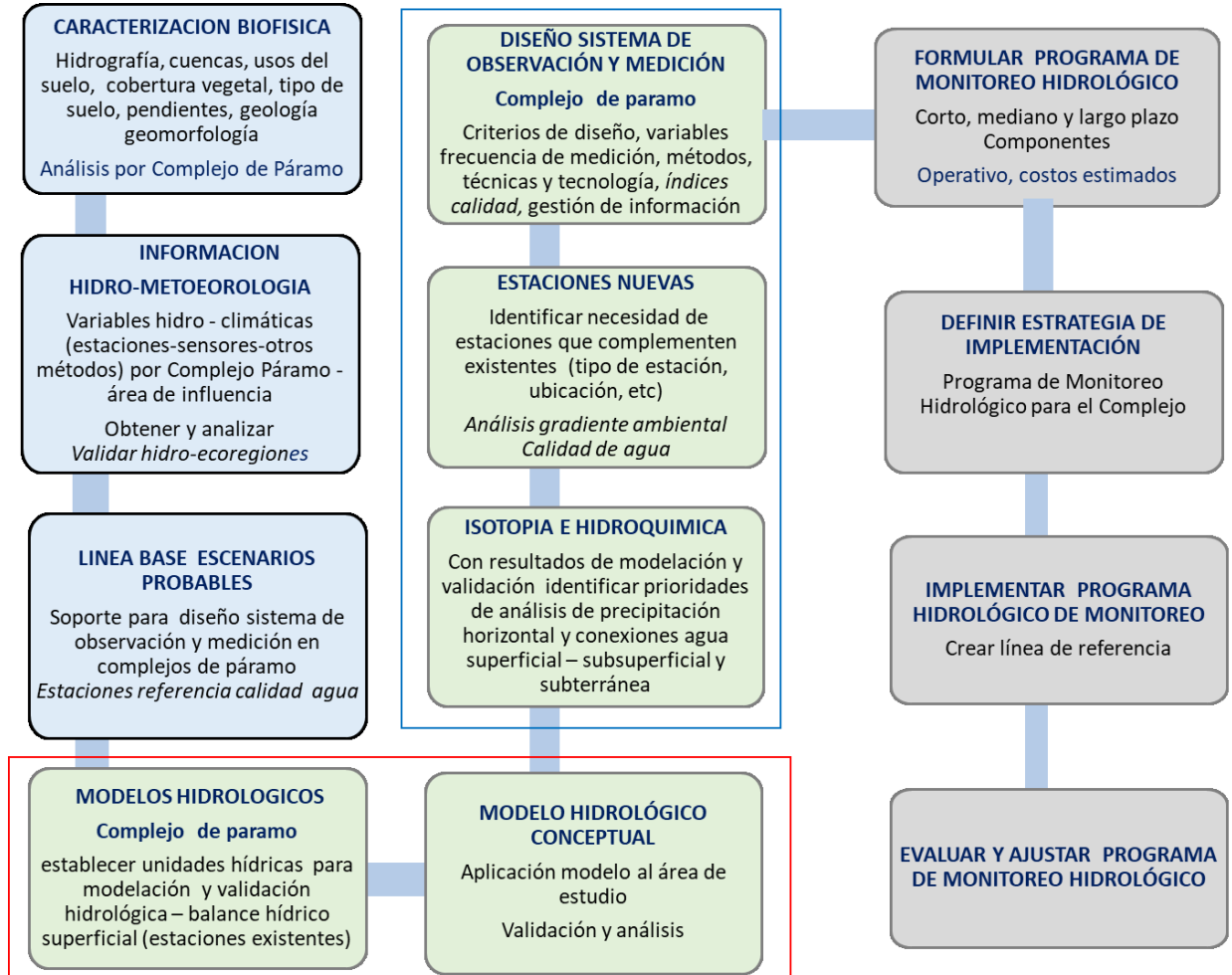
### 3.1 Procedimiento general

El procedimiento general para avanzar en el monitoreo hidrológico en los páramo de Colombia, desde unidades de trabajo (complejos de ecosistemas de páramo) hasta unidades de mayor resolución priorizadas en función de tener un control hidrológico para calibración y validación de modelos. El esquema de la Figura 10 muestra una propuesta a seguir en el proceso de monitoreo hidrológico en páramos para el país.

La propuesta conforma tres grupos de actividades las dos primeras en función de las unidades de análisis espaciales, resolución de la información y grado de incertidumbre en particular asociados con los proceso de verificación, calibración y validación de los modelos. El tercer grupo tiene relación con la formulación de los programas de monitoreo su estrategia de implementación, evaluación y ajuste.

*El primer grupo* considera como unidad de trabajo y para un análisis general de los todos los Complejos o para un solo Complejo de páramo, incluyendo áreas de influencia (en función de estaciones de monitoreo hidro-meteorológicas existentes). A partir de las características biofísicas y con variables climatológicas obtenidas por sensores remotos y estaciones en tierra, para verificación, se consigue una primera aproximación de características de los complejos en su conjunto y por complejo. Se obtienen datos de variables principales en toda el área tanto en el páramo como en el área de influencia mediante sensores remotos y estaciones hidro-meteorológicas como se explica en el punto 3.2 de este documento.

Con base en el análisis de las características y criterios definidos en función de los objetivos del monitoreo se construye una línea base de escenarios probables y se establecen las unidades hídricas (cuencas) por complejo de páramo.



**Figura 14.** Proceso metodológico para monitoreo hidrológico en páramos

En paralelo, con base en el análisis de las características biofísicas y de variables hidrológicas y meteorológicas, se validan las hidro-ecoregiones preliminares que definió el IDEAM para el establecimiento de estaciones de referencias de monitoreo de calidad de agua.

*El segundo grupo* considera como unidad de análisis cada complejo de páramo. Para el complejo en estudio se hace análisis de las principales variables (Insumos) para realizar modelación hidrológica y balance hídrico por celda (no menores de 50 km<sup>2</sup>). La modelación hidrológica (en área de páramo y área de influencia definida para el Complejo) se realiza con modelos acoplados los cuales responden cada uno a diferentes

variables. Los modelos se calibran y validan donde se cuenta con estaciones de control hidrológico (caudales). Con base en lo anterior se establece el modelo hidrológico conceptual para unidades hídricas del área de estudio.

Con base en los resultados y para mejorar la calibración de los modelos se identifica donde es prioritario hacer análisis de precipitación horizontal y flujos subterráneos y conexiones agua superficial- agua subterránea, esto último con apoyo de técnicas de isotopía e hidroquímica en estas unidades. No se cambian los datos para que calibre el modelo sino se analizan los procesos físicos y la forma de determinar y cuantificar las variables. La aplicación de estas técnicas es parte del sistema de observación y medición que se diseñe para el Complejo de páramo en estudio.

Para cuencas de similares características dentro del mismo Complejo o en otros complejos se deduce que el modelo es aplicable y no se tendría que instalar estaciones de monitoreo nuevas mientras las condiciones no cambien, principalmente de cobertura vegetal y uso del suelo. Para cuencas donde no hay estaciones es necesario incluir dentro del diseño del sistema de monitoreo y el programa de monitoreo.

Con los análisis de las principales variables, balances hídricos y la validación de modelos de algunas unidades hídricas se diseña el sistema de observación y medición para el complejo teniendo en cuenta las estaciones existentes y los requerimientos prioritarios de monitoreo de variables en cuencas donde no se cuenta con estaciones. En el análisis se incluye también el de gradiente ambiental para el monitoreo de calidad de agua y la definición de índices.

*El tercer grupo* se relaciona con la formulación de programa de monitoreo hidrológico a corto, mediano y largo plazo de los componentes atmosférico, superficial y subterráneo (cantidad, calidad, variabilidad). En este programa se tiene como base el diseño del sistema de observación y medición, criterios de operación y mantenimiento, costos e implementación en el corto, mediano y largo plazo. Para viabilizar el programa se define una estrategia de implementación para el complejo de paramo cuyo proceso inicial se orienta a obtener una línea de referencia, evaluación del programa de monitoreo hidrológico y ajuste. Como parte del proceso de implementación del Programa se establece la línea de referencia y la adaptación de los índices de calidad de agua.

### 3.2 Monitoreo agua atmosférica y superficial. modelos de análisis

Se propone utilizar la modelación como herramienta para crear escenarios de las condiciones hidrometeorológicas, junto con una base de datos de sus principales variables, que permitan realizar el monitoreo y evaluación de los cambios espacio-temporales en los páramos de Colombia.

La insuficiente información hidrometeorológica con la que se cuenta en las zonas de páramos, suscita el principal inconveniente para correr modelos confiables y de una suficiente resolución espacio-temporal.

La propuesta es aprovechar la información meteorológica que se genera y se ha generado a partir de sensores remotos, corriendo modelos con estos datos de entrada y luego calibrando, validando y ajustando estos modelos con la información generada en estaciones hidrometeorológicas existentes (inicialmente) con el fin de obtener una primera aproximación a las condiciones reales de las zonas de interés. Esto permitirá crear líneas bases de información y escenarios probables, determinando las áreas de mayor prioridad para monitoreos puntuales. Convirtiendo el modelo en la herramienta para representar el comportamiento espacio-temporal de los fenómenos físicos, y realizar proyecciones sobre la variabilidad hidrológica a futuro, optimizando el número de estaciones necesarias en campo para un monitoreo detallado de los páramos.

Las principales variables meteorológicas a analizar en las zonas de páramos usando los sensores remotos son la *precipitación, temperatura, evapotranspiración, viento y humedad relativa*. Además de usar toda la información cartográfica sobre *coberturas vegetales, pendientes, y usos de la tierra*, derivadas de estas técnicas de teledetección, para realizar *mediciones indirectas de infiltración, escorrentía y precipitación horizontal*. La Tabla 3 muestra un resumen de algunos de los componentes que participan dentro del modelo.

**Tabla 3.** Parámetros generales dentro del modelo.

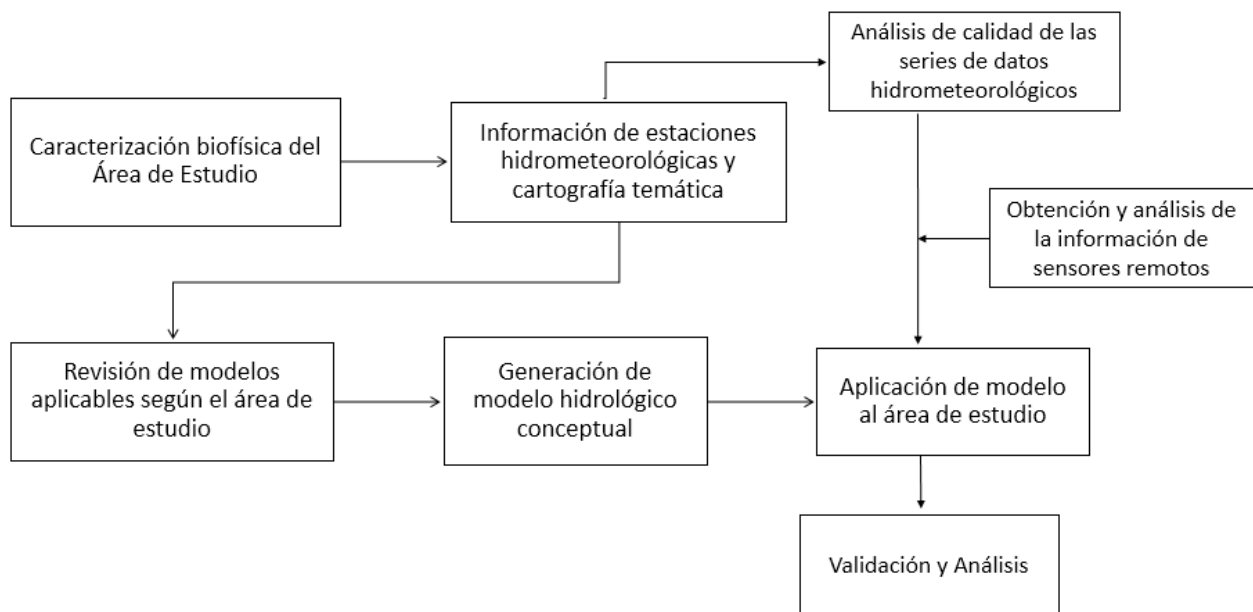
Componente del modelo	Estimación/Presunción	Fuente
Identificación de ríos / afluentes, límites de las cuencas y áreas influenciadas.	Modelo general y conectividad hidrológica / Sin suposiciones.	NASA’s Earth Observing System Data and Information System. <a href="http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/">http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/</a>
Usos del suelo, coberturas vegetales, tipo de suelos, pendientes y geomorfología.	Se asume que las clases y tipos son adecuados para determinar la respuesta hidrológica de la cuenca /se estima la infiltración y escorrentía, número de curva.	Uso de la tierra, Shapefile para diferentes años. Modelos de elevación.
Variables climatológicas: diarias y mensuales. (Precipitación, temperatura radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa y presión de vapor de agua).	Promedios en banda de elevación cada 500 m, por cuenca y régimen pluviométrico/ completar series de datos con promedios diarios. / Sin suposiciones	Estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera de la cuenca. Información satelital y sensores remotos. Repositorios internacionales con información de reanálisis. <a href="http://worldclim.org/version2">http://worldclim.org/version2</a> <a href="https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/browse-reanalysis-datasets">https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/browse-reanalysis-datasets</a>

**Fuente:** Mercado O, 2017

### 3.2.1 Propuesta metodológica

La metodología general de trabajo que se propone es una adaptación de la planteada por Camacho en 2003 (Figura 15). No obstante, aunque el estudio se focaliza en los páramos en Colombia, es importante aclarar que cada páramo como unidad tiene características únicas que impiden pensar en realizar extrapolaciones e interpretaciones sobre el estado o comportamiento de los mismos a partir de los resultados de algún área estudiada, lo que implica que aunque la metodología de trabajo es un marco que cubre cualquiera que sea el páramo que se estudie, el modelo necesariamente debe ser ajustado según el páramo de interés.





**Fuente:** Mercado O, 2017

**Figura 15.** Metodología de trabajo. Adaptado de Camacho (2003)

El modelo propuesto para el monitoreo deberá cumplir con tres características. Debe ser de tipo probabilístico, distribuido y continuo, permitiendo que a partir de múltiples escenarios probabilísticos de baja resolución espacio-temporal, inclusive con datos hidrometeorológicos iniciales sin validar, se robustezcan los resultados a medida que nueva información es incorporada. A continuación se realiza una breve descripción de las etapas que se desarrollan dentro de esta metodología.

### 3.2.1.1 Caracterización biofísica del área de estudio

Una clara descripción y caracterización biofísica del estado actual del área de estudio, es el insumo que permite al experto poder en primera instancia confiar en los datos con o sin validación, provenientes de sensoramiento remoto, y en proponer lugares puntuales para la instalación de estaciones de monitoreo hidrometeorológico. La caracterización biofísica compone elementos esenciales del espacio físico, fauna, flora, usos y actividades antrópicas. Mucha de esta información es de carácter secundaria y corresponde a estudios previos o investigaciones puntuales, pero su corroboración o actualización es indispensable.

Los elementos biofísicos a caracterizar son:

- Geología y Geomorfología: Descripción general de la geología, hidrogeología y geomorfología, realizando especial énfasis en las áreas de recarga hídricas, cuerpos de aguas subsuperficiales, y áreas susceptibles a procesos de erosión y remoción en masa.
- Fisiografía y suelos: Caracterización fisiográfica y elementos del paisaje, descripción edafológica y podológica de los suelos, usos y actividades.
- Climatología: Descripción climatológica del área, zonificación por franjas altitudinales
- Hidrología: Descripción y zonificación de cuencas, subcuencas y microcuencas, zona y formas de drenaje, áreas inundables.
- Vegetación: Caracterización de usos de hábitats y especies.
- Fauna: Caracterización de usos de hábitats y especies.

Aunque muchos de estos elementos no se incorporan directamente dentro de los modelos, si representan condiciones puntuales que pueden no ser descritas por un modelo con resoluciones espaciales muy grandes, y que en su momento pueden ser interpretados como desviaciones o errores, pero que gracias a estas caracterizaciones pueden cambiarse manualmente dentro del modelo.

### 3.2.1.2 Revisión de modelos aplicables según el área de estudio

Tobón y Gil (2007), presentan una serie de modelos hidrológicos aplicables a las zonas de páramo, que con una buena calibración y validación representarían de gran manera la realidad de estos sistemas naturales. Entre los modelos propuestos que permiten la incorporación de información proveniente de sensores remotos tenemos el SWAT y el TETIS.

Para el caso de monitoreo en páramos el modelo que inicialmente mejor se ajusta a las necesidades es el SWAT (Soil & Water Assessment Tool), al cual necesariamente se le deben realizar algunas adaptaciones y modificaciones. Este modelo simula muy bien diferentes procesos hidrológicos con diferentes niveles de heterogeneidad espacial y temporal, y su enfoque es netamente biofísico. Aunque también se usaran otros modelos conceptuales de base física como son el TOPMODEL y el SPHY que son de código abierto y permiten obtener información que se puede incorporar al SWAT. Los principales *insumos que alimentan a estos modelos* son la *topografía, suelos, cobertura, y toda la información hidrometeorológica*, con los cuales se analizan factores de cambio en variables climáticas como la *precipitación, humedad relativa, radiación solar, y temperatura, todas a nivel predictivo*.

Cada uno de los modelos implementados permitirá reconocer pesos de las variables de entrada del modelo, que incrementan incertidumbre y que modifican de una manera relevante los resultados del modelamiento, permitiendo categorizar y jerarquizar las diferentes variable para priorizar dentro del monitoreo. Ahora, esto no quiere decir que porque el modelo ajuste con un mínimo de variables, la demás puedan ser descartadas o subvaloradas, es importante evitar generalizaciones y por el contrario buscar relaciones o correlaciones, a veces; el parámetro menos persistente y marcado puede ser el detonante para cambios drásticos.

### 3.2.1.3 Obtención y análisis de la información de sensores remotos

Dada la necesidad de representar de una forma puntual las condiciones hidrometeorológicas de los páramos en Colombia, y conociendo la poca información y la baja cobertura de estaciones en estas áreas, es importante resaltar la gran cantidad de información generada desde los métodos de percepción remota sobre las variables meteorológicas a diferentes escalas temporales y espaciales. Esta información es de fácil acceso y puede ser validada y ajustada a diferentes resoluciones para ser incorporadas a modelos físicos, gracias a las diferentes técnicas de escalado. La información del sensoramiento remoto se encuentra en diferentes repositorios y es producto de iniciativas globales con bases de datos gigantes sobre proyecciones de las diferentes variables meteorológicas como precipitación y temperatura. Estas estimaciones pueden ser usadas dentro de los modelos para crear series de tiempos locales y pueden ser validadas a partir de datos puntuales recogidos en estaciones en tierra. Evaluando las capacidades predictivas de diferentes modelos y calibrando los de mejor comportamiento en el tiempo.

La información de sensores remotos per se, ya es una forma de monitoreo a una escala gruesa y permite construir líneas bases con escenarios probabilístico multi-temporales, que no se logran con información puntual extrapolada en el espacio y en el tiempo. Continuamente realizamos comparaciones entre mapas generados a partir de información de sensores remotos y los contruidos a partir de interpolaciones desde datos puntuales, y aunque las diferencias en valores absolutos medidos por lo general son bastante altas, sus correlaciones son muy fuertes, lo que permite realizar ajustes en las dos direcciones.

La escasez de datos es bastante común en estas zonas altas de montaña, ya sea por su complejidad para la ubicación de estaciones o por la heterogeneidad de estas zonas que implicarían un gasto enorme por la densa red de estaciones que necesitarían. Es por esto que los instrumentos de percepción remota cobran una gran importancia al recopilar datos a partir de observaciones provenientes de imágenes infrarrojas y visibles. *Además de los satélites de tipo geoestacionarios, se tienen los sensores de microondas pasivos en satélites de órbita polar capaces de realizar estimaciones cuantitativas de precipitación, pero con una menor*

*frecuencia temporal*. Otra importante herramienta que se está implementando en el país es el uso de los sensores de microondas o radares activos, produciendo una información con una gran precisión sobre las dimensiones de la precipitación. Además de todos los datos meteorológicos que se generan en este tipo de sensores también es importante recordar que la información de coberturas y suelos es de una gran calidad.

#### 3.2.1.4 Información de estaciones hidrometeorológicas y cartografía temática

A través de las estaciones hidrometeorológicas es posible realizar un monitoreo puntual de una zona, aunque con las limitaciones que esto trae. Para poder monitorear de manera precisa y con alta resolución grandes áreas, sería necesaria una densa red de estaciones, y aun así, para la obtención de resultados confiables en los análisis serían necesarios años de recopilación de series de tiempo de las variables recolectadas.

En el caso de la cartografía temática requerida como se mencionó anteriormente, en la etapa de caracterización biofísica, mucha de esta cartografía no será incluida directamente en los modelos, pero si constituye una fuente de corroboración y ajuste del modelo y de los resultados. En el caso de los modelos propuestos es importante contar como insumo cartográfico con los mapas de coberturas y tipos, y usos de los suelos a un gran nivel de detalle.

Para el caso de los páramos en Colombia la información hidrometeorológica es bastante escasa, el número de estaciones ubicadas en los páramos es limitado y mucha de la información con la que se cuenta son de estaciones que ya no se encuentran en funcionamiento y se ha perdido la continuidad en el registro. Sin embargo esta información es muy valiosa y es el insumo principal para poder hacer la calibración y validación de los datos que se generen a partir de los modelos.

El modelado y la calidad de los datos de salida no solo dependerán de los de entrada, sino también de los datos que se usen para validar y calibrar los modelos, obtener datos confiables de escorrentía e infiltración dependerá de un buen modelo de elevación digital y de la cartografía de tipo de suelos que se tenga, pero será más importante la información sobre precipitación y evapotranspiración con la que se cuente para validar el modelo.

#### 3.2.1.5 Análisis de calidad de las series de datos hidrometeorológicos

Un paso muy importante dentro de la metodología de trabajo es la realización del análisis de la calidad de las series de datos a incorporarse a los modelos, tanto los provenientes de los repositorios internacionales, ya sea productos de sensores remotos o de reanálisis de información climatológica, y de los provenientes de las estaciones hidrometeorológicas. Contar con datos de incertidumbre y errores asociados, podrá descontar

trabajo a la hora del análisis de los resultados y someterá a cada variable o parámetro estudiado a una validación individual dentro del modelo. Los análisis de calidad se enfocaran en medidas de consistencia y persistencia, así como filtros de umbrales sobre comportamiento histórico y correlaciones con otras variables meteorológicas o parámetros físicos del área de interés.

### 3.2.2 Generación de modelo hidrológico conceptual

El uso integrado de técnicas de modelado con los sistemas de información geográfica, permite realizar un análisis masivo de información en un corto tiempo, obviamente dependiendo de las dimensiones espaciales del área analizada y el volumen de datos ingresados, ya sea por su alta frecuencia de muestreo o por su longitud temporal. Un modelo conceptual responderá principalmente a dos factores, la resolución espacial y temporal de los datos y la calidad de los mismos. Un modelo muy robusto puede acarrear un gasto computacional innecesario si los datos no son confiables, mientras que modelos de fácil acceso y simplificados pueden arrojar muy buenos resultados si los datos de entrada han pasado por un proceso de selección y análisis de calidad exhaustivos.

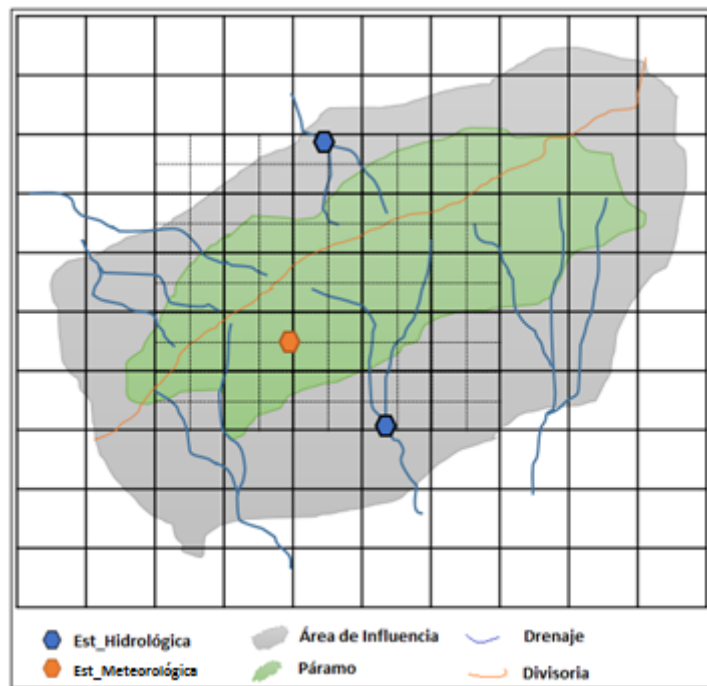
Cada uno de los modelos propuestos para el monitoreo de los páramos en Colombia, son en sí, un conjunto de herramientas conceptuales que pueden usarse para simular procesos muy particulares dentro del modelo general hidrológico y que permitirán medir la dinámica e influencia de una variable en particular dentro del modelo general. La simplicidad de cada uno de los modelos propuestos estará sujeto a la distribución espacio-temporal de la información que se tenga como insumo.

Para la elaboración del modelo hidrológico conceptual es necesario conocer las condiciones generales de cada área de interés, el comportamiento de las variables hidrometeorológicas y su influencia en el desarrollo natural de los ecosistemas que se encuentran. *La escala es el primer parámetro a considerar*, en el caso de los páramos aún son deficientes las definiciones y delimitaciones espaciales de estos dentro de los ecosistemas de alta montaña, la propuesta va dirigida a trabajar a una escala de pequeñas cuencas que vayan entre 1 y 5 km<sup>2</sup>, con tamaños de celdas de cálculos no menores a 50 metros, dentro de una gran Cuenca que no supere los 50 km<sup>2</sup> dentro de la cual se pueda contar con información de una estación en tierra.

*Otro parámetro* muy importante y que en principio es el que nos da las condiciones de línea base a los modelos, es el de *la topografía*, el cual se relaciona directamente con la *densidad de la red de drenaje*, es indispensable contar con un DEM de muy buena resolución, para poder realizar estimados de escorrentía e

infiltración confiables. Para realizar estos cálculos la base conceptual es la *estimación de los índices topográficos para cada una de las celdas de la cuenca definida*.

La Figura 16, describe la forma como se discretiza la zona para realizar balances hídricos por celda dentro del modelo, permitiendo ajustar el número de celdas y el tamaño de las mismas en función de la resolución espacial de los datos de entrada y pudiendo diferenciar los aportes realizados por cada una de las celdas al balance, con lo cual se puede separar y estimar el real aporte del páramo como unidad, además de determinar el lugar donde sería necesario ubicar una estación hidrológica.



**Fuente:** Mercado O. 2017

**Figura 16.** Esquema de modelamiento de las zonas de páramo

Después de la topografía *los suelos son el otro parámetro determinante* para algunos autores la mayor parte del volumen de agua proveniente de las lluvias puede infiltrarse en los suelos debido a la baja intensidad de las mismas, a no ser que ya se encuentre saturados o encharcados.

*La variable más importante* dentro de nuestros modelos es *la precipitación*, normalmente, se produce en forma de lluvia vertical, pero dentro de los páramos es necesario cuantificar la precipitación horizontal, a la

cual algunos autores asocian con un valor hasta del 60% del total de la precipitación presentada en estos ecosistemas.

### 3.2.3 Aplicación del modelo al área de estudio

Cada área es un estudio particular de condiciones únicas, y en el caso de los páramos compuestos por varias cuencas, cada una de ellas pueden ser distintas, por ellos se propone trabajar con modelos distribuidos de base física, que permitan simular los flujos hidrológicos, de manera total, pero partiendo de cálculos de infiltración, flujo superficial, saturación, flujo subsuperficial, en celdas uniformes y de igual tamaño.

*La escala temporal* será en series de tiempo definidas según los datos disponibles pero el objetivo se enfoca en escalas horarias hasta máximo de un día, para después realizar agregaciones a diferentes escalas.

El modelo aplicado a hidrología siempre presenta unos supuestos que permiten acotar el problema y simplificar los cálculos, para el caso de los modelos propuestos es necesario realizar una serie de asunciones como son: que el gradiente hidráulico del flujo subsuperficial es igual a la pendiente de la superficie terrestre; que la descarga lateral real es proporcional al área específica de la cuenca; la redistribución del agua dentro del subsuelo se puede aproximar mediante una serie de estados consecutivos constantes; y que los diferentes perfiles del suelo en cada punto tiene una capacidad finita para transportar el agua hacia abajo.

*Los parámetros y variables de entrada básicos para realizar la modelación* son: el modelo de elevación digital del área, este parámetro condiciona en gran medida el tamaño de las celdas en las que dividiremos el área; los mapas de cobertura y de suelos a una escala similar a la del modelo de elevación preferiblemente, y por supuesto los datos de variables meteorológicas de precipitación, la temperatura, evapotranspiración, la humedad del aire, la radiación solar, la velocidad y dirección del viento en diferentes rangos altitudinales, y por último la precipitación horizontal que constituye uno de los grandes retos para obtener valores acertados y confiables. Además de los datos de caudal medidos en puntos definidos para realizar la calibración y validación de los datos.

El éxito de los modelos aplicados está sujeto casi en su totalidad a la calidad y cantidad de datos que se tengan para correrlos, es por eso que quizás la mayor dificultad y grueso del trabajo se concentrara en tener estos datos como el modelo los necesita, entonces previo a la implementación de los modelos se debe estructurar una base de datos espacializada que contenga la información de todas las variables y parámetros necesarios para la implementación de los modelos, esta base de datos no solo debe contener los datos crudos,

sino que *debe tener campos con las incertidumbres calculadas y datos a diferentes filtros y niveles de calidad.*

#### 3.2.4 Validación y análisis

La validación de los datos se realiza a partir de un análisis de sensibilidad, donde se evalúa individualmente cada parámetro y el mejor valor de sensibilidad obtenido se usa para realizar la calibración del modelo, realizando corridas que permitan medir la eficiencia del modelo. El factor de eficiencia se escoge en función de las incertidumbres de los valores medidos por las estaciones, y se utilizara un factor de correlación lineal no menor al 0.8 para los datos de salida final.

La validación de los modelos obviamente se podrá realizar en los páramos donde se cuenta con información de estaciones hidrológicas y meteorológicas que nos aportan datos que permitan obtener balances hídricos, mientras que en las zonas de páramos donde no se cuente con este tipo de estaciones es necesario instalar de manera puntual en los lugares que se determinen gracias al mismo modelo y que puedan ser articulados con otro tipo de monitoreos de tipo biológicos y físico-químicos.

Con base en los resultados y para mejorar la calibración de los modelos se identifica donde es prioritario hacer análisis de precipitación horizontal y flujos subterráneos y conexiones agua superficial- agua subterránea, esto último con apoyo de técnicas de isotopía e hidroquímica en estas unidades.

Con el análisis de las principales variables y balances hídricos y la validación de modelos de algunas unidades hídricas se diseña el sistema de observación y medición para el complejo teniendo en cuenta los requerimientos prioritarios de monitoreo de variables y que no cuentan con estaciones.

En el marco del Programa de Monitoreo Hidrológico que se defina para el complejo de paramo es necesario desarrollar nuevos análisis y diseños de sistemas de mantenimiento y actualización de protocolos, basados en requerimientos derivados de la metodología de trabajo (Figura 1) y la aplicación del modelo hidrológico conceptual. Un ejemplo de estos subsistemas (sistema de mantenimiento), es aplicable cuando se prevén o hay cambios en la caracterización biofísica del área de estudio; en este caso los datos relacionados con cambios en el uso del suelo y en la cobertura vegetal, necesitarían un análisis de su efecto en la aplicación del modelo hidrológico conceptual.



### 3.3 Monitoreo de flujos y conexiones entre aguas superficiales, sub superficiales y subterráneas. Aporte de la isotopía y la hidroquímica

El monitoreo desde el punto de vista hidrológico, debe apuntar a generar insumos para evaluar los procesos que gobiernan la regulación hídrica y la oferta del agua (superficial y subterránea) en el Páramo y sus ecosistemas asociados.

En los capítulos anteriores se han presentado los elementos conceptuales para la aplicación de las técnicas isotópicas en los estudios de los ríos y cuerpos de agua superficial (humedales, lagos, embalses), los cuales en conjunto con los flujos subsuperficiales y profundos, representan el funcionamiento hidrológico del Páramo y sus ecosistemas asociados.

El interés de realizar un estudio integral de los compartimentos del ciclo hidrológico en estas zona, comprende la definición de los procesos que gobiernan la regulación hídrica y la oferta del agua (superficial, subsuperficial, subterránea) en los ecosistemas de Páramo y Alta Montaña y así, generar insumos para mejorar la gestión del recurso hídrico y garantizar estos servicios ecosistémicos a las generaciones futuras.

Con las técnicas mencionadas anteriormente y con mediciones de los niveles de aguas superficiales y aguas subterráneas, es posible mejorar la comprensión de estos procesos.

“Los isótopos pueden utilizarse para investigar las fuentes de aguas subterráneas y determinar su origen, su forma de recarga, si existe riesgo de intrusión o contaminación por agua salada, y si es posible utilizarlas de manera sostenible”. (OIEA, SF).

Los isótopos estables del agua  $^2\text{H}$  (Deuterio) y  $^{18}\text{O}$  (oxígeno 18), en conjunto con la hidroquímica, son “utilizados frecuentemente para identificar las trayectorias de flujo, conexión entre aguas subterráneas-aguas superficiales (ríos, quebradas, humedales, lagunas), mezcla de aguas, intrusión marina, evaporación en ríos, lagunas”. (Mook, 2002). Ésta identificación parte de la caracterización hidroquímica, donde se evalúa la variación espacial de la conductividad eléctrica, las facies hidrogeoquímicas y la variación de iones mayoritarios en función del medio geológico y se definen las primeras hipótesis sobre el sentido de flujo. Posteriormente, se evalúa el gradiente altitudinal isotópico de la precipitación y se compara con el contenido isotópico del agua subterránea, infiriendo la altura a la cual se recarga el agua subterránea y por lo tanto, los sistemas de flujo.

La comparación del *contenido isotópico en  $^{18}\text{O}$*  y la *conductividad eléctrica* del agua sub-superficial y subterránea (ríos, humedales, embalses) constituye un insumo indispensable para la evaluación de las conexiones del agua superficial y subterránea. A una frecuencia adecuada, es posible identificar la cantidad de flujo base que aporte el agua sub-superficial o subterránea al agua superficial. Asimismo, es posible identificar si los sistemas de humedales aportan agua al sistema de flujo subterráneo.

Las técnicas hidroquímicas en conjunto con la isotopía, suelen ser una herramienta de estudio potente para identificar conexiones entre el agua de precipitación, subsuperficial y subterránea, problemas de contaminación, aporte de flujo base, dependencia del caudal de ríos con la precipitación entre otros. Para hacer un buen uso de esta técnica, es necesario contar con información ambiental básica concerniente a: régimen climatológico, información hidrológica, cartografía geológica y geomorfológica, inventario de puntos de aguas subterráneas incluyendo manantiales. Con base en esta información y en salidas de reconocimiento en campo, se precisa el objetivo y alcance del monitoreo en el componente de hidroquímica e isotopía.

### 3.3.1 Procedimiento metodológico aplicación de isotopía e hidroquímica en el monitoreo hidrológico

El esquema metodológico para la implementación del monitoreo hidroquímico e isotópico en la zona objeto del protocolo se presenta en la Figura 16, teniendo como base el procedimiento metodológico general de la Figura 14. Las áreas de interés para identificar las conexiones de aguas superficiales-subsuperficiales-subterráneas y los sistemas de flujo, deben ser seleccionadas a partir de la priorización de los complejos de páramos. Esta selección deberá seguir como mínimo los siguientes criterios:

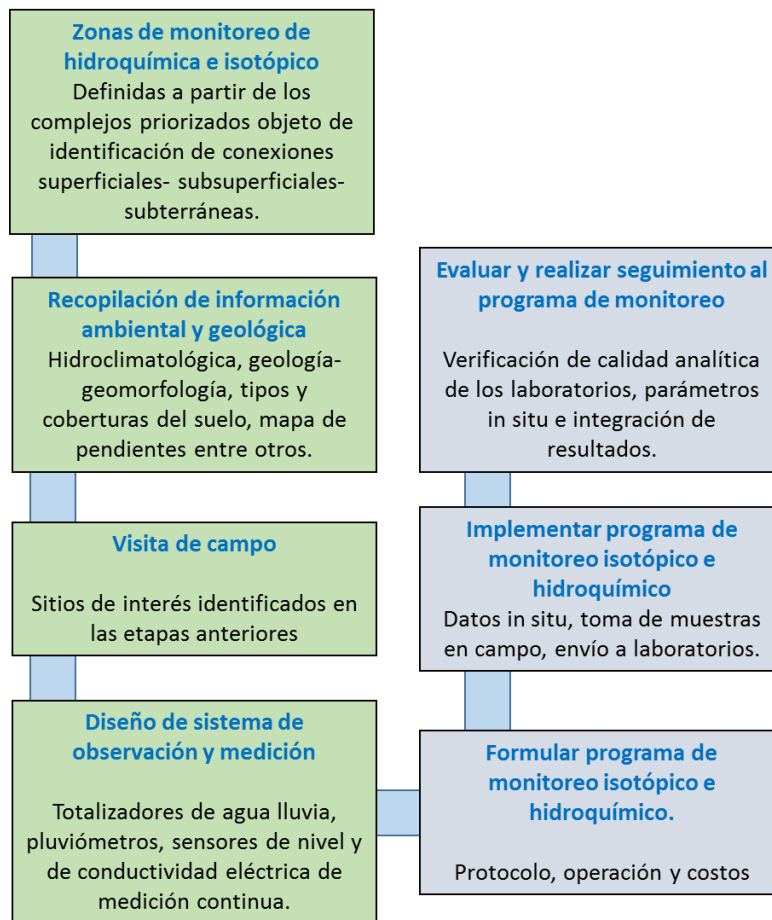
- Necesidad actual y futura del recurso hídrico para abastecimiento y diferentes actividades económicas.
- El contexto geológico y geomorfológico debe presentar propiedades óptimas para una posible infiltración del agua proveniente de la precipitación, relacionado con una permeabilidad media-alta, pendientes moderadas a planas, sistema de fallas y estructuras geológicas que permitan la infiltración del agua, con el fin de tener como hipótesis una posible alimentación del agua subsuperficial-subterránea a los sistemas de agua superficiales, así como condiciones para los sistemas de flujo. Este criterio debe ser evaluado por un conjunto de profesionales expertos en el tema.

- Existencia de manantiales, debido a que estos son los puntos que representarán los sistemas subsuperficiales y subterráneos.
- Facilidad para instrumentar los sistemas de aguas superficiales (humedales, lagunas, ríos, quebradas) y realizar el monitoreo continuo de puntos de agua. Este criterio es especialmente determinante para seleccionar los sitios de interés, dado que instalar y mantener estaciones de medición de nivel hidrológico en zonas de alta montaña puede presentar limitaciones de acceso para la instalación.

Posterior a esta etapa, se recopilará información de carácter hidrometeorológico, geológico, estructural, uso y cobertura del suelo, pendientes, red hídrica entre otras pertinentes. La información debe ser consultada en los documentos y bases de datos de las instituciones nacionales-IDEAM, Ministerio de Ambiente, ANLA, Servicio Geológico Colombiano, Instituto Alexander Von Humboldt- y regionales como las Autoridades Ambientales, Academia y empresas privadas.

Con base en esta información, se procederá a organizar una visita de campo, con el objetivo de verificar la información compilada, evaluar la factibilidad y la posible ubicación de las estaciones totalizadoras, identificar puntos de aguas subterráneas (pozos, aljibes, manantiales) y gestionar la ubicación de las estaciones de precipitación, agua superficial y subterránea.

Asimismo, se procede con el diseño e implementación del sistema de medición y observación con el fin de caracterizar la precipitación, agua superficial y subterránea. La implementación del programa implicará el muestreo de datos in situ y de muestras para análisis en el laboratorio. Una vez obtenidos estos resultados, se procede a realizar una verificación de los parámetros in situ y de los análisis fisicoquímicos e isotópicos con base en criterios técnicos y con el conocimiento geológico-ambiental de las zonas seleccionadas.



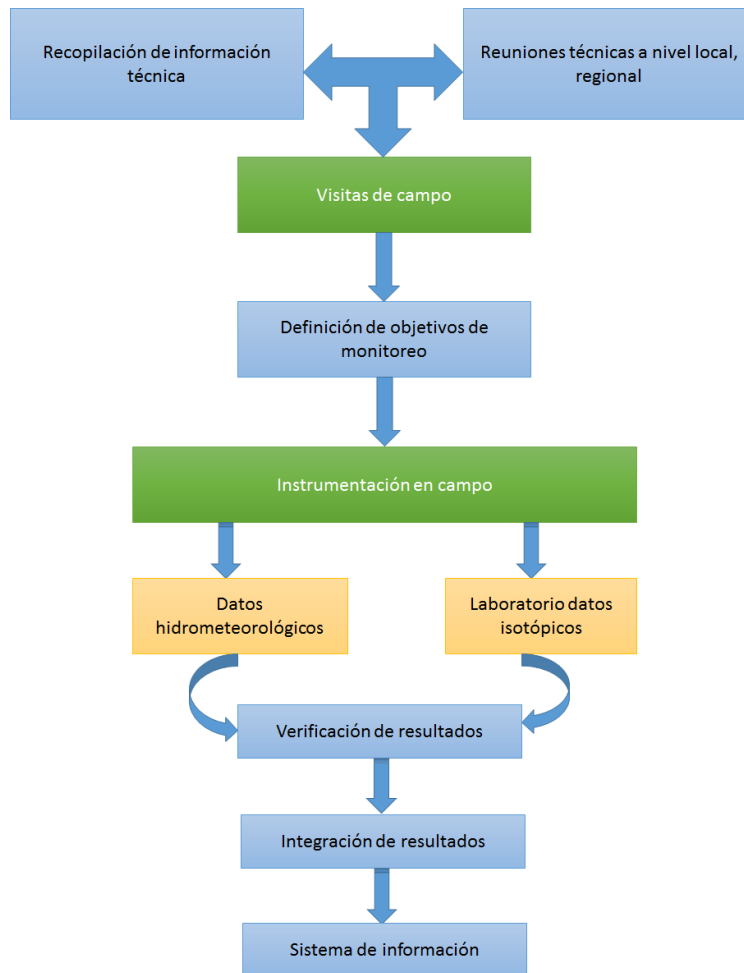
Fuente: Campillo A, 2017

Figura 17. Proceso metodológico para monitoreo hidroquímico e isotópico en áreas seleccionadas

Una vez se verifiquen los datos, se procederá a integrar los resultados y a evidenciar necesidades de cambios en el diseño del programa.

### Procedimiento específico en campo

En el ítem anterior, se presentó el procedimiento general para la aplicación de la isotopía e hidroquímica en las áreas seleccionadas. El siguiente esquema (Figura 18) refuerza este procedimiento.



Fuente: Campillo A, 2017

**Figura 18.** Procedimiento para mediciones de isotopía e hidroquímica

La instrumentación en campo implica tener identificado los componentes del ciclo hidrológico que se encuentran presentes en el área seleccionada: precipitación, ríos, manantiales, pozos, aljibes, laguna-humedales. Se deben recuperar las mediciones de precipitación diaria y de nivel –caudal en el caso de quebradas, ríos, manantiales y humedales.

El monitoreo hidroquímico comprende variables in situ y variables que se analizan en el laboratorio. Las variables in situ corresponden al pH, Temperatura, Conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, potencial redox, los cuales se miden por medio de una sonda multiparamétrico. Esta sonda debe ser calibrada cada día, de acuerdo con el manual de usuario y se debe siempre corroborar que los

sólidos disueltos totales se encuentren entre el 55-76% de la conductividad eléctrica medida. Estos análisis deben realizarse en los manantiales, ríos, humedales, pozos, y aljibes. Dado la importancia de la conductividad eléctrica como trazador, es conveniente instalar sensores de medición automáticos que permitan la medición de este parámetro a una frecuencia diaria o menor cuando se presentan humedales y ríos.

Para el análisis de los iones mayoritarios  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  se deben recolectar las muestras siguiendo los lineamientos del “Protocolo del Agua-Ideam” y preservando las muestras con base a lo indicado por el laboratorio.

### 3.3.2 Casos de aplicación de hidrología isotópica en páramos y los sistemas relacionados

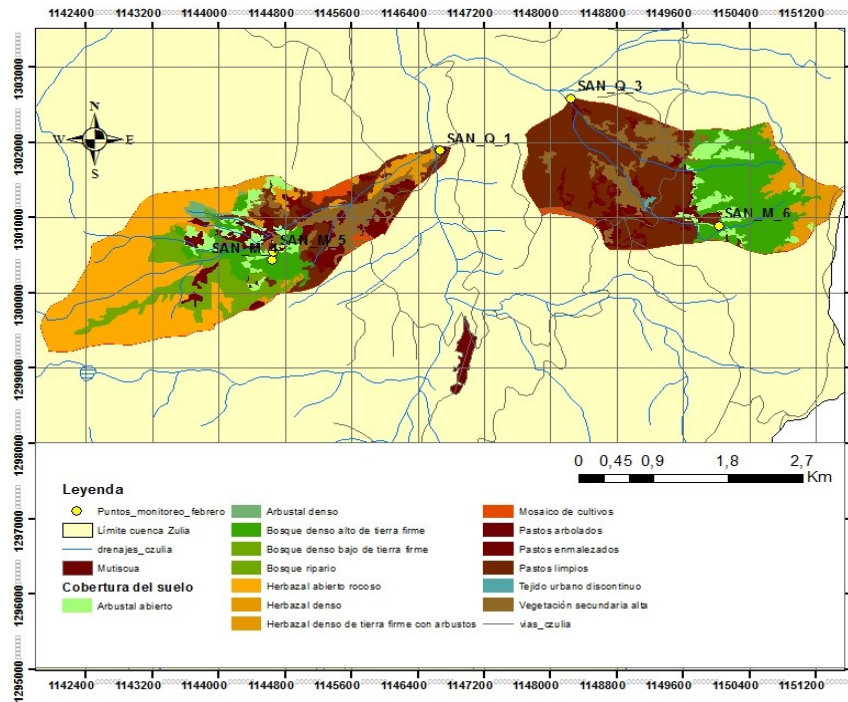
A la fecha de este documento se ha recopilado la información de los estudios hidroquímicos e isotópicos realizados en el páramo de Santurbán, Colombia y en una microcuenca del río Zhuruca y en los páramos de Quimsacocha en la ciudad de Cuenca, Ecuador y en la reserva ecológica Antisana, Ecuador. Asimismo, se han llevado a cabo discusiones técnicas con el equipo que está implementando un monitoreo isotópico en una cuenca piloto del municipio de Mutiscua, Páramo de Santurban en el departamento de Norte de Santander. Este último, con el objetivo de evaluar la capacidad de regulación y el caudal base.

El propósito de los casos de estudios consultados tiende a mejorar y comprender el conocimiento sobre la regulación hídrica en el sistema de Páramo, incluyendo el monitoreo de corrientes superficiales, humedales y flujos subsuperficiales y subterráneos. Adicionalmente, se aplican los isótopos ambientales para identificación de flujos locales, intermedios y regionales en áreas, donde la cuenca abastecedora es el Páramo.

El tamaño de las áreas y por lo tanto, la frecuencia del monitoreo varía de acuerdo al objetivo planteado. Se presenta un estudio localizado con un área menor de  $8 \text{ km}^2$  con un monitoreo semanal y otros estudios con áreas de  $1000 \text{ km}^2$ . En éste, la frecuencia de monitoreo es menor (quincenal, mensual), puesto que los tiempos de transporte a la salida de la cuenca son menores. Asimismo, los estudios recolectados, abarcan alturas desde los 1.000 m.s.n.m hasta los 5.000 m.s.n.m y algunos incluyen áreas de glaciar.

### Caso aplicación en Mutisca – Páramo de Santurban Norte de Santander

Recientemente, se ha implementado un monitoreo isotópico en la zona rural del municipio de Mutiscua ubicado en áreas del Páramo de Santurbán en el departamento de Norte de Santander (Figura 19). El monitoreo se realizó durante un año aproximadamente y tenía por objetivo generar insumos para responder las siguientes preguntas: i) ¿cómo es la composición isotópica de la precipitación en esta zona de Colombia?, ii) ¿cuál es el aporte real de la precipitación en los niveles de las quebradas?, iii) ¿cuál es el mecanismo preferente para la generación y sostenimiento de los cuales en esta zona?, iv) se encuentran relacionados la composición isotópica de los manantiales y de las quebradas?, v) ¿a qué altura se estaría recargando los manantiales, existirían flujos regionales?, vi) qué cantidad de caudal base se puede inferir en cada quebrada a partir de un balance de masas isotópico?, vii) ¿existe alguna diferencia entre las dos quebradas?. Para esto se seleccionaron dos microcuencas: Quebrada Valegra y La Caldera. Figura 19 (COSUDE & GIS-LAC 2018).



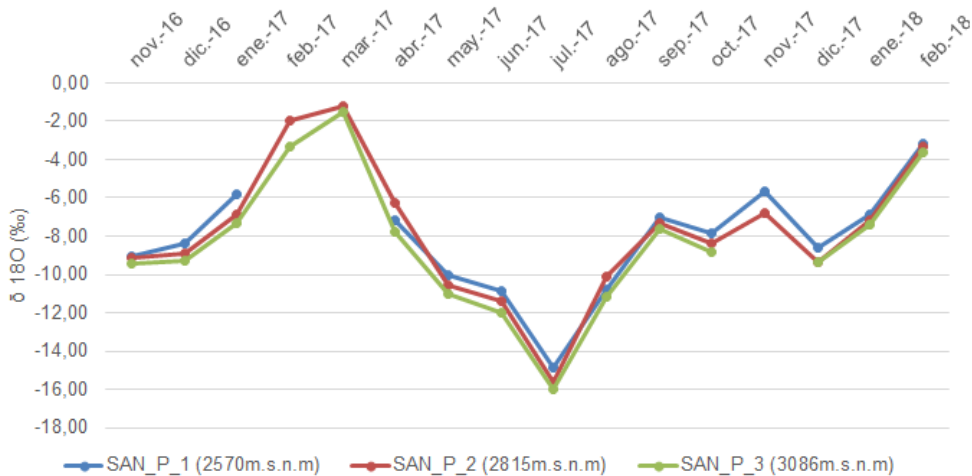
Fuente: (COSUDE & GIS-LAC 2018).

Figura 19. Localización zona de estudio proyecto Mutiscua

Las variables ambientales a monitorear fueron: i) los isótopos estables del agua (oxígeno 18 y deuterio) como trazadores naturales en la precipitación, aguas superficiales (quebradas) y en aguas subterráneas (manantiales en este caso), ii) el monitoreo del caudal a la salida de las cuencas y iii) medida diaria de la precipitación en cada microcuenca.

El monitoreo isotópico de la precipitación se realizó en tres estaciones por medio de totalizadores mensuales a 2570, 2815 y 3086 m.s.n.m. Se tomaron muestras mensuales y semanales para análisis isotópicos en las dos quebradas y se tomaron muestras de 5 manantiales. Un único manantial fue monitoreo durante 7 meses. Los análisis fueron realizados en el laboratorio *ura 20*LAMA de la Universidad de Montpellier en Francia con Incertidumbres de 0,08‰ y 0,5‰ para el O<sup>18</sup> y <sup>2</sup>H respectivamente. (COSUDE & GIS-LAC 2018).

La composición isotópica de la precipitación presenta una variación entre -3,15 a -14,90 para SAN\_P\_1; -1,23 a -15,62 para SAN\_P\_2; -1,49 a -15,99 ‰ de δ<sup>18</sup>O. Asimismo se observa una variación de -10,5 a -112,0 para SAN\_P\_1; 5,4 a -116,1 para SAN\_P\_2; 5,3 a -117,5‰ para SAN\_P\_3 de δ<sup>2</sup>H. El exceso en deuterio presenta variaciones entre 7,1 y 17,3‰, de lo cual se infiere que ninguna muestra ha estado sometida a evaporación y que el proceso de reciclaje se encuentra presente en algunas muestras. Figura 20. (COSUDE & GIS-LAC 2018).



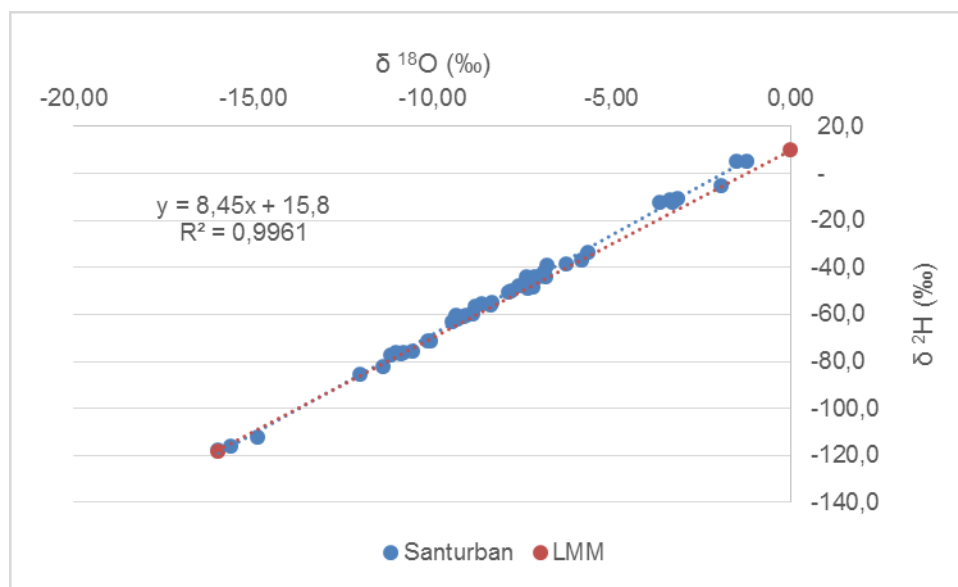
Fuente: (COSUDE & GIS-LAC 2018).

Figura 20. Variación temporal de la composición isotópica de la precipitación



El comportamiento temporal de esta composición se encuentra correlacionado con la variación temporal de la precipitación, encontrando valores más empobrecidos en los meses más lluviosos y valores más enriquecidos en los meses más secos (febrero, marzo). (COSUDE & GIS-LAC 2018).

La caracterización isotópica de la precipitación en este trabajo, culmina con la obtención de la Línea Meteorica Regional presentada en la Figura 21.



**Fuente:** (COSUDE & GIS-LAC 2018).

**Figura 21.** Línea Meteorica Regional.

La Línea Meteorica Regional presenta una pendiente de 8,45, similar a la línea Meteorica Mundial. El intercepto resultante es de 15,8, el cual se encuentra por encima del intercepto de la Línea Meteorica Mundial -10-. De lo anterior se infiere que las muestras de agua meteorica no presentan evaporación y que por el contrario, podrían estar sometidas a un importante proceso de reciclaje. (COSUDE & GIS-LAC 2018).

La homogeneidad de la señal isotópica del Manantial El Arrayán a lo largo de los meses, sugiere que este manantial no se encuentra afectado por la precipitación directamente y que el agua se ha infiltrado a una altura superior a los 3.100 m.s.n.m. Asimismo, a partir de la composición isotópica de los otros manantiales

se puede establecer que el agua se ha infiltrado en el rango de la altitud de las estaciones de precipitación: entre 2570 y 3100 m.s.n.m. (COSUDE & GIS-LAC 2018).

Las variaciones de las quebradas se consideran homogéneas en el tiempo y se encuentra atenuada con respecto a la precipitación, lo cual sugiere que el mecanismo hidrológico preferencial, por el cual se mantienen los caudales no es la precipitación y por el contrario, esta actúa como fuente de recarga de agua en los suelos (COSUDE & GIS-LAC 2018).

### 3.3.3 Variables y frecuencia de medición

Las variables y la frecuencia de medición dependerán del objetivo del monitoreo, de las particularidades de cada zona y de la extensión del área objeto de monitoreo. En términos generales, la hidroquímica y los isótopos ambientales son útiles para identificar los sistemas de flujos y conexiones entre los diferentes reservorios, acompañados de la información de niveles, precipitación y conductividad eléctrica y en la

**Tabla 4** se listan las frecuencias y equipos para cada variable.

Es necesario recolectar la información hidrológica de las quebradas y ríos principales de la zona de estudio, dado que esta información puede proveer unas primeras hipótesis sobre los tiempos de tránsito, descarga, afectaciones de la precipitación al nivel, tiempo de respuesta a la precipitación y esto ayudará a ser más eficiente el protocolo.

**Tabla 4.** Variables y frecuencia de monitoreo del componente hidroquímico e isotópico.

Tema	Variables	Frecuencias	Equipos
	<p>Temperatura, pH, Sólidos Disueltos Totales, Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto</p> <p>Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup></p>	<p>En áreas grandes se recomiendan mediciones mensuales o quincenales. En áreas pequeñas, las mediciones deben realizarse a la escala diaria y máximo semanal.</p> <p>En términos generales, es suficiente con realizar dos mediciones al año: fin temporada húmeda, fin temporada seca.</p>	<p>Para mediciones semanales, quincenales o mensuales se puede hacer uso de un equipo multiparamétrico para medir todas las variables. Si las mediciones de conductividad eléctricas deben ser tomadas a escala diaria, se recomiendo instalar medidores automáticos que registran datos a nivel horario e inclusive a menor frecuencia.</p> <p>El laboratorio proporcionará todo el equipo (botellas de plástico o vidrio) esterilizado, necesario para llevar a cabo el muestreo. El personal sólo tendrá que disponer de bombas de filtración in situ y de un equipo multiparamétrica para tomar los parámetros in situ en cada medición.</p>

<b>Sistema de flujos</b>	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^2\text{H}$	En áreas grandes se recomiendan mediciones mensuales o quincenales de la precipitación y agua superficial. En áreas pequeñas, las mediciones deben realizarse a la escala diaria y máximo semanal de la precipitación y agua superficial. Las muestras de manantiales podrán tomarse a nivel mensual, quincenal, semanal o diario dependiendo de cada área. Las muestras de pozos o aljibes deben tomarse al final de la época de sequía y al final de la época húmeda.	Se recomiendan botellas de vidrio de 30ml color ámbar con contra tapa. Disponer de bombas de filtración in situ y de un equipo multiparamétrico para tomar los parámetros in situ en cada medición.
	$\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{14}\text{C}$ , CFC, $^3\text{H}$ (validación)	Estos análisis son útiles para validar la edad del agua en sistemas donde la química y los isótopos estables del agua, han mostrado flujos regionales en los cuales el agua puede ser antigua.	De acuerdo con el laboratorio.
	Nivel, Caudal, Precipitación	En áreas grandes se recomiendan mediciones diarias del nivel de los ríos principales. En áreas pequeñas, las mediciones deben realizarse a la escala horaria.	Sensores de nivel, diver de presión

### 3.4 Monitoreo de la calidad del agua en páramos

El objetivo del monitoreo de calidad de agua en ecosistemas de páramos es “identificar de manera sistemática la calidad de los cuerpos acuáticos de páramos para la creación de una línea base que sirva a nivel nacional y la determinación de unas condiciones de referencia, que a su vez sirvan para el control y mantenimiento de los servicios ecosistémicos y el fortalecimiento del conocimiento de los páramos”.

Este análisis de la calidad ecológica permite asegurar el estudio del medio acuático natural y el mantenimiento del mismo, ya que los valores obtenidos en el análisis de un punto de muestreo son directamente comparados con las condiciones de referencia, es decir, los valores que se obtendrían de los diferentes parámetros si la estación fuera prístina o con unas condiciones muy bajas de contaminación e influencia antrópica.

Tras la revisión del estado actual, se ha observado una deficiencia en la información generada hasta el momento, siendo los parámetros físico-químicos los más usados, con un incipiente uso de los bioindicadores, y siendo los parámetros microbiológicos usados en relación al uso del agua para consumo

humano. Así, se ha considerado de especial interés la aplicación de metodologías de implementación y protocolos de muestreo y análisis internacionales que han sido aplicados en páramos mediante el proyecto CERA (Calidad Ecológica de Ríos Altoandinos) en Ecuador y Perú.

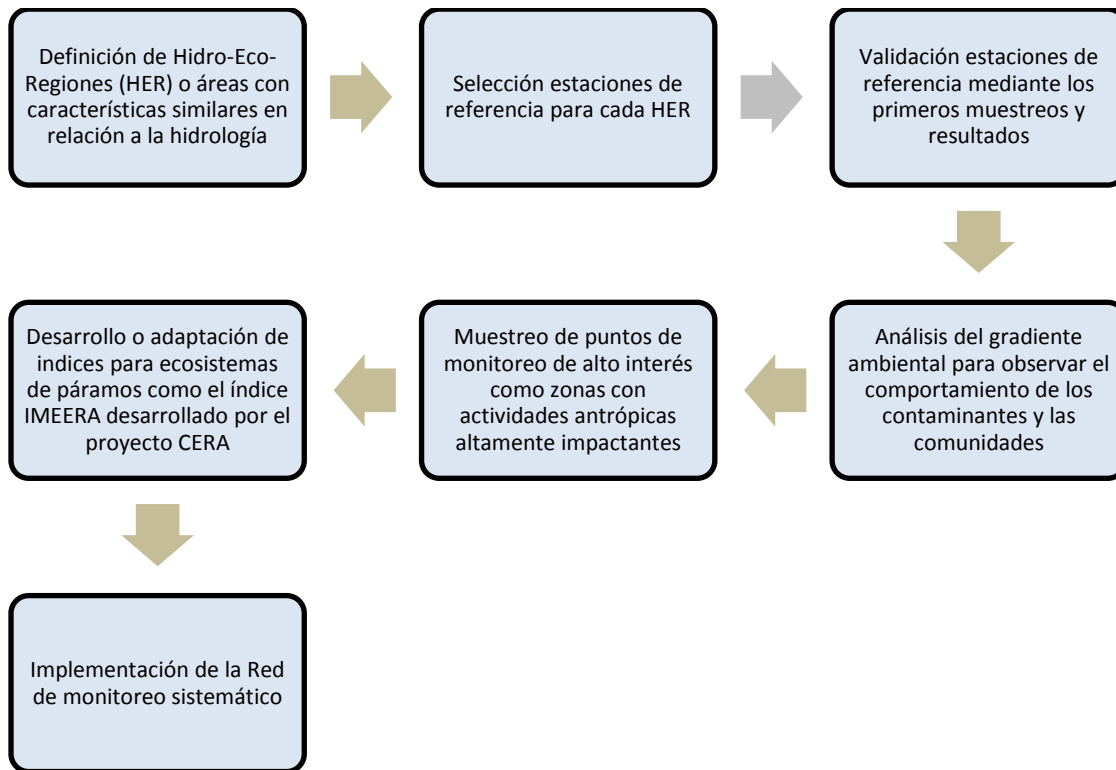
En base a esta información se han determinado los parámetros óptimos para la obtención de información de calidad sobre la calidad del agua. Además, teniendo en cuenta las dificultades técnicas y económicas, así como administrativas y logísticas, de las diferentes entidades públicas nacionales para el desarrollo de campañas de muestreo, análisis y, en general, implementación de una red de monitoreo en ecosistemas de páramos, se identifican unas variables fisico-químicas e hidrobiológicas mínimas, que permitan la sostenibilidad del monitoreo.

En este proceso, se han considerado las aguas superficiales, de igual forma que las aguas subterráneas y las aguas lluvia, llevando a cabo el mismo procedimiento y teniendo en cuenta los diferentes factores específicos de cada tipo de agua. Además, en el caso de las aguas subterráneas y las aguas lluvia, se ha trabajado en paralelo con el tema de la isotopía con el fin de reducir los costos y esfuerzos del muestreo.

### 3.4.1 Procedimiento metodológico para la implementación del seguimiento de la calidad del agua en ecosistemas de páramos

Uno de los servicios ecosistémicos de los páramos es la calidad del agua que proporciona, la cual, sirve al abastecimiento de un porcentaje muy importante de la población colombiana, además de proveer un hábitat único a especies de organismos acuáticos. Dado que los páramos se encuentran en las zonas altas de la mayoría de las cuencas hidrográficas, esta calidad del agua influencia la que se encuentra aguas abajo.

Con base en la información recolectada de los diferentes proyectos y estudios llevados a cabo en estos ecosistemas únicos y en el desarrollo de redes de monitoreo nacionales, se propone una Hoja de Ruta para la implementación del análisis de la calidad del agua en páramos, la cual consta de 7 etapas (Figura 22. Propuesta de hoja de ruta para la implementación del análisis de calidad de agua en los páramos) principales, a saber:



**Fuente:** L.García, 2017.

**Figura 22.** Propuesta de hoja de ruta para la implementación del análisis de calidad de agua en los páramos

La calidad del agua: en la mayoría de los casos, las cabeceras de los ríos poseen una calidad de agua elevada debido a la baja influencia antrópica que han recibido. Esto se extiende a las cuencas hidrográficas, siendo los páramos, en algunos casos, la parte más elevada de la cuenca, con menor influencia humana y con menor recorrido a lo largo de la cuenca lo que aumenta la concentración de elementos provenientes de la erosión natural y/o artificial de los suelos y rocas. Esto permite asegurar que los páramos, en condiciones naturales, proporcionan una calidad de agua muy elevada, que es otro motivo por el que sus aguas son usadas para la provisión de agua potable en grandes ciudades como Quito y Bogotá D.C.

### 3.4.2 Aguas superficiales

A continuación se presentan recomendaciones para la implementación del estudio de la calidad del agua en ecosistemas de páramos, basadas en el análisis del estado del arte en el país y a nivel internacional y en el marco conceptual previamente presentado.

#### 3.4.2.1 Condiciones de referencia para el análisis de la calidad del agua

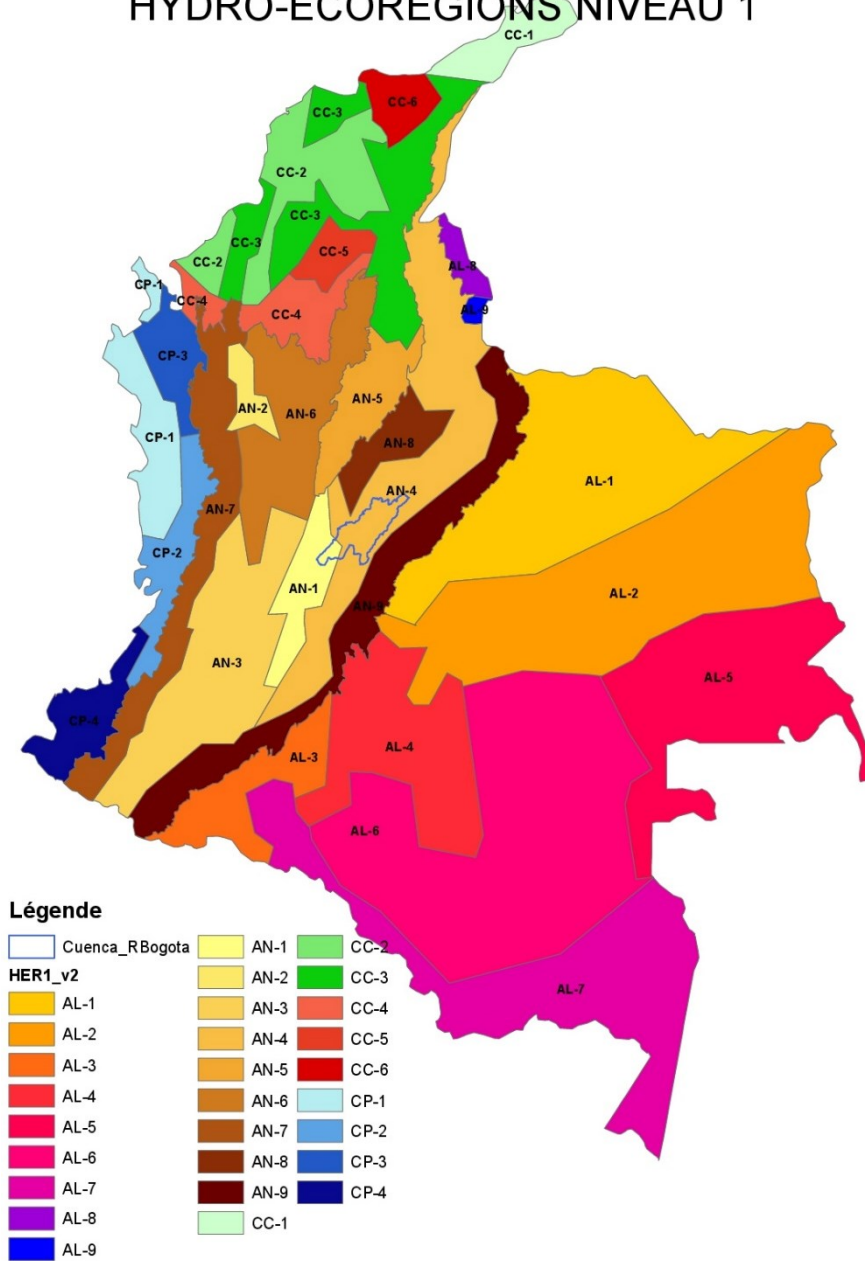
En relación con las condiciones de referencia, y con el objetivo de realizar un análisis de las mismas más sencillo, en diversos países se lleva a cabo la delimitación de las Hidro-Eco-regiones que son aquellas regiones cuyas condiciones físicas y climáticas son similares en lo relativo a la hidrología.

Estas regiones se delimitan en función del relieve, la geología del terreno y el clima, caracterizando las grandes discontinuidades naturales del espacio. Así se obtienen mapas con las regiones con condiciones similares, en las cuales se espera que las condiciones de referencia sean las mismas.

Este esfuerzo se llevó a cabo en Colombia en 2015 mediante el proyecto de cooperación internacional entre la Embajada de Francia y el IDEAM, obteniéndose 4 grandes dominios, que se dividieron de la siguiente forma en Hidro-Eco-regiones (**Figura 23**).

- Los Andes: dividida en 9 Hidro-Eco-Regiones
- La costa Caribe, que consiste en 6 HER
- La costa Pacífico con 4 HER
- La Amazonia y los Llanos con 9 HER

## HYDRO-ECOREGIONS NIVEAU 1



Fuente: (ASCONIT, 2014)

Figura 23. Hidro-ecoregiones definidas para Colombia.



El mapa muestra esta delimitación de hidroecoregiones donde se observan las hidroecoregiones de la zona de los Andes (todas cuya nomenclatura comienza con AN), las de la Costa Caribe (con nomenclatura CC), la costa pacífico (CP) y la Amazonía y los Llanos (la nomenclatura comienza por AL).

Cada una de las 28 hidroecoregiones mostradas en el mapa son áreas con condiciones de geología, relieve y clima similares por lo que se espera que las condiciones hidrológicas sean suficientemente cercanas para que las condiciones de referencia sean las mismas. Si este mapa se compara con la delimitación de los páramos se podría observar diferentes tipos de estos ecosistemas en función de las variables mencionadas previamente, lo que facilitaría la localización de las estaciones de referencia.

Esta división permite que se puedan establecer estaciones de referencia en cada una de las Hidro-Eco-Regiones, sin necesidad de ubicar estaciones para la obtención de condiciones de referencia en cada una de las cuencas, disminuyendo así los costos del monitoreo para la obtención de esta línea base.

Basándose en este ejercicio a nivel nacional se pueden obtener las Hidro-Eco-Regiones relativas a los ecosistemas de páramo, llevando a cabo el mismo ejercicio a mayor resolución espacial, con el objetivo de determinar los páramos que son similares en condiciones que afectan a la hidrología y, más específicamente, a la calidad del agua. Así se podrían ubicar estaciones de condiciones de referencia en cada una de las HER y no en cada uno de los páramos.

### **Condiciones de referencia**

Una de las principales fases del establecimiento de una red de monitoreo del recurso hídrico es el establecimiento de las condiciones de referencia, que sirvan posteriormente, para la obtención de datos fiables de degradación/recuperación del sistema y de seguimiento a la calidad del agua. Para ello, en primer lugar se requiere el establecimiento de las estaciones viables como estaciones de referencia, las cuales deben encontrarse situadas en zonas prístinas, sin impactos humanos o con actividades antrópicas que no afecten la calidad del agua. En el caso de páramos, se pueden establecer dos clases de estaciones de referencia:

- *Las estaciones de referencia para el monitoreo de páramos:* en este caso, teniendo en cuenta la superficie de los páramos y el nivel de intervención de muchos de ellos, se recomienda la clasificación de los páramos según las diferencias en clima y geología, que son los factores que más influyen la calidad de las aguas de forma natural. Posteriormente, se pueden seleccionar los páramos menos intervenidos de cada tipo y establecer las estaciones de referencia en los mismos, asegurando que no existan actividades humanas que puedan contaminar los cuerpos acuáticos en las

proximidades. Estas estaciones se recomienda que se sitúen en la parte media, altitudinalmente hablando, o en la parte inferior del páramo, para asegurar que el páramo ha realizado su función natural en la calidad del agua.

- *Las estaciones de referencia a nivel nacional:* estas estaciones son las que servirán como condiciones de referencia a nivel nacional para la comparación de los resultados obtenidos en las diferentes cuencas y el establecimiento de la desviación de las condiciones naturales del río. Estas estaciones deben situarse lo más alto posible para cumplir totalmente con el concepto de condiciones de referencia establecido a nivel internacional.

Dado que el objetivo de este protocolo es la determinación de la calidad del agua para el pago por servicios ambientales, el primer tipo de estaciones de referencia deben ser implementadas, mientras que el segundo tipo son opcionales, ya que quedan fuera del objetivo principal de este protocolo. Además, cabe señalar que, algunas de las estaciones que se sitúen en páramos para el monitoreo de la calidad ecológica de los sistemas acuáticos, podrán ser utilizadas, posteriormente, como condiciones de referencia a nivel nacional, una vez se estudie su ubicación e impactos cercanos. Esto es debido, a que todos los páramos que han sido poco intervenidos tendrán unas condiciones prístinas o casi prístinas, por lo que, aunque no se encuentren en la parte más alta del páramo, podrían ser usadas como condiciones de referencia para el desarrollo de la implementación de la red a nivel nacional, mientras se obtienen recursos para aumentar el número de estaciones en el país.

Como se observa, se requiere llevar a cabo un estudio de la cartografía y la información existente, así como reconocimientos de campo para poder establecer dónde se deberían ubicar las estaciones de referencia. Además una vez la ubicación de los puntos de monitoreo se ha determinado, se debe llevar a cabo un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos tras el muestreo y el procesamiento de las muestras en laboratorio para asegurar que las estaciones han sido correctamente ubicadas y no existen influencias antrópicas. Esto se debe a que en ocasiones la contaminación puede llegar por escorrentía sub-superficial hasta el punto de muestreo, lo que no se ha podido observar en el reconocimiento de campo, pero se puede detectar en los datos obtenidos. Esto se puede considerar un control de calidad del trabajo de selección de los puntos de muestreo de referencia.

#### 3.4.2.2 Criterios de priorización de monitoreo

Como se ha mencionado previamente, inicialmente se debe llevar a cabo un estudio de los tipos de páramos para poder seleccionar estaciones de referencia para cada tipo. Una de las prioridades evidentes es el

monitoreo de dichas *condiciones de referencia* para obtener una línea base que sirva para la determinación de la calidad real y objetiva de todas las estaciones situadas en páramo.

Posteriormente, se deben tener en cuenta *criterios de desarrollo de índices o indicadores* con el objetivo de desarrollar un conocimiento apropiado de las diferentes variables ambientales y ecológicas. Así se debe tener en cuenta que, una vez determinadas las estaciones de referencia, se deben incluir en el monitoreo estaciones representativas del gradiente de contaminación o de impactos antrópicos, es decir, se requiere aumentar la red con estaciones donde se conozca o se sospeche que el impacto antrópico en las aguas es muy elevado (muy mala calidad del agua) y estaciones con niveles intermedios. Esto sirve para obtener una línea base completa de cómo reaccionan las diferentes variables a lo largo del gradiente de contaminación, lo cual permite el desarrollo de índices adaptados a las condiciones específicas del páramo. Estos índices permiten la evaluación rápida de las condiciones de calidad de las diferentes estaciones o puntos de muestreo, lo que facilita el trabajo de análisis en el futuro.

Como es evidente, uno de los criterios de priorización de muestreo es la necesidad de control de la calidad del agua en zonas de explotación minera o con cambios de uso de suelo recientes. Esto permite controlar los efectos negativos de las actividades antrópicas en la calidad del agua de los ecosistemas de páramo.

Así se puede determinar que el orden de priorización sería:

- Monitoreo de las estaciones de referencia tras definir su ubicación para llevar a cabo el control de calidad del trabajo previo. Esto permite asegurar que las estaciones seleccionadas son, efectivamente, de referencia y que no existen flujos sub-superficiales que lleven la contaminación desde lugares más lejanos.
- Monitoreo de cuerpos acuáticos que se sospeche están siendo afectados por actividades antrópicas en el páramo.
- Monitoreo de todo el gradiente ambiental y de contaminación de los páramos para la compilación de una base de datos que permita el desarrollo de índices de calidad adaptados a las condiciones específicas de estos ecosistemas, con el objetivo de facilitar el trabajo futuro en la determinación de la calidad del agua, facilitando el análisis de los datos.

Cabe señalar que estos criterios son considerados generales y que pueden existir excepciones, por lo que deben ser adaptados a las condiciones regionales de cada zona de muestreo dependiendo de los problemas y conflictos presentes en cada una.

### 3.4.2.3 Criterios de selección de estaciones

Inicialmente para la selección de estaciones para el monitoreo de calidad ecológica de las aguas se deben cumplir los siguientes requisitos:

- Facilidad de acceso
- Evitar puntos de contaminación directa en el cuerpo acuático, es decir, no es recomendable el muestreo de calidad del agua en zonas con vertimientos directos, ya que, en estos puntos se observa la calidad del vertimiento y no la del ecosistema acuático per se, y no se tiene en cuenta, ni se refleja en los datos, la capacidad de autodepuración. Las estaciones situadas en el propio vertimiento tienen un objetivo diferente a la determinación de la calidad del agua.

Para la selección de la ubicación de las estaciones en general, incluyendo las de las condiciones de referencia se deben tener en cuenta los siguientes criterios Tabla 5:

- **Para los parámetros físico-químicos:** el Protocolo de Monitoreo del Agua del IDEAM establece las siguientes consideraciones para la ubicación de las estaciones.

**Tabla 5.** Criterios de selección de la ubicación de las estaciones Tipos de Estación.

Tipo de estación	Criterios básicos de selección	Tipo de corriente
<b>Línea Base</b>	En pequeñas cuencas inalteradas, sin fuentes contaminantes, sin actividad humana directa. Evitar cuencas con elevada proporción de rocas metalíferas. La ubicación del punto se encuentre a no menos de 100 Km de cualquier fuente de contaminación del aire importante.	Lagos de Cabecera (tiempo de residencia del agua 0.5-2 años). Tramos ríos agua arriba.
<b>Tendencia</b>	Ubicación en cuencas medianas, reacción dentro de periodos moderados a la contaminación y a cambios en el uso del suelo. Intervención antrópica (alta población, o actividades de industria, agrícola, minera, entre otras)	Lagos y/o embalse (tiempo de residencia del agua 1-3 años). Ríos.

**Fuente:** (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017)

**Para los parámetros hidrobiológicos** las condiciones que deben tener las estaciones para cada uno de los bioindicadores existentes a nivel internacional, con el objetivo de que, una vez se seleccionen los parámetros hidrobiológicos que se tendrán en cuenta, se seleccionen las estaciones en función de la siguiente información.

*Diatomeas y ficoperifiton:* la zona de muestreo de esta comunidad debe cumplir, en la medida de lo posible, con las siguientes características:

- Bien iluminado, evitar lugares con sombra
- Zona corriente del río, evitar el muestreo en zonas de remanso Este criterio no se aplica a cuerpos lénticos.
- Profundidad aproximada de 10-20 cm
- Lejos de posibles perturbaciones puntuales. Si el muestreo se va a realizar en un punto con descargas, se debe estimar la distancia aguas arriba y aguas abajo en que se debe realizar el muestreo.

*Macroinvertebrados:*

- Zona con presencia de diferentes microhábitats (piedras, arena, vegetación acuática, diferentes velocidades, etc.) que sean representativos del tramo del río y/o lago.
- Se debe estar seguro que la zona en la que se muestree ha estado cubierta por una lámina de agua en los últimos meses para asegurar el completo desarrollo de la comunidad.
- El caudal debe haber sido estable, sin grandes crecidas o sequías, en las últimas semanas, ya que las crecidas provocan deriva de los organismos y las sequías afectan a la comunidad aumentando la mortalidad.

*Macrófitas:*

- Estaciones situada en un tramo que sea representativo.
- Evitar zonas con bancas erosionadas o intervenidas que eliminen la vegetación de ribera y de orillas

*Peces:* las condiciones para la selección de las estaciones del muestreo de peces deben ser determinadas por un experto, en función del objetivo específico del muestreo y de las condiciones locales.

*Fitoplancton*: sólo se lleva a cabo su monitoreo en aguas lénticas.

- Columna de agua sin flujo turbulento
- Tener en cuenta régimen de estratificación y mezcla.
- Régimen de luz: el fitoplancton como organismos fotosintéticos se sitúan en la zona fótica o sub-fótica, pero en altas intensidades lumínicas pueden ser inhibidos.

*Zooplancton*: esta comunidad solo se muestrea en cuerpos de agua lénticos.

- Tener en cuenta las migraciones verticales de la comunidad en busca de alimento y evitando a los predadores.
- Esta comunidad puede evitar las zonas muy iluminadas.
- Se suelen ubicar en parches de ecosistemas.

**Parámetros microbiológicos**: debido al rápido análisis de laboratorio que es necesario, el principal criterio de elección de las zonas de muestreo, es que las estaciones estén ubicadas de forma que las muestras recolectadas puedan llegar al laboratorio en menos de 24 horas.

Es importante señalar que todos estos criterios son los relativos a la selección de estaciones en las que se vaya a monitorear la *calidad ecológica de los cuerpos acuáticos*. En caso de que el objetivo del monitoreo sea el control de los vertimientos, estos criterios no son aplicables, ya que el monitoreo se deberá realizar sobre el propio vertimiento y no sobre el cuerpo de agua receptor. Si el monitoreo de vertimientos se lleva a cabo en el cuerpo de agua receptor se debe tener en cuenta el factor de dilución de la contaminación, el cual dependerá de la distancia entre el punto de monitoreo y el vertimiento. Dado que esto es complejo, se recomienda la toma de muestras directamente en el vertimiento con el objetivo de verificar las condiciones en las que se vierte al medio natural.

#### 3.4.2.4 Criterios de selección de variables ambientales

Existe un amplio catálogo de variables físico-químicas, biológicas y microbiológicas que pueden indicar condiciones de calidad del agua. Es por ello que un monitoreo de calidad puede tener unos costos muy elevados si se incluyen muchas variables. Con el objetivo de reducir los costos sin perder información relevante, se propone las variables mínimas que deberían ser monitoreadas en un estudio sobre la calidad del agua.

Cabe mencionar que en el caso de la creación de la línea base y las condiciones de referencia para futuros monitoreos, es recomendable llevar a cabo un análisis lo más exhaustivo posible, es decir, incluir el mayor número de variables posibles.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que los parámetros físico-químicos y microbiológicos pueden ser analizados en aguas superficiales, tanto lóaticas como lénticas. Por el contrario, los parámetros hidrobiológicos se muestrean dependiendo del bioindicador, solo en aguas lénticas o lóaticas (ver Tabla 6). Esto es debido a que el fitoplancton y el zooplancton son organismos que se encuentran en la columna de agua, por lo que en sistemas lóaticos no es recomendable su muestreo, ya que la comunidad es casi inexistente y, además, los organismos que se encuentran en el muestreo, no se puede asegurar que sean de esa zona ya que, probablemente, vengan de aguas arriba de la estación por la corriente del sistema acuático.

**Tabla 6.** Tipos de comunidades a estudiar en los dos principales tipos de ecosistemas acuáticos.

Comunidades Biológicas	Lóatico	Léntico
Fitoplancton		X
Zooplancton		X
Ficoperifiton	X	X
Diatomeas	X	X
Macroinvertebrados acuáticos	X	X
Macrófitas	X	X
Peces	X	X

Fuente: (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017)

Una vez explicadas estas consideraciones iniciales, a continuación se explican las razones por las que se considera importante medir, al menos, las variables básicas que se indican.

### Variabes hidromorfológicas y de hábitat

Este tipo de parámetros no han sido ampliamente usados a nivel internacional, pero comienzan a cobrar alta relevancia en el monitoreo de calidad de las aguas, por su influencia directa en las condiciones de calidad ecológica de los cuerpos de agua. Es por ello que se realiza un análisis previo de las mismas al monitoreo, con el objetivo de tomar conciencia de los cambios en las condiciones de lecho del río, estructura y naturalidad de la zona de ribera. Estos factores influyen la dinámica de las comunidades biológicas y de los

parámetros físico-químicos, ya que un cambio en el lecho del río puede provocar, por ejemplo, la liberación de metales pesados adheridos al sustrato de fondo, o un cambio del bosque de ribera pueden influir en la cantidad de materia orgánica que se encuentra en el agua. Por tanto, es importante su análisis, al menos cualitativo, para la interpretación de los datos. En general se recomienda, como mínimo, una observación de las condiciones hidromorfológicas en el momento del muestreo que se refleje en las fichas de toma de datos de campo.

En este sentido se considera que las variables mínimas a ser analizadas son las incluidas en el índice IMEERA-P (Villamarin, A tool to assess the ecological condition of tropical high Andean streams in Ecuador and Peru: the IMEERA index, 2013), que son:

- *Hidromorfológicas*
  - Grado de cubierta en la zona de ribera
  - Estructura de la cubierta
  - Calidad de la cubierta
  - Grado de naturalidad del canal
- *Habitat*
  - Inclusión rápidos
  - Frecuencia de rápidos
  - Composición del sustrato
  - Régimen de velocidad / profundidad
  - Porcentaje de sombra en el cauca
  - Elementos heterogeneidad
  - Cobertura de vegetación acuática

Cabe mencionar que en el desarrollo del índice IMEERA, dentro del proyecto CERA, se desarrolló la aplicación CABIRA para el cálculo del índice, la cual puede ser descargada en <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/36431>.

### **VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS**

Estas variables son imprescindibles para el conocimiento de un sistema acuático, ya que han sido las más ampliamente analizadas y estudiadas a nivel internacional y nacional. A pesar de que es interesante realizar un análisis completo de las aguas, se conocen los problemas logísticos y económicos para llevar a cabo el



estudio de todas las variables existentes. Es por ello, que se recomienda utilizar las variables básicas en todas las estaciones de monitoreo. Estas variables son las incluidas en el cálculo del índice ICA. Este índice desarrollado por el IDEAM para Colombia, tiene 3 versiones: una con 5 variables, una con 6 y una con 7 variables. Para el uso de las 3 versiones del índice se requiere de los datos de los siguientes parámetros:

- Oxígeno disuelto (OD)
- Alcalinidad o acidez (pH – potencial de hidrogeniones)
- Nitrógeno total (NT)
- Fósforo Total (PT)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Conductividad eléctrica CE
- Además, para el caso del ICA de 7 variables, se incluyen parámetros microbiológicos.

Estas variables serían las mínimas requeridas en cualquier monitoreo de la calidad del agua, pero se debe tener en cuenta los intereses del monitoreo, y sobre todo, las actividades existentes en cada cuenca que puedan afectar a la calidad del agua. Así, en caso de que exista agricultura y/o ganadería se recomienda el análisis completo de nutrientes, es decir, todas las formas de nitrógeno (NT, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub>) y de fósforo (PT y PO<sub>4</sub>), así como la materia orgánica (esta última principalmente en el caso de ganadería). En el caso de existencia de minería se requiere el análisis de metales pesados, los cuales deben ser definidos en función del tipo de explotación minera y del material explotado. Por ejemplo, en el caso de minería de extracción de oro, es imprescindible el monitoreo del mercurio en el agua, ya que el mismo es usado en el proceso minero.

### **VARIABLES MICROBIOLÓGICAS**

Como se ha mencionado previamente, estas variables son de especial interés en el caso de aguas destinadas al consumo humano directo, al riego o a la ganadería, debido a que algunas comunidades microbiológicas son patógenas. Es por ello, que si el agua del páramo finalmente es destinada a sistemas de acueducto, los coliformes totales, los coliformes fecales y *Escherichia coli*, como mínimo, deben ser analizados. Además los coliformes son indicadores de contaminación fecal, por lo que deben ser analizados en páramos si existe ganadería en la zona.

Además, como se ha indicado en el apartado de las variables fisico-químicas, el índice ICA de 7 variables tiene en cuenta parámetros microbiológicos, por lo que sí es de interés trabajar con este índice, se deben analizar estos parámetros.

### **Variables hidrobiológicas**

Los bioindicadores proporcionan información interesante en el análisis de la calidad ecológica del agua, ya que los mismos indican el efecto de los diferentes tipos de contaminaciones en las comunidades acuáticas. Además, como se ha explicado en el marco conceptual, tienen un valor añadido en las redes de monitoreo, ya que proporcionan información integrada en el tiempo, es decir, mientras que los parámetros fisico-químicos proporcionan información exacta de los contaminantes en el momento del muestreo, los indicadores biológicos, a pesar de no indicar concentraciones de contaminantes, sí proporcionan información de las últimas semanas o meses, por lo que su muestreo es más esporádico y no tan frecuente como el de las variables fisico-químicas.

Así, se puede considerar que estos indicadores son un complemento perfecto a los análisis fisico-químicos que se han venido desarrollando en el monitoreo del agua.

Dado que el costo de estos monitoreos es elevado, no tanto por el monitoreo *per se*, sino por el análisis posterior que requiere de expertos en cada una de las comunidades biológicas, se ha propuesto a nivel internacional que la implementación de la Bioindicación comience por un representante del compartimento animal (macroinvertebrados) y uno del compartimento vegetal (diatomeas). Estos dos indicadores han sido los más desarrollados a nivel internacional y son los que se están comenzando a implementar en Colombia de la mano del IDEAM y el MADS.

En el contexto que nos ocupa, es ampliamente reconocido el servicio ecosistémico de los páramos al proporcionar agua de consumo humano, pero ese servicio de calidad de aguas es también de calidad ecológica y no sólo como un recurso a ser usado. Como consecuencia, se recomienda el monitoreo de, al menos, macroinvertebrados y diatomeas, en el monitoreo de la calidad del agua de los páramos en aguas superficiales, debido al alto valor de la información proporcionada, ya que la calidad ecológica del agua es un servicio ecosistémico que asegura el mantenimiento de las comunidades de seres vivos.

#### 3.4.2.5 Síntesis de variables de calidad de agua priorizadas

En la

Tabla 7 se presenta un resumen de las variables recomendadas y *las mínimas* que se considerarían las obligatorias para las entidades encargadas del monitoreo con el objetivo de tener una línea base mínima.

Hay que especificar que las *variables óptimas*, aquellas que proporcionarían amplia información y conocimiento sobre el ecosistema de estudio, dependen en muchos casos de cada páramo debido a que están relacionadas con los impactos antrópicos presentes en la cuenca. Por ejemplo, para páramos con intervención humana de tipo agrícola las variables óptimas serían las determinadas como recomendadas más las relacionadas con nutrientes y pesticidas.

**Tabla 7.** Variables recomendadas y mínimas para el monitoreo de calidad de agua en páramos.

Tipo de ecosistema acuático	Variables Físico Químicas	Variables Microbiológicas	Variables hidrobiológicas
Agua superficial	<b>CE, pH, T, SST, OD, DBO5, DQO, Nutrientes, Metales</b>	Coliformes totales, coliformes fecales, <b>E. coli</b>	<b>Macroinvertebrados, Diatomeas, macrófitas, peces, fito y zooplancton</b>
Agua subterránea	<b>CE, T, pH, dureza, alcalinidad, SS, PO4, NH4, OD, Arsénico, Cadmio, Plomo, Mercurio, Amonio, Cloruro</b>	Coliformes totales, coliformes fecales, <b>E. coli</b>	
Agua lluvia	<b>pH, CE, OD, T, NO3, SO4, Ca, K, Mg.</b>		

Las variables mínimas son las resaltadas en negrita en la tabla 8 mientras que todas las variables que se encuentran en la tabla son las recomendadas.

### 3.4.3 Aguas subterráneas

En muchos casos es crítico contar con una alerta oportuna sobre los problemas potenciales de calidad que pongan en riesgo la fuente de agua subterránea y al sistema acuífero del cual depende. Para este propósito, es necesario diseñar redes de monitoreo capaces de proporcionar información sobre la variación en las tres dimensiones espaciales del flujo y la calidad agua subterránea (Figura 2), de tal manera que se obtengan muestras representativas de la calidad del agua de recarga (renovación) más reciente en el acuífero. Frecuentemente esta calidad es muy diferente de la calidad promedio del agua subterránea contenida en el almacenamiento, a causa de los grandes volúmenes almacenados y los largos tiempos de residencia en

muchos sistemas de agua subterránea. Cuando existan otros factores que también puedan ocasionar una variación vertical pronunciada de la calidad del agua subterránea, el monitoreo debe tener un enfoque similar al descrito (GW\_MATE, 2006).

Los parámetros mínimos a muestrear en las aguas subterráneas para poder realizar un seguimiento de la calidad del agua son:

- Conductividad,
- Temperatura,
- pH,
- Dureza,
- Alcalinidad,
- Sólidos Suspendidos,
- Fosfatos,
- Amoníaco,
- Oxígeno Disuelto

En el caso del monitoreo de aguas subterráneas en ecosistemas de páramo, se recomienda el muestreo en manantiales, ya que no suele haber muchos pozos existentes y el costo de perforación, mantenimiento y control de un pozo es muy elevado y complicado en estos entornos, ya que no hay muchos habitantes en la zona.

#### 3.4.4 Agua lluvia

Como se ha mencionado previamente, no se ha encontrado información relevante que justifique el monitoreo del agua lluvia en ecosistemas de páramos, pero, igualmente, se proporciona información básica para llevarlo a cabo, en caso de que se considere de interés en un futuro.

La lluvia es considerada como una sustancia ácida, ya que en su estado natural tiene un pH alrededor de 5,6 unidades. La acidez natural del agua lluvia se genera por el equilibrio existente con el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), formando el ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) ácido débil. La Tabla 8 muestra los límites de pH y la clasificación por acidez.

**Tabla 8.** Clasificación de las lluvias en función de la acidez.

.pH	Clasificación de la lluvia
>5,6	Lluvia no ácida
4,7 – 5,6	Lluvia ligeramente ácida
4,3 – 4,7	Lluvia medianamente ácida
≤ 4,3	Lluvia fuertemente ácida

**Fuente:** (IDEAM, Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: calidad del aire, 2007).

La lluvia aumenta su acidez cuando los óxidos de azufre y nitrógeno intervienen en la química de la atmósfera y en su equilibrio, causando que el pH de la lluvia disminuya por debajo de 5,6 unidades de pH, mientras que la conductividad aumenta por la presencia de iones.

Los principales precursores de la lluvia ácida son (óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )), compuestos químicos generados a través de dos (2) vías principales: fuentes antropogénicas, a partir de la quema de combustibles fósiles, y fuentes naturales, provenientes de las emisiones volcánicas y fuentes termales, entre otras.

El programa de monitoreo de la lluvia ácida existente en Colombia incluye la toma de datos de pH, conductividad en campo y la toma de muestras para análisis iónico de nitratos y sulfatos. Estos son los parámetros básicos que se deben muestrear en una red de control de lluvia ácida.

En caso de incluirse mayor número de parámetros, se recomiendan los propuestos por la OMM para la estandarización de los procesos de monitoreo de la química de la precipitación a nivel mundial, se encuentran: sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), y magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), además de otros parámetros como metales pesados y compuestos orgánicos volátiles (IDEAM, Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: calidad del aire, 2007).

### 3.4.5 Frecuencias de monitoreo

Las frecuencias de monitoreo recomendables y mínimas en función de los tipos de variables (físico-químicas, microbiológicas e hidrobiológicas) en vez de en función de el origen de las aguas (superficial, subterránea o lluvia). Esto es debido a que las frecuencias de monitoreo pueden ser las mismas en los tres

tipos de aguas analizadas en este documento ~~informe~~, por lo que es más efectivo en términos técnicos y económicos para llevar a cabo el monitoreo realizar los muestreos de aguas subterráneas, superficiales y lluvia en paralelo.

En cualquier caso, se requiere llevar a cabo el monitoreo de las variables fisico-químicas, microbiológicas e hidrobiológicas simultáneamente con el objetivo de tener un conocimiento completo de la estación o punto de monitoreo estudiado. Se puede llevar a cabo monitoreos físico-químicos únicamente, pero siempre que se realice muestreo de microbiológicos y/o hidrobiológicos se requiere la toma de muestras para el análisis de las variables físico-químicas simultáneamente.

#### 3.4.5.1 Variables fisico-químicas

Dado que estas variables miden la calidad del agua en el momento del monitoreo, se debe llevar a cabo un estudio de los impactos en cada una de las estaciones o puntos de muestreo para determinar la existencia de posibles vertimientos puntuales. En caso de que no existan, lo óptimo es el muestreo mensual de las variables físico-químicas, pero debido al alto costo de dichos monitoreos se recomienda, como norma general a nivel internacional, el monitoreo cada 3 meses, es decir, 4 monitoreos al año que en Colombia corresponderían con la época seca, época de lluvias y las dos épocas de transición.

Conociendo el contexto nacional, en la mayoría de las ocasiones es imposible el monitoreo de los 4 periodos hidrológicos debido a los procesos administrativos, presupuestos o disponibilidad de personal, por lo que se indica que el monitoreo mínimo debería ser anual, es decir, una vez al año, a ser posible en el periodo hidrológico seco, cuando el estrés sobre el medio acuático es máximo debido al menor volumen de agua que circula en los sistemas acuáticos y por tanto la mayor concentración de contaminantes.

Cabe señalar que esta frecuencia mínima determinada como anualmente es, efectivamente, la mínima viable con el objetivo de tener información histórica sistemática de los sistemas estudiados, pero el objetivo al que se debe apuntar es a 4 muestreos anuales que es la frecuencia recomendada.

Estas frecuencias no son aplicables a sistemas acuáticos que sean el origen del agua de consumo humano, ya que, en estos casos la frecuencia es diaria con diversas tomas y análisis de muestras a lo largo del día para asegurar la calidad del agua idónea para la potabilización y distribución en centros poblados.

#### 3.4.5.2 Variables microbiológicas

Dado que estas variables se miden, en la mayoría de los casos, con el objetivo de determinar si el agua es apta para un consumo posterior, y no con objetivos de determinación de calidad ecológica del río, no se establecen frecuencias mínimas o recomendables de muestreo, aunque lo óptimo es el muestreo simultáneo con las variables físico-químicas, ya sea para tener una línea base de información histórica o para determinar el uso posterior del agua o para asegurar la calidad del agua de consumo.

#### 3.4.5.3 Variables hidrobiológicas

Considerando que las variables mínimas determinadas previamente son las diatomeas y los macroinvertebrados, se considerarán solo estas dos comunidades para la determinación de las frecuencias recomendables y mínimas de muestreo.

Las diatomeas tienen un ciclo biológico de entre 5 y 7 semanas, es decir, la comunidad se desarrolla o cambia completamente cada mes y medio aproximadamente, mientras que en el caso de los macroinvertebrados, el ciclo es más largo, de aproximadamente 3- 4 meses, dependiendo del ecosistema. Es necesario tener en cuenta estos ciclos biológicos para la determinación de las frecuencias de muestreo, ya que un muestreo mensual no tiene sentido en estos casos, ya que las comunidades no han tenido tiempo de desarrollarse por lo que los resultados no son confiables.

Considerando lo explicado anteriormente, el muestreo de estas comunidades biológicas debe ser cada 3 meses o más para asegurar el correcto desarrollo de las mismas.

Además hay que considerar que ambas comunidades se ven afectadas por los cambios bruscos de nivel de agua y caudal sufriendo deriva de los organismos. Esta deriva ocurre, principalmente, en el caso de los macroinvertebrados. Ya que las diatomeas se encuentran adheridas a sustratos estables y embebidas en el biofilm, no sufren tan directamente la deriva como los macroinvertebrados que se encuentran libres en el lecho de los cuerpos de agua. Es por ello, que se recomienda el muestreo de estas comunidades tras un periodo de al menos 5 semanas en las que el nivel o caudal de la corriente haya estado estable, sin grandes oscilaciones, es decir, no se recomienda el muestreo en los periodos hidrológicos de transición.

Teniendo en cuenta las explicaciones previas, se recomienda el muestreo de estas comunidades dos veces al año, en periodo de sequía y en periodo de lluvias. En caso de no poder realizarse dos muestreos al año, la frecuencia mínima de muestreo debe ser de una vez al año, siendo idóneo el periodo seco cuando el estrés sobre estas comunidades es máximo y por tanto, los resultados obtenidos reflejan la peor calidad ecológica del agua en el año.

Como se mencionó previamente, estas variables no son medibles en aguas subterráneas o aguas lluvias debido a la ausencia de condiciones ambientales necesarias para el desarrollo de estas comunidades biológicas.

Finalmente, hay que señalar la importancia de llevar a cabo mínimo un muestreo al año con el objetivo de desarrollar una línea base que permita aumentar el conocimiento de estas comunidades y el desarrollo de índices adaptados a las condiciones locales de ecosistemas de páramo. Esto es requerido en las variables hidrobiológicas debido a su reciente implementación en el país.

### 3.4.6 Tratamiento y análisis de datos

Una vez se ha llevado a cabo el muestreo y el análisis en laboratorio de las muestras, y se tienen todos los datos de las variables estudiadas, se requiere llevar a cabo un tratamiento adecuado de los datos. El primer paso es asegurar la calidad del dato a partir de la toma de muestra en campo y la calidad en los procesos del laboratorio (estos temas se tratan en el punto 3.6 gestión de datos e información de este protocolo).

Una vez que se ha asegurado que los datos obtenidos son correctos, se debe proceder al análisis de, para lo cual se recomienda el uso de índices de calidad de las aguas, los cuales, en gran medida, han sido desarrollados o están en proceso en el IDEAM. Se recomienda el uso de índices o indicadores por su facilidad en el uso, así como por su efectividad, pertinencia y fiabilidad. Además estos índices facilitan la comunicación de los datos a todo tipo de público, ya que proporcionan un resultado comprensible y resumido de todos los factores que influyen en la calidad del agua. Actualmente, los índices o indicadores que han sido desarrollados y testados son:

El Índice de Calidad de Agua mencionado en el punto 3.4.2 de selección de variables para agua superficial.

Existen otra serie de indicadores que están en proceso de desarrollo o test que pueden ser usados con precaución en los ecosistemas de páramos:

- **BMWP/Col para macroinvertebrados:** este índice es una adaptación del BMWP desarrollado en Inglaterra. Fue adaptado a Colombia mediante el uso de datos de ríos y quebradas de alta montaña (Roldan, Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua, 1999). A pesar de que ha sido ampliamente criticado por no ser adaptable a todas las regiones del país, dado que su desarrollo fue en ríos altoandinos (Roldan, Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: método BMWP/Col, 2003), se considera apropiado probarlo en ecosistemas de páramos, donde



podría tener una mejor respuesta que en ecosistemas de baja altura (Roldan, Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica, 2016).

IPS o IBD para diatomeas: estos dos índices han sido desarrollados en Francia, pero recientemente se han incluido valores de especies tropicales a los mismos, por lo que han sido probados en diferentes regiones del país, principalmente bajo el liderazgo del IDEAM.

- IPS: este índice es el más completo de los índices de diatomeas siendo el que incluye mayor número de taxones. Se basa en valores indicadores y de tolerancia de cada una de las especies.
- IBD: este índice pertenece a otra familia diferente que es la que basa los resultados de calidad en la probabilidad de aparición de una especie en diferentes clases de contaminación de las aguas. Ha sido recientemente actualizado mediante la inclusión de especies tropicales y mediante la adecuación de los valores de cada una de las especies.

Estos dos índices han sido probados en la cuenca alta del Río Bogotá (ASCONIT, 2014), Río Magdalena (AIGOS, 2015) y en la cuenca del Magdalena-Cauca (AIGOS, 2016).

Para los demás parámetros no existen índices desarrollados o suficientemente probados en Colombia, por lo que se recomienda el uso del EQR que ha sido previamente mencionado y explicado.

En cualquier caso, todos los índices o indicadores de los que se habla deben ser evaluados por expertos, ya que no existen grandes cantidades de información en ecosistemas de páramos que permitan la comprobación de la efectividad de los mismos. Por tanto, toda la información que se recopile a partir del monitoreo sistemático de la calidad del agua en páramos, debe servir al desarrollo de índices específicos para este ecosistema o a la adaptación de los límites entre las diferentes clases de calidad. Para todos los índices mencionados (ICA, IACAL, BMWP/Col, IPS e IBD) existen tablas con los valores de calidad del agua en función de los valores obtenidos en los índices (por ejemplo Tabla 9).

Estos valores límites para categorizar la calidad del agua en 5 clases son generales para todo tipo de ecosistemas, pero pueden o deben ser adaptados a las condiciones específicas del estudio o ecosistema. Es decir, se debe llevar a cabo un estudio con los valores obtenidos en varios monitoreos en todo el gradiente ambiental para asegurar que esta clasificación sea correcta. En caso de que no sea la clasificación adecuada, se deben modificar los límites entre clases para adaptar fácilmente el índice al ecosistema. Esta adaptación de límites de calidad es la que se realiza de forma sistemática en Europa con muchos índices que han sido

desarrollados. Dado que el desarrollo completo de un índice es costoso en términos de tiempo y de recopilación de datos, en muchos casos se opta por tomar uno o varios índices existentes y analizar cuál funciona mejor diferenciando las 5 clases de calidad. Una vez se ha identificado el que mejor funciona, se procede a adaptar los límites entre las clases de calidad para asegurar su correcto funcionamiento en el ecosistema o zona de estudio.

**Tabla 9.** Valores generales de límites entre clases para el índice ICA.

Categoría de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua
0.00 – 0.25	Muy mala
0.26 – 0.50	Mala
0.51 – 0.70	Regular
0.71 – 0.90	Aceptable
0.91 – 1.00	Buena

Fuente: (IDEAM, 2011)

Además, se recomienda que toda la información esté centralizada, ya sea en el Instituto Von Humboldt o en el IDEAM, con el objetivo de crear una base de datos completa que permita tener un histórico. Para ello, se puede determinar que las diferentes corporaciones con jurisdicción en ecosistemas de páramos que lleven a cabo monitoreo de calidad de aguas, envíen los datos obtenidos al ente que se encargue de la base de datos general del país (Sistema de Información Ambiental – SIA y Sistema de Información del Recurso Hídrico –SIRH).

### 3.5 Sistema de observación y medición, formulación del programa de monitoreo hidrológico en un complejo de paramo

Con base en los resultados, los análisis previamente descritos, las prioridades identificadas para monitoreo de variables específicas, así como, las necesidades de estaciones se realiza el diseño de un sistema de observación y medición para el complejo específico con la formulación del programa de monitoreo correspondiente a corto, mediano y largo plazo.

Tanto el sistema de observación y medición como el programa de monitoreo deben ser parte integral de los Programas Institucionales de monitoreo del recurso hídrico que se enmarcan dentro de las líneas estratégicas

del PNMRH: a) Información y conocimiento: observación, medición y vigilancia continua y sistemática del agua; b) Investigación e innovación; c) Fortalecimiento de capacidades para el monitoreo del recurso hídrico; c) Comunicación, difusión y participación; y d) Generación y articulación de estrategias de fortalecimiento institucional.

En particular la línea estratégica sobre información y conocimiento donde se plantea la consolidación de un sistema de observación, medición y vigilancia continua y sistemática del agua con cobertura nacional y regional que soporte la gestión integrada del recurso hídrico y la gestión de mares y costas, interoperable con los subsistemas del SIA – SIAC. A su vez dentro de sus líneas de acción está la de formular los programas de monitoreo del recurso hídrico de las entidades competentes en el marco del sistema de observación y medición, con base en los lineamientos que elabore el MADS a través de la Dirección de Recurso Hídrico.

### 3.5.1 El Sistema de Observación, Medición y Vigilancia del agua en el complejo

Este sistema debe incluir además del diseño de la red, los procedimientos y estándares para control de calidad, transmisión, asimilación e integración de los datos a las bases del sistema de información ambiental. El diseño de la red de estaciones de monitoreo debe considerar las existentes y además de las mediciones in situ las realizadas por área o por volumen a partir de sensores remotos.

Este SOMV del agua en el páramo comprende:

- Diseño de la red (puntos) y áreas de observación y medición en función de los objetivos de monitoreo. Una red es definida como un conjunto de estaciones en las cuales se hacen observaciones sobre variables hidrometeorológicas como función del tiempo. Su diseño debe identificar además de las variables, la frecuencia de medición, los métodos, técnicas e instrumentos de medición.
- Mecanismos y protocolos de transmisión de datos.
- Tratamiento de datos primarios y su ingreso al sistema de información (incluyendo análisis básico y control calidad).
- Mecanismos y protocolos de articulación con el sistema de información de información.

### 3.5.2 Programa de monitoreo hidrológico para un Complejo de Páramo

El monitoreo y el diseño del sistema de observación y medición se materializa con la formulación e implementación de un Programa de Monitoreo del Agua para el Complejo de Paramo que aborde el corto, mediano y largo plazo.

En función de los objetivos y temáticas del diseño del sistema de observación y medición se dimensiona el Programa, identificando las prioridades y las fases para abordar el monitoreo del agua a corto mediano y largo plazo.

Estos programas se enmarcan principalmente dentro de la línea estratégica sobre información y conocimiento del PNMRH y su línea de acción sobre formular los programas de monitoreo del recurso hídrico de las entidades competentes en el marco del sistema de observación y medición, con base en los lineamientos que elabore el MADS a través de la Dirección de Recurso Hídrico.

De acuerdo con lo que está trazado en el PNMRH (en proceso de adopción en el MADS) los programas institucionales (entidades nacionales y regionales competentes) de monitoreo del recurso hídrico, deben considerar “los propósitos del monitoreo en el marco de sus funciones, definir los procesos y áreas temáticas objeto de monitoreo, las variables y resolución espacial y temporal que se quiere conseguir. Igualmente deben incluir el diseño de las redes de observación y medición, y los protocolos y estándares a utilizar, y los métodos básicos de obtención de datos de tal manera que se puedan representar y hacer seguimiento de los procesos naturales y sus interacciones. Se espera que en estos programas se definan además de un plan de acción, una estrategia para su implementación y la estrategia de seguimiento y evaluación.” (MADS - IDEAM, 2016)

En este contexto y enmarcado en los lineamientos que se expidan por parte del Ministerio los programas de monitoreo en páramos incluirán como mínimo: a) propósito; b) objetivos; c) metas; d) actividades; e) indicadores; f) recursos técnicos, económicos y humanos; g) productos; h) cronograma; i) costos y; j) responsables.

### 3.6 Gestión de datos información

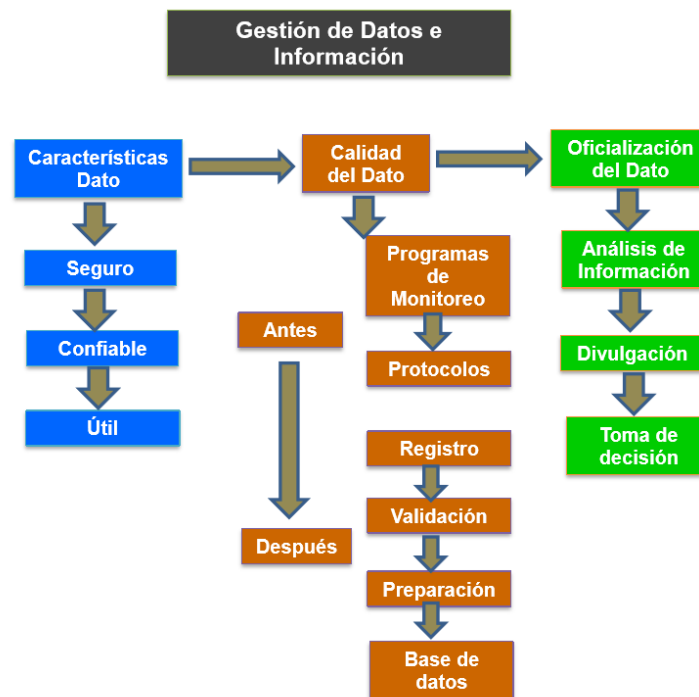
En el capítulo 8 del Protocolo de monitoreo del agua de IDEAM se presenta una síntesis de lo que representa el manejo eficiente y adecuado de los datos y la información a través del desarrollo de estrategias para mejorar la planeación, la producción, la preservación, la integración, el acceso y la difusión de estos, con el

fin de garantizar a usuarios y productores la calidad, confiabilidad, interoperabilidad uso y acceso a la misma (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017).

Se propone un esquema metodológico que resume las características del dato, proceso para asegurar la calidad del mismo y la oficialización del dato para que a partir de allí se genere información, análisis y divulgación para toma de decisiones. El esquema se muestra en la Figura 24. Gestión de Datos en Información.

En la guía de Practicas Hidrológicas de la OMM, Volumen I, Capítulo 9 “Proceso y control de calidad de datos” se muestran los principios, convenciones y normas para unas buenas prácticas científicamente defendibles en la recopilación de datos hidrológicos y climatológicos. (OMM, 2012).

Se hace referencia al criterio conservador a la hora de introducir correcciones y sugiere aplicar un criterio estricto respecto a la alteración o agregación de datos. Igualmente sugiere como convención registrar toda alteración introducida en los datos de modo que se documente las razones de los cambios y sean fácilmente conocidos por quien los va a usar.



Fuente: Protocolo de monitoreo del agua (IDEAM, 2017)

Figura 24. Gestión de Datos en Información.

En relación con las normas y requisitos sobre resolución y grado de exactitud de los datos los Servicios Hidrológicos y Meteorológicos de los países formulan las normas aplicables que en el caso de Colombia es el IDEAM como organismo rector de estas áreas en el país. El proceso de elaboración de estas normas tiene como referentes las normas internacionales, como las indicadas en la Guía de prácticas climatológicas (OMM-N° 100), teniendo presente las necesidades actuales y, las posibles necesidades futuras en relación con los datos, (OMM, 2012).

En la Guía de Practicas Hidrológicas se hace énfasis en la necesidad de hacer explícito en las normas aplicables a los datos, la distinción entre resolución, exactitud, errores e incertidumbre. De acuerdo con esta Guía estos términos se refieren a:

“*La resolución* de un dispositivo o técnica de medición es el incremento más pequeño que éstos son capaces de discernir...”. (OMM, 2012)

“*La exactitud* de una medición indica el grado de aproximación al valor verdadero. Sin embargo, dado que el valor verdadero suele ser desconocido, la exactitud de una medición hidrológica suele expresarse en términos de probabilidades estadísticas...”.(Ibid.)

“El grado de exactitud recomendado depende principalmente de la finalidad a que se destinen los datos medidos (la finalidad de la medición), de los instrumentos de que sería posible disponer y de los recursos financieros disponibles. Por consiguiente, no puede ser un valor constante. Debería ser, por el contrario, un intervalo de valores flexible” (ibid)

“*El error de un resultado* es la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero de la magnitud que se está midiendo. Los errores pueden clasificarse generalmente en sistemáticos, aleatorios o espurios...”

“*La incertidumbre* es el intervalo de valores en el que cabría esperar encontrar el valor verdadero de una magnitud medida, con un valor de probabilidad (o de nivel de confianza) dado. En hidrología se utiliza habitualmente un nivel de confianza del 95 por ciento, que en una distribución normal se corresponde con dos desviaciones típicas. Para una información más amplia, véase la Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (ISO/IEC, 1995).” (Ibid.)

“Según el Reglamento Técnico (OMM No 49), Volumen III, las incertidumbres de una medición deben notificarse en uno de los formatos siguientes: a) incertidumbres expresadas en términos absolutos: valor medido de un elemento de observación hidrológico; por ejemplo, el valor de caudal:  $Q = \dots$  Incertidumbre

aleatoria:  $(er)_{95} = \dots$ ; e b) incertidumbres expresadas en términos porcentuales: valor medido de un elemento de observación hidrológico  $Q = \dots$  Incertidumbre porcentual aleatoria  $(er)_{95} = \dots\%$ ). (Ibid.).

Se menciona que el “grado de incertidumbre que necesitan conocer los usuarios es, por lo general, la consideración más importante. Una vez establecido su valor, habrá que considerar las incertidumbres vinculadas a los métodos, técnicas e instrumentos. Frecuentemente, habrá que encontrar un punto de equilibrio entre el grado de incertidumbre deseado y el grado de exactitud y la resolución de los instrumentos por razones de costo, por consideraciones prácticas y por las limitaciones de las técnicas.” (Ibid.).

El Servicio Hidrológico y Meteorológico de Colombia desde sus inicios en 1969 (actualmente IDEAM) ha expedido normas y protocolos en relación con la obtención de datos y control de calidad de los mismos.

En particular en lo relacionado con el agua ha expedido Protocolos de Monitoreo y Seguimiento el Agua. En su última versión, Capítulo 8, se trata el tema de gestión de datos e información basado en los desarrollos del Sistema de Información Ambiental para Colombia –SIAC, el Sistema de Información Ambiental –SIA que coordina el IDEAM, incluyendo el Sistema de información del Recurso Hídrico – SIRH.

El Capítulo aborda además de las características, calidad y oficialización de los datos, el acceso abierto y el proceso de análisis de información para la difusión como insumo para la toma de decisiones. (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017) Páginas 525 a 549.

## 4. MÉTODOS, TÉCNICAS Y TECNOLOGÍAS

El ciclo hidrológico como objeto de observación, las características de los flujos, procesos y balances están determinados por dos de las ecuaciones básicas que describen la física de este ciclo y pertinentes para describir los sistemas utilizados con el fin de medir sus propiedades en movimiento: a) la ecuación de continuidad de la masa; y b) la ecuación de continuidad de la energía (OMM, 2012).

En la Guía de Practicas Hidrológicas, en el ítem sobre tipos de información relativa a los recursos hídricos menciona que la información convencional sobre los recursos hídricos abarca estadísticas relativas a diversos elementos meteorológicos e hidrológicos. Entre ellos cabe señalar (OMM/UNESCO, 1991): a) precipitación, lluvia, nieve y humedad condensada; b) niveles y flujos fluviales, y niveles de lagos y

embalses; c) niveles de agua subterránea; d) evapotranspiración; e) concentración y carga de sedimentos fluviales; y f) calidad (bacteriológica, química y física) de las aguas superficiales y subterráneas.

La OMM considera que el grado de exactitud depende principalmente de la finalidad a que se destinen los datos medidos (la finalidad de la medición), de los instrumentos de que sería posible disponer y de los recursos financieros disponibles. En la GPH a manera de orientación se recomiendan rangos de exactitud expresada en el intervalo de confianza del 95% para los instrumentos y métodos de observación de diferentes variables, los cuales se transcriben en la **Tabla 10**.

De acuerdo con el procedimiento metodológico presentado en el punto 3.1 (Parte II) de este protocolo una vez se surtan los pasos de caracterización biofísica, análisis de información hidrológica y meteorológica existente, se evalúen los escenarios probables y se establezcan los modelos hidrológicos conceptuales para el complejo de páramos se procede al diseño del sistema de observación, medición y vigilancia para el Complejo de Páramo priorizado. Este sistema se define en función de las necesidades de estaciones identificadas, variables a medir, ubicación de las estaciones de monitoreo, los métodos y las técnicas apropiadas, según los procesos característicos del páramo en particular y asociados con la regulación hídrica, la cuantificación del agua superficial, subsuperficial y subterránea y la calidad ecológica del agua.

El SOMV incluye el diseño de la red (puntos), áreas de observación y medición en función de los objetivos de monitoreo (variables frecuencia, métodos, etc.); así como los mecanismos y protocolos de transmisión; instrumentos y métodos de observación; tratamiento de datos primarios y su ingreso al sistema de información (incluyendo análisis básico y control calidad).

A continuación se relacionan métodos y técnicas de medición y observación de las principales variables atmosféricas, de agua superficial, de agua subterránea, de calidad ecológica del agua, y de flujos e interacciones a partir de técnicas isotopía e hidroquímica. En todos los campos mencionados se referencian publicaciones y documentos nacionales e internacionales que aportan mayor detalle sobre los métodos técnicos y tecnologías.



**Tabla 10.** Exactitud recomendada (nivel de incertidumbre), expresada en el intervalo de confianza del 95 por ciento

Precipitación (cantidad y tipo)	3 a 7%
Intensidad de lluvia	1 mm h <sup>-1</sup>
Espesor de nieve (puntual)	1 cm por debajo de 20 cm o 10% por encima de 20 cm
Contenido de agua en nieve	2,5 a 10%
Evaporación (puntual)	2 a 5%, 0,5 mm
Velocidad del viento	0,5 m s <sup>-1</sup>
Nivel de agua	10 a 20 mm
Altura de ola	10%
Profundidad de agua	0,1 m, 2%
Anchura de la superficie de agua	0,50%
Velocidad de flujo	2 a 5%
Caudal	5%
Concentración de sedimentos en suspensión	10%
Transporte de sedimentos en suspensión	10%
Transporte de carga de fondo	25%
Temperatura del agua	0,1 a 0,5 °C
Oxígeno disuelto (temperatura del agua superior a 10°C)	3%
Turbidez	5 a 10%
Color	5%
pH	0,05 a 0,1 unidad de pH
Conductividad eléctrica	5%
Espesor de hielo	1 a 2 cm, 5%
Capa de hielo	5% para $\geq 20 \text{ kg m}^{-3}$
Humedad del suelo	1 kg m <sup>-3</sup> $\geq 20 \text{ kg m}^{-3}$

**Notas**

1. Cuando se recomienda un intervalo de valores de exactitud, el valor inferior es aplicable a las mediciones en condiciones relativamente buenas, y el valor superior es aplicable a las mediciones en situaciones difíciles.
2. La obtención del grado de exactitud recomendado en las mediciones de precipitación (de 3 a 7 por ciento) dependerá de numerosos factores, entre ellos las características del medidor. Cuando el orificio de los medidores se halle por encima del terreno, la deficiencia de captación del medidor estará fuertemente determinada por la velocidad del viento y el tipo de precipitación. En el caso de una precipitación ligera de nieve en presencia de fuerte viento, por ejemplo, la deficiencia puede llegar a ser de un 50 por ciento o superior.

**Fuente:** Guía de Practicas Hidrológicas OMM, (OMM, 2012)

Es pertinente mencionar que la OMM como organismo internacional de Meteorología (tiempo, clima y agua), fomenta la normalización de las observaciones meteorológicas y conexas, y las actividades en la esfera de la hidrología operativa. En este contexto genera guías construidas con la colaboración de los Servicios de Hidrología y Meteorología de la mayoría de los países y a su vez presta apoyo a los Servicios a través de los Sistemas Mundiales de Observación como el del Ciclo Hidrológico (WHYCOS), de Observaciones Hidrológicas (WHOS) y la transferencia de técnicas hidrológicas de probada utilidad empleadas en la práctica por los Servicios a través de HOMS- Sistema Internacional de Hidrología Operativa

para Fines Múltiples y sus Centros Nacionales de Referencia (CNRH) y Centros Regionales de Coordinación (CRC).

En este protocolo y a través de este capítulo se hará referencia a publicaciones y direcciones de OMM donde se pueden consultar y ampliar información sobre métodos, técnicas y tecnologías para variables hidrometeorológicas y otros temas específicos.

Se referencian igualmente las direcciones de imágenes satelitales de libre acceso que permiten obtener información espacial de diferentes temáticas.

#### 4.1 Variables atmosféricas

La precipitación y la evapotranspiración son variables fundamentales en los procesos del ciclo del agua y componentes determinantes en los balances hídricos. Teniendo como base la metodología expuesta en el punto 3.2 (Parte II) de ese protocolo para un monitoreo hidrológico en páramos a partir de modelos basados en el análisis combinado de información y datos meteorológicos obtenidos mediante sensores remotos y estaciones hidrometeorológicas, a continuación se presenta una síntesis de los métodos de observación, técnica de medición e instrumentos para estas dos variables. Se referencia bibliografía nacional e internacional de consulta para mayor detalle.

Se relacionan referencias sobre métodos y direcciones en internet donde se puede obtener imágenes satelitales, bases de datos e información global sobre precipitación y evapotranspiración, u otras variables meteorológicas mencionadas en la metodología como temperatura, radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa y presión de vapor de agua.

La Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (OMM-N° 8 ed.), publicada desde 1954 publicada por la Organización Meteorológica Mundial a través de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación la ha revisado y actualizado periódicamente, es un referente de los protocolos, estándares y manuales que preparan los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN). En la versión de 2008 (7ª Edición) actualizada en 2010 se describen la mayoría de instrumentos, sistemas y técnicas utilizados regularmente, desde los más sencillos hasta los más complejos y sofisticados.

Las principales variables atmosféricas que se consideran en este protocolo están desarrolladas en la Guía OMM No 8, tales como: temperatura, humedad, viento de superficie, precipitación, evaporación, humedad del suelo.

A continuación se relacionan las variables de precipitación, evaporación y humedad del suelo con una breve descripción de la variable, las unidades de medida, los principales métodos y las referencias bibliográficas recomendadas. Tanto la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM (2011) como en el Protocolo de Monitoreo del Agua del IDEAM (2011) para las variables de precipitación, evaporación y humedad del suelo se sustentan en contenidos de la Guía de la OMM No8.

#### 4.1.1 Precipitación

Se denomina precipitación a la cantidad de agua, líquida o sólida, que llega a la superficie terrestre procedente de las nubes, como una consecuencia del ciclo hidrológico, de los procesos termodinámicos del aire y la circulación general de la atmósfera. Dicho término comprende la lluvia, el granizo, la nieve, el rocío, la escarcha y la precipitación de la niebla, y se mide en profundidad lineal, normalmente en milímetros (volumen/área) o en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (masa/área) para la precipitación líquida, mientras que para las mediciones de nieve se realizan en unidades de centímetros y decenas. (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017).

En la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (OMM-N° 8) actualizada en 2010, la precipitación se define como “el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes o del aire y se deposita en el suelo. Dicho término comprende la lluvia, el granizo, la nieve, el rocío, la cencellada blanca, la escarcha y la precipitación de la niebla. La cantidad total de precipitación que llega al suelo en determinado período se expresa en términos de profundidad vertical de agua (o equivalente en agua en el caso de formas sólidas)”. La unidad de precipitación es la profundidad lineal, normalmente en milímetros (volumen/área) o en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (masa/área) para la precipitación líquida (OMM, 2008).

En esta Guía OMM No 8. Parte I. Medición de variables meteorológicas. Capítulo 6. (Páginas 162 a 180) se describen en forma detallada los métodos para medir la precipitación en estaciones terrestres con observaciones normalizadas. Este Capítulo comprende las definiciones, unidades y escalas, requisitos meteorológicos e hidrológicos y métodos de medición. En el punto 6.2 de este mismo capítulo se pueden consultar los lineamientos para la ubicación de las estaciones y los efectos que puede tener el número de puntos y su emplazamiento en la representatividad de la variable.

En La Guía de Prácticas Hidrológicas (OMM, 2012), Capítulo 3 se examinan los aspectos de la medición de la precipitación más importantes para las prácticas hidrológicas. Incluye además de tipos de instrumentos, los métodos de medición, errores y exactitud de las lecturas, corrección de errores sistemáticos.

#### 4.1.1.1 Métodos de medición e instrumentos

La medición de la precipitación es particularmente sensible a la exposición del medidor por tanto la documentación sobre las mediciones y un historial completo de la estación es importante para los diferentes estudios (OMM, 2012).

La ubicación de las estaciones de precipitación en la zona de interés es importante porque el número y el emplazamiento de los medidores determinan el grado en que las mediciones representan la cantidad real de precipitación que cae en la zona.

Los medidores de precipitación, estaciones en tierra, se dividen en no registradores (pluviómetros) y registradores (pluviógrafos) y mediciones directas (Guía de Prácticas Hidrológicas (OMM, 2012, V. I).

Otros métodos de medición de la precipitación son a partir de utilización de radares y satélites meteorológicos, los cuales funcionan con medidores automáticos, proporcionando estimaciones zonales más precisas de la precipitación, a nivel operativo para una amplia gama de usuarios (OMM, 2008).

#### **Medidores de precipitación no registradores**

Estos medidores se clasifican en *ordinarios (estándar)* y *totalizadores* en función de la posibilidad de recolección de datos principalmente.

Un pluviómetro mide la cantidad de precipitaciones, tanto de lluvia como de nieve, que han caído en un determinado lugar y durante un período específico de tiempo y se expresa por la altura de la lámina de agua en milímetros. Los milímetros (mm) son equivalentes a los litros por metros cuadrados.

Existen varios pluviómetros que emplean una variedad de tecnologías, aunque los tipos más comunes son el pluviómetro estándar, pluviómetro totalizador, pluviómetro con tubo de descarga o el pluviómetro de balanza, o pluviómetros automatizados.

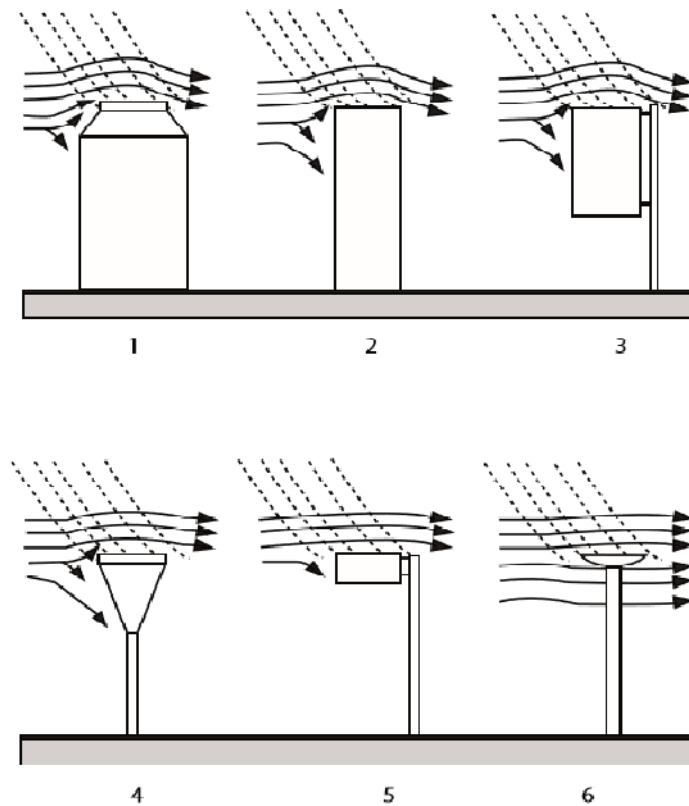
*El pluviómetro estándar* es el más común y de construcción más simple. Se encuentran varios tipos en el mercado, lo único que los diferencia es la capacidad de recolección, diseño y material de fabricación. Este tipo de instrumentos, están conformados de un recipiente cilíndrico de varias capacidades cuyo extremo superior tiene una superficie de diferentes áreas.

De acuerdo con la Guía OMM 2012, el medidor ordinario de precipitación utilizado normalmente consiste en un colector situado por encima de un embudo que da paso a un depósito, donde el agua y la nieve derretida

acumuladas se almacenan entre períodos de observación. Se utilizan diversas formas de medidores (pluviómetros normalizados) como se muestra en la Figura 25.

“Las líneas continuas muestran las líneas de corriente y las líneas discontinuas hacen lo propio con las trayectorias de las partículas de precipitación. El primer pluviómetro muestra la mayor deformación del campo de viento por encima de la boca del instrumento de medición, y el último pluviómetro muestra la menor. En consecuencia, el error inducido por el viento en el caso del primer pluviómetro es más importante que en el caso del último” (OMM, 2008).

Por tanto la ubicación de pluviómetro es determinante en la fiabilidad de la medida de precipitación y por ende en la representatividad de las muestras. Los efectos del viento son de dos tipos: “efectos sobre el propio instrumento, que reducen en general la cantidad de agua recogida, y efectos del emplazamiento sobre la trayectoria del viento, a menudo más importantes y que pueden arrojar valores en exceso o en defecto de la precipitación medida” (OMM, 2012).



Fuente: (Sevruk y Nesper, 1994) Citado en (OMM, 2008)

Figura 25. Diferentes formas de pluviómetros normalizados. .

Los pluviómetros de mayor capacidad, son aquellos que tiene una forma cilíndrica, y constan de una parte superior recolectora, un embudo y una parte inferior o depósito con una capacidad de 100 y 220 mm. Están construidos en metal, bien sea acero inoxidable, aluminio y zinc. En este tipo de instrumentos, el agua ingresa a través de un embudo hacia un colector que recolecta el agua. Si las precipitaciones superan la capacidad del colector, el agua se derrama y cae en el cilindro que rodea al tubo de medición (Raig Instrumentos Meteorología- Óptica-Precisión, 2017, citado en (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017).

*Los pluviómetros totalizadores* se utilizan para medir la precipitación estacional total en áreas apartadas o escasamente habitadas. Consisten en un colector situado encima de un embudo, que desemboca en un recipiente bastante amplio para captar las lluvias estacionales. Se tienen en cuenta los mismos criterios de exposición y protección de los pluviómetros estándar (OMM, 2012).

Para mediciones de nieve, se utiliza un pluviómetro totalizador que acumula la precipitación generalmente en un periodo de tiempo de un año. Se recomienda que este tenga una altura compatible con el máximo de precipitación del año hidrológico, sin embargo, lo más común es que sea un tanque de 1.50 m, con una superficie de captación de 2000 cm<sup>3</sup> (Ceballos Liévano, 2015) Citado en (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017).

### **Medidores de precipitación registradores**

Estos medidores son de registro continuo automático con la ventaja de que puede proporcionar una mejor resolución temporal que las mediciones manuales y de que es posible reducir las pérdidas por evaporación y por humectación. Como los pluviómetros están sometidos a los efectos del viento.

Por lo general se utilizan cinco tipos de medidores de precipitación registradores: el de pesaje (o de pesada), el de cubeta basculante (o de balancín), el de flotador, el distrómetro y el acústico.

Los únicos instrumentos que permiten medir todo tipo de precipitación son los de pesada y los basados en el principio de detección óptica de la cantidad de movimiento, los demás se limitan en gran parte a la medición de la cantidad de lluvia. Según la Guía de Practicas Hidrológicas las características de estos tipos de instrumentos están asociadas con:

*Pluviógrafo de pesada:* Este tipo de instrumentos registra de manera continua, mediante un mecanismo de resorte o un sistema de pesas, el peso del recipiente y el de la precipitación en él acumulada. De este modo, la precipitación se registra a medida que va depositándose. Estos dispositivos deben diseñarse de forma que

eviten pérdidas excesivas por evaporación. Sirven sobre todo para registrar precipitaciones de nieve, granizo y aguanieve.

*Pluviógrafo de flotador.* “En este tipo de instrumento, la lluvia recogida pasa a un recipiente que contiene un flotador liviano. El movimiento vertical del flotador, al subir el nivel del agua, se transmite mediante un mecanismo apropiado a la plumilla trazadora.”. Para que los registros abarquen un período apropiado (por lo general, se necesitan como mínimo 24 horas), es necesario que el recipiente en que se encuentra el flotador sea muy grande (en cuyo caso se obtendrá una escala comprimida en la gráfica) o que se disponga de algún medio automático para vaciar rápidamente el recipiente cada vez que esté lleno (Ibid.).

*Pluviógrafo de cubeta basculante o de balancín.* Se utiliza para medir la intensidad de lluvia, así como los totales acumulados, pero no ofrece la exactitud necesaria a causa de importantes errores no lineales, en particular en el caso de fuertes intensidades de precipitación. “Consiste en un recipiente de metal ligero, dividido en dos compartimentos, en equilibrio inestable en torno a un eje horizontal. En su posición normal, el recipiente reposa sobre uno de sus dos topes, lo que impide que se vuelque completamente. El agua de lluvia es enviada al compartimiento superior mediante un embudo colector de tipo convencional. Una vez recogida una cantidad dada de lluvia, la cubeta perderá estabilidad y basculará hacia la otra posición de reposo.” (Ibid.)

Para gran número de aplicaciones hidrológicas, particularmente en regiones de lluvia abundante y con sistemas de aviso de crecida, bastará con cubetas de 0,5 a 1,0 mm. La principal ventaja de este tipo de instrumento radica en que genera impulsos electrónicos y permite registros a distancia, o bien permite el registro simultáneo de la lluvia y de la altura fluvial en un limnógrafo. Sus inconvenientes son: a) la cubeta tarda un tiempo, breve pero finito, en bascular y, durante la primera mitad de su movimiento, la lluvia cae en el compartimiento que contiene la lluvia ya contabilizada. Este error solo es perceptible en casos de precipitación intensa (Parsons, 1941); b) con el diseño de cubeta habitualmente utilizado, la superficie de agua expuesta es relativamente grande. Por consiguiente, se pueden producir pérdidas por evaporación considerables en regiones cálidas. Este fenómeno será más perceptible en condiciones de lluvia escasa; y c) debido al carácter discontinuo del registro, este instrumento no dará resultados satisfactorios en casos de llovizna o de lluvia muy tenue. En tales situaciones no será posible determinar con exactitud el momento en que comienzan o acaban las precipitaciones.

Como se expresa en la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación (OMM, 2008) “existen nuevos tipos de medidores registradores automáticos que miden la precipitación sin partes móviles utilizando

dispositivos tales como sondas de capacitancia, transductores de presión, dispositivos ópticos o pequeños dispositivos de radar, capaces de proporcionar una señal electrónica que es proporcional al equivalente de la precipitación. El dispositivo de reloj que cronometra los intervalos y fecha el registro de tiempo es un componente muy importante del registrador” (OMM, 2008).

Entre estos están el distrómetro y el acústico:

*Los distrómetros* miden el espectro de las partículas de precipitación, ya sea midiendo la cantidad de movimiento comunicada a un transductor cuando el hidrometeoro dispara un detector, o a partir de la imagen/reflectividad de los hidrometeoros iluminados por luz o microondas (Bringi y Chandrasekar, 2001). Aunque tiene ventajas sobre los de cubeta son más costosos.

*Los dispositivos acústicos:* la medición de precipitación en lagos y mares es particularmente difícil. No obstante, el ruido que hacen las gotas de lluvia al chocar con la superficie del agua puede ser detectado mediante un micrófono sensible. El espectro del ruido revela la distribución del tamaño de las gotas y, por consiguiente, la cantidad de lluvia

### **Observación de la precipitación mediante radar**

En la sección 3.7 de la Guía de Prácticas Hidrológicas de OMM y componente HOMS C33 se indican las posibilidades de uso de los radares en hidrología para estimaciones de tasa de lluvia en el marco del alcance efectivo de un radar que suele ser entre 40 y 200 km, en función de las características del radar.

### **Observaciones de la precipitación de lluvia mediante satélite**

Las técnicas de teledetección desde el espacio permiten observar la precipitación y la capa de nieve en tiempo real o casi real sobre grandes extensiones, complementando así las mediciones puntuales, más exactas, de los radares meteorológicos. Es posible obtener datos valiosos de los satélites utilizados principalmente con fines meteorológicos, y en particular los satélites de la NOAA y del Programa de satélites meteorológicos del Departamento de Defensa de Estados Unidos, el GOES, el satélite meteorológico geostacionario (GMS) y Meteosat (Engman y Gurney, 1991).

En la sección 3.11 de la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM se presentan los conceptos básicos que soportan la estimación de la precipitación de la lluvia a partir de las observaciones satelitales y la base es la medición de la cantidad de radiación reflejada y emitida a través de las cimas de las nubes. En este mismo ítem se mencionan el gran número de técnicas y procedimientos diversos que a partir de las observaciones



se puede estimar la precipitación y determinar el grado de exactitud. Entre estas técnicas en la Guía se desarrollan las siguientes:

- Espectro visible e infrarrojo
- *Microondas pasivas* que permiten efectuar mediciones físicamente más ajustadas a la precipitación real a partir de dos técnicas de medición las basadas en la absorción y las basadas en la dispersión.
- *Microondas activas* (radar de lluvia; misión de medición de lluvias tropicales)

En el Protocolo de Monitoreo del Agua se indica que “Los satélites meteorológicos existentes son de tipo polar-orbital o geostacionario. Los primeros pasan por los polos normalmente dos veces por día a alturas del orden de 1000 km. Los segundos tienen una órbita más alta de alrededor de 36.000 km, tal que su traslación es sincrónica con la rotación de la Tierra alrededor de su eje (son estacionarios respecto de un punto fijo en la superficie). Esto permite la producción frecuente de imágenes (comúnmente cada media hora o menos aún, hasta cada 5 minutos), lo que es ideal para observar, por ejemplo, rápidos”. (IDEAM-INVEMAR, 2017).

Entre estos y para seguimiento del desarrollo de patrones de tormenta (Diez, 2012) se encuentran el sistema GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) de EEUU (West, East e Indian Ocean), GMS de Japón y Meteosat de la CEE, que proveen una visión casi continua del tiempo meteorológico global.

#### 4.1.1.2 Referencias recomendadas

- Protocolo de monitoreo del agua (IDEAM-INVEMAR, 2017)
- WMO No 385 Glosario Hidrológico Internacional (UNESCO -OMM, 2012)  
<http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>  
<https://hydrologie.org/glu/HINDES.HTM>
- WMO No 8. Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos Edición 2008, actualizada en 2010 y publicada en 2014. [https://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_8-2014\\_es.pdf](https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8-2014_es.pdf)
- OMM No 168 Guía de Prácticas Hidrológicas. Sexta Edición, Volumen I, 2011. Capítulos 3 y 4  
[http://www.whycos.org/hwrp/guide/index\\_es.php](http://www.whycos.org/hwrp/guide/index_es.php)
- OMM- Componente HOMS C27 y C33  
[http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/sections\\_es.html](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/sections_es.html)
- NASA’s Earth Observing System Data and Information System.  
<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>

- Uso de la tierra, Shapefile para diferentes años. Modelos de elevación.
- Repositorios internacionales con información de reanálisis.  
<http://worldclim.org/version2>  
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/browse-reanalysis-datasets>  
[https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table)

#### 4.1.2 Evaporación, transpiración y evapotranspiración

El Glosario Hidrológico Internacional aporta las siguientes definiciones:

*“Evaporación (del agua):* Proceso por el que el agua pasa de líquido a vapor a una temperatura inferior a la del punto de ebullición.

*Evapotranspiración:* Conjunto de procesos por los que se efectúa la transferencia de agua de la superficie terrestre a la atmósfera por evaporación y de la vegetación, por transpiración

*Transpiración:* proceso por el cual el agua de la vegetación pasa a la atmósfera en forma de vapor.”

En la actualización en 2010 de la Guía (OMM No 8), Capítulo 10 sobre Medición de la Evaporación se proporcionan las siguientes definiciones, basadas en el Glosario Hidrológico Internacional (OMM/UNESCO, 1992) y el Vocabulario Meteorológico Internacional (OMM, 1992)

*“Evaporación (real):* Cantidad de agua que se evapora de una superficie de agua libre o del terreno.

*Evapotranspiración real* (o evapotranspiración efectiva): cantidad de agua evaporada del suelo y de las plantas cuando el terreno se encuentra con su contenido natural de humedad.

*Evaporación potencial (o evaporatividad):* Cantidad de vapor de agua que puede ser emitida por una superficie de agua pura, por unidad de superficie y por unidad de tiempo, en las condiciones existentes.

*Evapotranspiración potencial:* Cantidad máxima de agua que puede evaporarse en un clima dado por una cubierta vegetal continua bien dotada de agua. Incluye la evaporación del suelo y la transpiración por la vegetación en un intervalo de tiempo dado y en una región determinada. Se expresa en altura de agua” (OMM, 2008).

*“Tasa de evaporación:* se define como la cantidad de agua que se evapora de una unidad de superficie por unidad de tiempo. Puede expresarse como la masa o el volumen de agua líquida que se evapora de esta

forma. Habitualmente, se trata de la altura del agua líquida que vuelve a la atmósfera por unidad de tiempo, evaporándose desde toda la superficie que se examina. La unidad de tiempo es normalmente el día y la cantidad de evaporación debe expresarse en milímetros. Según el tipo de instrumento las medias varían generalmente de a, 1 a 0.01 mm”.

Las estimaciones de evaporación a partir de superficies de agua libre y del suelo y las de evapotranspiración a partir de superficies cubiertas por vegetación, son de particular importancia en la modelación y estudios hidrológicos.

En el ciclo hidrológico la evaporación y la transpiración, el agua que retorna a la atmósfera por este concepto, a nivel continental puede estar entre un 70 y 75% de la precipitación total anual. En los páramos por las condiciones climáticas, de vegetación y condiciones de humedad del suelo el porcentaje puede ser mucho menor.

La estimación de la evaporación y de la evapotranspiración puede hacerse de manera directa mediante tanques de evaporación y lisímetros o a partir de métodos indirectos. Aunque existen métodos razonablemente exactos para la medición directa no es posible actualmente medirlos en grandes superficies de agua o tierra.

En general, para estimar la evaporación y la evapotranspiración se aplican métodos indirectos, ya sea efectuando mediciones puntuales con un instrumento o medidor, o realizando cálculos a partir de otras variables meteorológicas cuantificadas (OMM, 1997).

En la Guía de Prácticas Hidrológicas, Capítulo 4 sobre evaporación, evapotranspiración y humedad del suelo se tratan los métodos de medición directa e instrumentos (tanques y lisímetros) y las necesidades de observación para técnicas como balance hídrico. Igualmente se aborda el cálculo de la evaporación y de la evapotranspiración en superficies de agua y de tierra mediante métodos indirectos. Algunos de los métodos directos e indirectos y referencias recomendadas se relacionan a continuación.

#### 4.1.2.1 Medición directa de la Evaporación

Los evaporímetros, entre los que se diferencian los atmómetros y las cubetas o los tanques de evaporación, sirven para medir la pérdida de agua en una superficie saturada estándar. Estos instrumentos no permiten medir directamente ni la evaporación de superficies naturales de agua, ni la evapotranspiración real o potencial (OMM, 2008).

Tanto en la Guía OMM No 168, en la Guía No 8 de la OMM y en los protocolos del agua (IDEAM, 2017) se pueden consultar los criterios para emplazar los medidores, tipos de instrumentos, unidades, fuentes de error y frecuencia de observación y mantenimiento.

## **Evaporímetros**

### *Evaporación en tanque*

Para estimar la evaporación de masas de agua libre se utilizan en general los registros de evaporación de tanque. Las cubetas y los tanques de evaporación existen en una gran variedad de formas, dimensiones y modos de exposición, pueden ser de sección cuadrada o circular, instalados enteramente por encima del terreno o insertados en éste de modo que el nivel de agua sea aproximadamente el mismo que el del suelo. Para superficies de lagos e embalses pueden estar instalados en plataformas flotantes ancladas. (OMM, 2012).

Se utilizan tres tipos de tanques principalmente: el tanque de clase A, de Estados Unidos, el tanque GGI-3000 y el tanque de 20 m<sup>2</sup> de la Federación de Rusia. El de clase A ha sido recomendado por la OMM y por la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (AICh) como instrumento de referencia.

Estos instrumentos se utilizan hoy en día ampliamente como evaporímetros estándar en las redes de observación, y se han estudiado sus características de funcionamiento en diversas condiciones climáticas y en distintas latitudes y altitudes.

La principal dificultad para estimar la evaporación a partir de las mediciones directas puntuales en tanques de clase A radica en la utilización de coeficientes que conviertan las mediciones efectuadas en valores característicos de grandes masas de aguas libres (OMM, 2012).

### *Evaporación en nieve*

Para la estimación de evaporación en nieve se utilizan evaporímetros de polietileno o plástico incoloro, para medir la evaporación o la condensación en una capa de nieve. Estos evaporímetros son de una superficie mínima de 200 cm<sup>2</sup> y una profundidad de 10 cm.

Tras extraer una muestra de nieve para llenar el evaporímetro, se mide su peso total y se nivela el evaporímetro con la superficie de la nieve, al término del período de medición, se extrae de la nieve el evaporímetro y se efectúa una segunda pesada. La diferencia entre los pesos inicial y final es convertida en valores de evaporación, expresados en centímetros (Ibid.).

#### 4.1.2.2 Medición directa de la evapotranspiración

Para medir directamente la evapotranspiración en superficies de tierra se utilizan los evaporímetros de suelo y lisímetros, los cuales se basan en métodos de presupuesto hídrico o térmico y métodos de difusión turbulenta. Indirectamente se utilizan diversas fórmulas empíricas basadas en datos meteorológicos.

Estos instrumentos (evaporímetros y lisímetros) son sencillos y exactos, siempre que se respeten los requisitos de instalación y técnicas de observación. La estimación de la transpiración de la vegetación es la diferencia entre la evapotranspiración medida y la evaporación del suelo medida simultáneamente (Ibid.).

De acuerdo con la Guía de Practicas Hidrológicas “los evaporímetros de suelo y los lisímetros pueden clasificarse atendiendo a su modo de funcionamiento: a) por peso, que utilizan balanzas mecánicas para reflejar los cambios del contenido de agua; b) por hidráulica, basados en el principio hidrostático de pesada; y c) por volumetría, que mantienen constante el contenido de agua, midiendo la evapotranspiración en términos de la cantidad de agua agregada o extraída. No existe un único instrumento estándar para medir la evapotranspiración.”

#### **Evapotranspirómetros (lisímetros)**

Los evapotranspirómetros (o lisímetros) son recipientes que se instalan bajo la superficie del suelo y se rellenan de tierra en la que pueden cultivarse vegetales. En las publicaciones técnicas de la OMM se describen varios tipos de lisímetros. Se dan detalles sobre determinados instrumentos utilizados en los diversos países, OMM (1966,1994). (OMM, 2012).

En general, un lisímetro consiste en un recipiente interior lleno de una muestra de suelo, y con paredes de retención, o en un recipiente exterior, así como en dispositivos especiales que permiten medir la percolación o las variaciones del contenido en agua del suelo. A nivel internacional, no existe un lisímetro universal normalizado para medir la evapotranspiración (Ibid.).

#### 4.1.2.3 Medición indirecta de la evaporación y evapotranspiración

Como está documentado tanto en publicaciones de la OMM como en las de IDEAM mencionadas anteriormente en este Protocolo, la medición directa de la evaporación y de la evapotranspiración para amplias extensiones naturales de agua o de tierra firme actualmente no es posible. Por esta razón se han desarrollado diversos métodos indirectos basados en mediciones puntuales y otros cálculos que dan resultados aceptables.

La OMM en la Guía de Observaciones Meteorológicas indica que “es posible hacer estimaciones de la evapotranspiración (o de la evaporación en caso de suelo desnudo) midiendo y equilibrando el conjunto de los otros elementos del balance hídrico que intervienen en el recipiente, a saber, la precipitación, el drenaje subterráneo y las variaciones del contenido de agua del volumen de suelo en cuestión. Habitualmente, se elimina la escorrentía de superficie. Se pueden utilizar también los evapotranspirómetros para medir la evaporación o la evapotranspiración potencial del suelo (según esté o no cubierto de vegetación), haciendo que la humedad del suelo corresponda a la capacidad del terreno.” (OMM, 2008).

Para estimar la evaporación de embalses o lagos, parcelas o pequeñas cuencas vertientes se puede realizar mediante un balance hídrico, un balance energético, un estudio aerodinámico y medios complementarios. Las variables meteorológicas en que se basan estos métodos son la radiación solar y de onda larga, la temperatura superficial del aire y de la superficie del agua, la humedad atmosférica o la presión de vapor, y el viento. Los instrumentos los procedimientos utilizados para medir tales variables se pueden consultar en el Capítulo 4 puntos 4.1.3 del Guía de Practicas Hidrológicas (OMM, 2012).

Igualmente en el punto 4.1.5 de esta misma Guía se muestran los avances en la teledetección de parámetros tales como: a) la radiación solar entrante; b) el albedo superficial; c) la cubierta vegetal; d) la temperatura superficial; y e) la humedad superficial del suelo. Igualmente, en otras secciones del mismo capítulo se explica la manera de utilizar estas observaciones para la aplicación de diversos métodos indirectos de estimación de la evaporación.

La estimación de la evaporación en superficies libres a partir de: a) balance hídrico; b) balance energético; c) métodos de transferencia de masas; d) métodos combinados; y e) fórmulas empíricas, se desarrolla en el punto 4.2 de la Guía de Prácticas Hidrológicas (OMM, 2012).

Los diferentes evaporímetros o lisímetros representan tipos de mediciones físicamente diferentes. Los factores de ajuste para obtener, a partir de estas mediciones, estimaciones de la evaporación o de la evapotranspiración real o potencial de los lagos son necesariamente diferentes. Por consiguiente, estos instrumentos y su modo de exposición se describen también con gran detenimiento en la Guía, de tal forma que el usuario comprenda las condiciones de medición. (Ibid.).

#### 4.1.2.4 Evapotranspiración en cuencas de drenaje

De acuerdo con las guías de la OMM, la determinación de la evaporación y de la transpiración como elementos independientes en una cuenca de drenaje no arroja resultados fiables. La evapotranspiración es

uno de los temas de investigación más abordados en hidrología y por tanto se han desarrollado numerosos procedimientos como los que se abordan en la Guía de Prácticas Hidrológicas, Capítulo 4 Sección 4.3 los cuales se clasifican en:

- “Métodos de balance hídrico, como los basados en la utilización de evapotranspirómetros, en el balance hídrico de parcelas de terreno o en el agotamiento de la humedad del suelo;
- método del balance energético;
- métodos de transferencia de masas, como los basados en la velocidad del viento, en el flujo turbulento o en la utilización de recintos;
- una combinación de métodos de balance energético y de transferencia de masas, como el método Penman;
- métodos de predicción, como las ecuaciones empíricas o los índices aplicados a los datos de evaporación en tanque; y
- métodos vinculados a cultivos específicos.

Estos últimos están descritos en el National Handbook of Recommended Methods for Water Data Acquisition (USGS, 1977). “ (OMM, 2012)

El método balance hídrico permite estimar la evapotranspiración, ET, en los casos en que es posible medir o estimar la precipitación, P, la escorrentía fluvial, Q, las infiltraciones profundas, Q<sub>ss</sub>, y las variaciones del almacenamiento, ΔS. La ecuación correspondiente es:

$$ET = P - Q - Q_{ss} \pm \Delta S$$

La evapotranspiración anual en una cuenca en un año hidrológico puede estimarse por la diferencia entre la precipitación y la escorrentía siempre y cuando se haya establecido que las filtraciones profundas son relativamente insignificantes. Para períodos de tiempo menor, meses, semanas, etc, es necesario medir la cantidad de agua almacenada y será viable solo en cuencas pequeñas (Ibid.).

Detalles y referencias sobre la aplicación de métodos tanto de balance hídrico como de balance energético, método aerodinámico, método de Penman-Monteith se encuentran en variadas publicaciones en particular en las guías de la OMM como la de Prácticas Hidrológicas de 2012. El método de coeficiente de cultivo y método de evapotranspiración de referencia en las publicaciones de la FAO.

#### 4.1.2.5 Referencias recomendadas

- OMM No 168 Guía de Prácticas Hidrológicas. Sexta Edición, Volumen I, 2011. Capítulo 4.  
[http://www.whycos.org/hwrp/guide/index\\_es.php](http://www.whycos.org/hwrp/guide/index_es.php)
- OMM- Componentes HOMS D (Medición de variables de evaporación y evapotranspiración mediante teledetección  
[http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/sections\\_es.html](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/sections_es.html)
- Guías y reglamento técnico OMM. [https://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_731\\_es.pdf](https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_731_es.pdf)
- Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos (OMM-N° 8), parte I – Medición de variables meteorológicas, capítulo 1 Generalidades;
- Guía del Sistema Mundial de Observación (OMM-N° 488), parte III, secciones 3.2.1.2.1 Emplazamiento (coordenadas) de las estaciones y 3.2.1.2.2 Zona de observación meteorológica;
- Reglamento Técnico (OMM-N° 49), Volumen II, parte II, apéndice 3, sección 1 Disposiciones generales relativas a observaciones meteorológicas
- ISO 5725 Uncertainty analysis of measurement procedures
- ISO 21748:2010 Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation.

## 4.2 Variables agua superficial

En las estaciones hidrológicas, o puntos de observación medición y vigilancia que se definida en el programa de monitoreo hidrológico en páramo se miden básicamente las variables de nivel de ríos y cuerpos de agua lénticos (lagunas) y caudal de ríos y quebradas.

Los métodos de observación, medición, instrumentos y técnicas se pueden consultar en el Capítulo 5 de la Guía de Practicas Hidrológicas de la OMM No 168 (Versión 6, Volumen I, 2012) (OMM, 2012) y en el Capítulo 7 del Protocolo de Monitoreo del Agua del IDEAM 2017. (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017).

A continuación se hace una síntesis de los instrumentos y procesos de medición de estas dos variables y se hace una relaciona de referencias de consulta.



#### 4.2.1 Niveles de agua de los ríos y cuerpos de agua lénticos (lagunas y embalses)

En la Guía de la OMM el nivel de agua (altura) se define como “la elevación de la superficie de una corriente fluvial, lago u otra masa de agua respecto de un valor de referencia (ISO, 1988b)”. El nivel de agua es el punto de partida para obtener registros de caudal o volúmenes de reservas. Un mayor detalle se consigue en el manual de medición de medidores de caudal (OMM, 2012).

La selección de los puntos de monitoreo para medición de nivel en corrientes fluviales están en función de la finalidad de los registros, de las posibilidades de acceso al sitio y en gran medida de las condiciones hidráulicas ya que estas constituyen un factor importante para el cálculo de caudales a partir de los niveles.

Los medidores de altura de agua se pueden consultar además de las referencias mencionadas en el componente HOMS C71 sobre Instrumentos y equipos- nivel de agua.

Los medidores de altura se clasifican en los no registradores y los registradores (limnógrafos).

##### 4.2.1.1 Medidores no registradores

Los más habituales responden a los tipos siguientes: a) escala limnimétrica vertical graduada; b) medidor en rampa o inclinado; c) medidor de cable lastrado instalado en una estructura por encima de la corriente; d) medidor de varilla, cinta, alambre o extremo graduado para determinar la distancia hasta la superficie del agua; y e) escala de nivel máximo para obtener la elevación de la punta de avenida por adherencia de un corcho regranulado a una estaca graduada mantenida en posición fija respecto del elemento de referencia (Ibid.).

Los medidores no registradores “consisten en una medición directa del nivel del agua a una hora determinada mediante la utilización de instrumentos (mira hidrométrica ó limnómetro, máxímetro, limnicontacto) con diferente conformación física. Este tipo de observación es la más sencilla y económica, sin ser la más precisa, ya que requiere que los datos sean obtenidos por un observador en horas fijas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial, con el propósito de estandarizar estadísticamente el origen de las series históricas y los procedimientos para el manejo de las mismas” (IDEAM-INVEMAR, 2017).

## Limnímetros

Los instrumentos de observación directa tales como limnímetros pueden ser de hierro, lámina esmaltada o lámina pintada. En el Protocolo del Agua del IDEAM se puede consultar el detalle de los requerimientos para la instalación de estos.

## Maxímetros

Para la medición directa de las crecientes se utiliza el maxímetro que es un dispositivo asociado a la mira limnimétrica que permite conocer el máximo nivel alcanzado y hacer la lectura con posterioridad al evento. Existen varios tipos de maxímetros: de tubo, de placa graduada y otro tipo diseñados y construidas en fibra de vidrio.

El maxímetro se instala generalmente a continuación del penúltimo metro de mira. Al igual que en el caso de los limnímetros, para su instalación se deben seguir los mismos patrones y requerimientos técnicos que garanticen una buena fijación y comodidad para realizar las lecturas con exactitud. Igualmente debe ligarse topográficamente al mismo punto de referencia de las miras y el cero (0) del maxímetro debe coincidir con un valor del limnímetro que sea múltiplo de 0, es decir, 3.50, 4.00, 4.30, 4.70, 5.20, etc. (Ibid.).

### 4.2.1.2 Medidores de registro continuo (Limnigrafos)

Estos medidores permiten el registro permanente del nivel del agua a través de equipos automáticos mecánicos o digitales. Este tipo de observaciones son más precisos y registran las variaciones de los niveles en las distintas épocas hidrológicas, es decir, en temporadas húmedas, secas e intermedias (Ibid.).

Se utilizan muy diversos tipos de limnigrafos continuo. Éstos pueden clasificarse atendiendo a su modo de actuación y a su modo de registro. “Una instalación habitualmente utilizada consiste en un pozo de amortiguación conectado a la corriente mediante tubos, con un flotador en el pozo de amortiguación conectado a una rueda situada sobre un registrador mediante un alambre perlado o una cinta perforada. Para corrientes de alta velocidad podría ser necesario instalar tubos estáticos en el extremo de los conductos de entrada, a fin de evitar el descenso del nivel de agua en el pozo.” (OMM, 2012).

El registrador puede ser mecánico o electrónico. La escala temporal y la escala de alturas del agua dependen de la horquilla de alturas del agua, de la sensibilidad de la relación altura-caudal y de las características de escorrentía de la cuenca (Ibid.). La rueda podrá estar también conectada directamente a un codificador. El

codificador proporcionará valores analógicos o digitales, que podrán ser leídos y almacenados por un registrador cronológico de datos.

Dos tipos de limnógrafos utilizados últimamente son los basados en sensores ultrasónicos o de radar. El sensor ultrasónico está basado en la velocidad de desplazamiento de un impulso de frecuencia ultrasónica (>20 kHz), que es emitido por un transmisor situado en una estructura instalada sobre el lago o el río.

### **Limnicontactos**

De acuerdo con el Protocolo de Monitoreo del Agua de 2017 “El limnicontacto o sonda indicadora de nivel, es un dispositivo simple constituido esencialmente por una polea, un contrapeso y un flotador unidos por un cordel o cable abscisado para facilitar la medición. Según el nivel de agua el cable se desplaza con relación a un punto de referencia, permitiendo así obtener la lectura de nivel, La mira propiamente dicha, colocada sobre las estructuras superiores de los puentes, está conformada por placas metálicas de 1 metro”. Hay varios tipos de limnicontacto tales como el de sonda luminosa y el de sonda de presión manométrica.

### **Limnógrafos**

Los limnógrafos son instrumentos de registro continuo de niveles, esenciales en corrientes donde el nivel está sujeto a variadas fluctuaciones. Los limnógrafos pueden ser mecánicos, digitales, electrónicos o telemétricos y se ajustan tomando como referencia un medidor auxiliar flotante de cinta graduada o un limnómetro situado en el interior del pozo de amortiguación.

Tanto en el Protocolo del Agua del IDEAM, Capítulo 7 y en la Guía de la OMM, Capítulo 5, se puede consultar sobre estos medidores de nivel, criterios y procedimientos para su instalación.

### **Cota del cero de la escala (mira)**

En cualquier tipo de medición de nivel es necesario evitar lecturas negativas, por tanto el medidor estará instalado de modo que la lectura del valor cero sea inferior a la altura del agua más baja prevista. Es necesario georreferenciar la cota cero de la mira (escala).

#### **4.2.1.3 Frecuencia de medición de la altura del agua**

En la guía de la OMM se considera que “La frecuencia con que se registre el nivel de agua estará determinada por el régimen hidrológico de la masa de agua y por los fines a que responda la recopilación de datos. En las estaciones de medición de registro continuo, un intervalo de registro horario suele ser

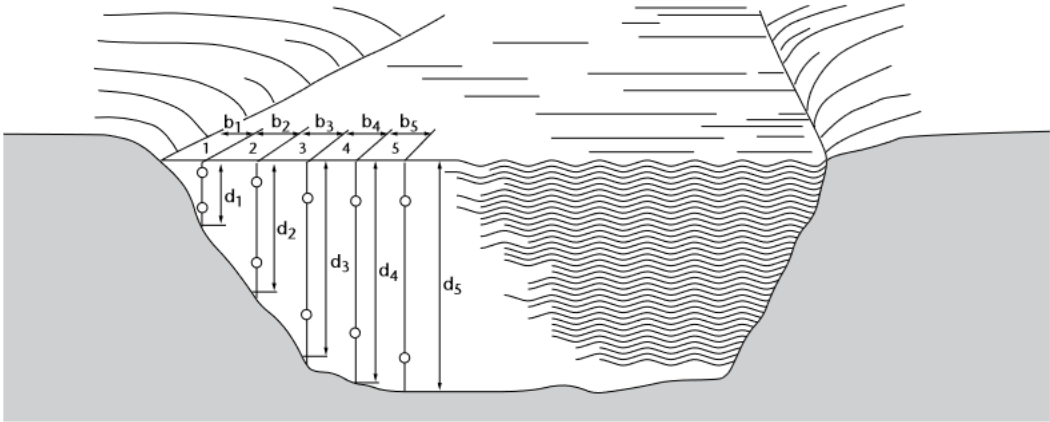
suficiente en la mayoría de los ríos. Para medir corrientes fluviales pequeñas o con crecidas repentinas y cuencas de drenaje urbanas será necesario registrar más frecuentemente la altura del agua, con el fin de obtener un hidrograma suficientemente aproximado. Por lo general, se recomienda registrar la altura del agua con la mayor frecuencia posible, dentro de las limitaciones que impongan la capacidad de la batería y la memoria de almacenamiento de datos” (OMM, 2012).

4.2.2 Mediciones y cálculo de Caudal

Para el monitoreo de cantidad de agua se utilizan las mediciones de volumen por unidad de tiempo, caudal fluvial. El caudal que circula por una sección transversal de una corriente en un instante dado puede medirse utilizando varios métodos diferentes. La selección entre estos métodos dependerá de las condiciones existentes en un emplazamiento dado. Por lo general, el valor del caudal se expresará en función de la altura correspondiente del agua en una estación de aforo (OMM, 2012).

4.2.2.1 Método área -velocidad

La medición del caudal utilizando el método de área velocidad se ilustra en la Figura 26 (Guía de prácticas Hidrológica de la OMM 2012). Este método se denomina de distribución de velocidades, método de un número discreto de puntos para su integración. Se basa en hacer mediciones de la profundidad en verticales de la sección transversal de la corriente y mediante un molinete medir la velocidad en uno o más puntos de la vertical. En función de los anchos, profundidades y velocidades medidas se calcula el caudal para cada segmento de la sección transversal y luego se agregan para obtener el caudal total (ISO, 1979b).



Fuente: Guía de Practicas Hidrológicas ( OMM, 2012)

Figura 26. Sección transversal de una corriente, en la que figura la posición de los puntos de observación

## Selección del emplazamiento

La medición del caudal no necesariamente debe hacerse en el mismo lugar donde se tiene la medición de altura (mira) puesto que el caudal es el mismo al o largo de un tramo de la corriente. Es importante que los sitios donde se realicen las mediciones de caudal cumplan, en lo posible con las siguientes características ((ISO, 1979b):

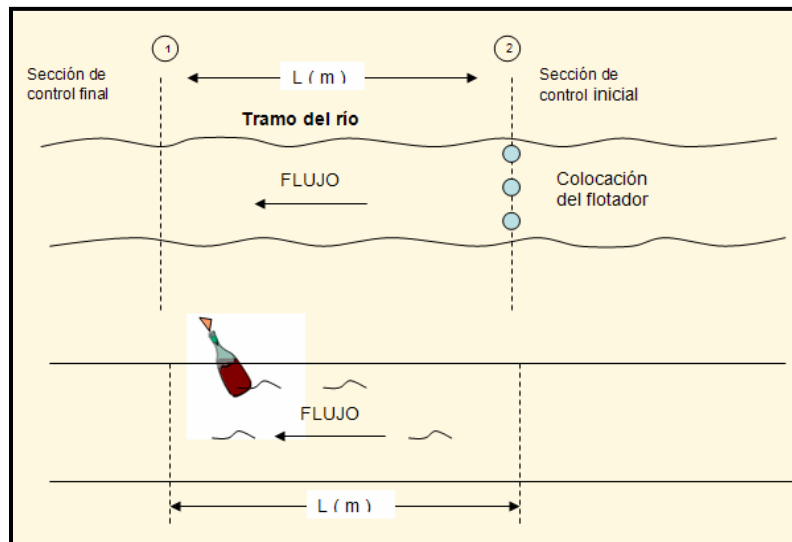
- “las velocidades en todos los puntos serán paralelas entre sí y normales a la sección transversal de la corriente;
- las curvas de distribución de velocidades en la sección serán regulares en los planos vertical y horizontal;
- las velocidades serán superiores a 0,15 m s<sup>-1</sup>;
- el lecho del canal será regular y estable;
- la profundidad de flujo será superior a 0,3 m;
- no habrá formas de vida acuáticas;” (OMM, 2012).

Información detallada sobre las mediciones de la sección transversal y su precisión, así como sobre observaciones de velocidad mediante molinete se pueden consultar en la sección 5.3 de la Guía de Practicas Hidrológicas OMM, en el Reglamento Técnico OMM-Nº 49 (Volumen III), y en los componentes HOMS C79, E79 sobre velocidad del agua, molinetes hidrométricos o flotadores; y mediciones de velocidad, uso de molinetes hidrométricos respectivamente.

### 4.2.2.2 Método del flotador

La medición de caudal mediante flotadores se utiliza en los casos en que no sea posible medir las velocidades con molinete por la magnitud de las velocidades o las profundidades inadecuadas se tengan presencia de grandes cantidades de materiales en suspensión o se requiera una medición en corto período tiempo (OMM, 2012).

El método se basa en calcular la velocidad del flotador a partir de la distancia ente secciones trasversales dividida por el tiempo. Se deben obtener por lo menos 5 valores de velocidad del flotador en cada uno de por lo menos tres segmentos (secciones transversales) en que se divide un tramo de un canal recto, como se muestra en la **Figura 27**.



Fuente: (IDEAM, 2006)

Figura 27. Aforo con flotadores

Pueden utilizarse flotares superficiales o flotadores de varilla. Los de superficie no deben utilizarse cuando hay posibilidad de que el viento afecte la medición. Los de varilla se sumergen a una profundidad equivalente a la cuarta parte de la profundidad del agua (Ibíd.).

“El caudal correspondiente a cada segmento se calcula multiplicando el área promediada de la sección transversal del segmento por la velocidad media del flujo en éste. El caudal total será la suma de todas ellas (ISO, 1979b) “(Ibíd.)

Para profundizar en el tema se puede consultarte además de los protocolos de monitoreo de agua de IDEAM (2006 y 2017), la Guía de Practicas Hidrológicas OMM, 2012 y el componente HOMS C86: Aforos de ríos de OMM (Lanzador de flotadores y norma técnica para medir flujos).

#### 4.2.2.3 Método de dilución (trazadores)

La medición del caudal mediante este método está basada en la determinación del grado de dilución en el agua de una solución del trazador vertida en ella. Se recomienda el uso de este para secciones transversales donde se encuentren grandes turbulencias y remolinos, régimen torrencial, altas pendientes, poca profundidad, lechos inestables y líneas de flujo desordenadas (IDEAM-INVEMAR, 2017).

Los aforos con trazadores también llamados aforos químicos, permiten conocer el caudal a partir de la variación de concentración de una sustancia inyectada en el cauce que permite estudiar su comportamiento y evolución (Ibid.).

Información sobre los procedimientos de aplicación, tipo de trazadores, equipos y cálculo de caudal se pueden consultar en el Protocolo de Monitoreo de Agua de IDEAM ( 2017), en la Guía de Practicas Hidrológicas OMM (2012) Capítulo 5 (ítem 5.3.4) y en el Componente HOMS E73 sobre *Medición de caudal, aforo por dilución* (Procedimientos fluorometricos para trazado con tintas; Mediciones del tiempo de recorrido y dispersión en cursos de agua por trazado con tintas; Determinación de coeficientes de re aireación de cursos de agua por trazadores; y Mediciones de caudales mediante trazadores).

#### 4.2.2.4 Estructuras aforadoras

En la Guía de Practicas Hidrológicas y (OMM, 2012) y Protocolo de Monitoreo del Agua IDEAM se desarrolla extensamente el tema.

Como se menciona en la Guía las estructuras aforadoras han sido estudiadas y calibradas en diferentes condiciones experimentales. Para cada estructura es posible obtener una ecuación de descarga (relación Nivel-Caudal) que permite determinar el caudal instantáneo en función de la altura de la lámina de agua con respecto a un punto de la estructura. Esta altura se mide con una mira o un instrumento registrador.

Las principales estructuras se clasifican en vertederos y canaletas y cada uno de ellas tiene diferentes tipos, aplicables según las condiciones específicas de los sitios de medición.

En el Protocolo de Monitoreo del Agua del IDEAM se diferencian tres tipo de vertedero: rectangular, trapezoidal o triangular y tiene las siguientes características:

“*Vertedero rectangular*: puede ocupar total o parcialmente el ancho del canal, presentando contracciones laterales que reducen la longitud efectiva de la cresta, y en consecuencia el caudal medido por pérdidas por rozamiento.

*Vertedero trapezoidal* (Cipolletti): se construye con paredes laterales inclinadas en una relación 1 horizontal a 4 vertical.

*Vertedero triangular*: se recomienda para medición de caudales pequeños, siendo en particular conveniente para medición de caudales muy fluctuantes. Los más utilizados son los de escotadura con ángulo de 90° y 60°” (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017).

Los vertederos tienen ventajas importantes ya que las mediciones de caudal son precisas, la construcción de la estructura es sencilla y no son obstruidos por materiales flotantes en el agua, con buen mantenimiento la duración del dispositivo es larga. La elección del tipo y dimensiones del vertedero dependen fundamentalmente del caudal máximo previsto a medir (Ibid.).

Las canaletas son estructuras de aplicación en terrenos planos principalmente puesto que funcionan a flujo libre con pérdidas de carga pequeñas. Las principales son: Tipo Gallofe, Medidor sin cuello (cutthroat) y Canaleta Parshall. Estas estructuras aforadoras no son recomendadas para corrientes de agua en alta montaña.

#### 4.2.2.5 Métodos indirectos

Estos métodos para el cálculo de caudal son utilizados cuando hay condiciones difíciles para la medición, tales como período de crecidas por la variación excesiva del caudal y de velocidad al igual que presencia excesiva de residuos o una profundidad o anchura excesiva, inundaciones que no permitan el acceso a las estructuras de medición.

Todos los métodos conllevan una resolución simultánea de las ecuaciones de continuidad de la masa y la energía. Las formulas hidráulicas difieren según el tipo de vía del agua (tramo de canal fluvial, desagüeros transversales, etc.) todos los métodos consideran los siguientes factores, (OMM, 2012):

- Geometría y características del canal, condición de contorno del tramo estudiado
- Elevaciones de la superficie del agua en los momentos de la altura máxima
- Factores hidráulicos, como los coeficientes de rugosidad basados en las características físicas.

Esta Guía (Capítulo 5, ítem 5.3.5) presenta los métodos para mediciones indirectas de caudal tales como:

- Mediciones mediante método área-pendiente (ISO, 1973b)
- Medición del flujo a través de alcantarillas
- Medición del flujo en estrechamientos
- Medición del flujo sobre vertederos, presas y terraplenes de carretera



#### 4.2.2.6 Método para medición de caudal en condiciones difíciles

En la publicación *Level and Discharge Measurements under Difficult Conditions* (WMO-No. 650) se aborda la medición de caudal en condiciones difíciles. En la Guía se mencionan los métodos para canales inestables, curso de agua de montaña, caudal durante crecidas y mediciones en ríos con marea.

Para los ecosistemas de páramo son de particular relevancia los métodos de medición de caudal en curso de agua de alta montaña ya que estos se caracterizan por velocidades de flujo elevadas, lechos poco profundos y desiguales, pendientes transversales y desiguales de superficie de agua, entre otros.

#### 4.2.2.7 Métodos de medición en cuerpos de hielo o nieve.

Los ecosistemas glaciares (nevados) en Colombia se encuentran por encima de los 4.800 metros de altitud y han sido objeto de mediciones sistemáticas y continuas por parte del IDEAM. Los glaciares se consideran reservas de agua en la alta montaña y dadas las condiciones climáticas actuales ingresan agua en estado líquido gradual pero continuo a los ecosistemas de páramo. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-, 2014).

El monitoreo de glaciares se realiza para evaluar los cambios en la geometría del glaciar durante un período de tiempo, con base en las variaciones de longitud, superficie y volumen.

Para las mediciones se siguen metodologías avaladas mundialmente y recomendadas por el Grupo de Trabajo de Niveles y Hielos (GTNH-PHI-LAC-UNESCO) del Institut de Recherche Pour le Développement (IRD), la Universidad de Zürich (Suiza) y el World Glacier Monitoring Service (WGSM, por sus siglas en inglés) (IDEAM, 2012).

En el Protocolo de Monitoreo del Agua (IDEAM, 2017) se presentan los criterios de selección de puntos, los tipos de medición, parámetros, instrumentos y frecuencia requerida con base en lo publicado en el libro sobre Glaciares de Colombia de 2012.

#### **Condiciones de uso de métodos de aforo**

Con anterioridad a la realización de un aforo, éste debe ser planeado teniendo en cuenta las características de la sección y el caudal de la corriente. En la

Tabla 11, se muestra una relación de los métodos de aforo las condiciones de uso de cada método según el área de la sección transversal donde se puede aplicar y una guía con los límites de magnitud de caudales o de velocidad para los cuales son recomendados los diferentes métodos.

**Tabla 11.** Condiciones de uso de los métodos de aforo

Método de aforo	Sección	Caudal o velocidad
<b>Volumétrico</b>	Pequeña (< 1 m <sup>2</sup> )	Q<100 l/s
<b>Estructuras aforadoras</b>		
- <b>Vertederos</b>	Pequeñas (< 1 m <sup>2</sup> )	v< 0,15 m/s
- <b>Canaletas</b>	Pequeñas (preferible <2,5 m ancho)	Q<4 m <sup>3</sup> /s
<b>Molinete hidrométrico</b>		
- <b>Por vadeo</b>	Profundidad < 1m	V<1 – 3 m/s
- <b>Por suspensión</b>	Profundidad > 1m	V>1 – 3 m/s
- <b>Angular</b>	Grandes ríos donde se requiere apoyo topográfico para medir posición del bote en su recorrido	Velocidad en general entre 1 y 3 m/s
- <b>Bote cautivo</b>	Ríos o canales medianos que permiten extender y alinearse con manila	Velocidad en general entre 1 y 3 m/s
- <b>Bote móvil</b>	Ríos muy anchos y caudalosos	Velocidad en general entre 1 y 3 m/s
<b>Flotadores</b>	Muy baja profundidad	Baja precisión
<b>Dilución con trazadores</b>	Muy baja profundidad, alta presencia de sedimentos	Turbulencia, velocidades muy altas. Baja precisión.
<b>Ultrasónico</b>	ADCP: hasta 220 m de profundidad. Pequeños a grandes ríos.	Velocidades hasta 9 m/s.

Fuente: (OMM, 2012)

En el mismo sentido en la siguiente tabla se resumen los equipos que utilizan para cada uno de los métodos de aforo ya sea de tipo mecánico, eléctrico o químico (Tabla 12).

**Tabla 12.** Tipos de equipo para aforo según el método

Métodos		Equipo	Tipo de equipo
<b>Métodos área velocidad</b>	Aforo por vadeo Aforo por suspensión Aforo angular Aforo en bote cautivo Aforo en bote cautivo Aforo con lancha en movimiento	Estos métodos utilizan molinetes o mini molinetes de copa o de hélice.	Electromecánico
	Aforo con flotadores	Flotadores que miden la velocidad superficial	Mecánico
	Perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP)	ACDP que calcula las componentes de la velocidad del agua en las 3 direcciones.	Electrónico
<b>Método volumétrico</b>	Método área- pendiente	Se determinan la pendiente y rugosidad, la velocidad se calcula con Manning o Chezy	Mecánico
	Aforo volumétrico	Recipiente con volumen conocido y cronómetro	Mecánico
<b>Método de dilución</b>	Inyección de la sustancia a un caudal constante Inyección instantánea	Aforo con sustancias químicas (trazadores).	Químico
<b>Estructuras aforadoras</b>	Vertederos: Rectangular, trapezoidal, triangular Canaletas: Parshall, medidor sin cuello, tipo Balloffet	Tienen ecuaciones que permiten determinar el caudal instantáneo en función de su geometría.	Mecánico o electromecánico

Fuente: (OMM, 2012)

Los métodos de aforo para los ecosistemas de páramo más adecuados por la característica biofísica son las estructuras aforadoras, área velocidad, volumétricos y dilución. En el Programa de monitoreo específico una vez se programe la campaña de medición se decidirá el método más adecuado.

#### 4.2.2.8 Referencias recomendadas

- OMM No 168 Guía de Prácticas Hidrológicas. Sexta Edición, Volumen I, 2011. Capítulos 5  
[http://www.whycos.org/hwrp/guide/index\\_es.php](http://www.whycos.org/hwrp/guide/index_es.php)
- WMO No1044 Manual on Stream Gauging. Volumen I. 2010  
[http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/stream\\_gauging/1044\\_Vol\\_I\\_en.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/stream_gauging/1044_Vol_I_en.pdf)
- WMO No 49 Technical regulation VOLUME III Hydrology  
[https://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=4564](https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4564)
- OMM Lista componentes HOMS  
[http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/complist\\_es.html](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/complist_es.html)

### 4.3 Parámetros calidad de agua

#### 4.3.1 Metodologías de muestreo y análisis

En cualquiera de los tipos de agua estudiados (superficiales, subterráneas o agua lluvia) y en cualquiera de las variables (físico-químicas, microbiológicas e hidrobiológicas) se recomienda el uso de las metodologías de muestreo y métodos de análisis del IDEAM, ya que este Instituto tiene como función el desarrollo de los estándares de monitoreo de aguas y es el que acredita a los laboratorios. En este sentido se señalan los Protocolos del Agua de 2007 y los que están por ser publicados que se enmarcan dentro del PNMRH, para cumplir con los objetivos de este Protocolo de Monitoreo Hidrológico en Ecosistemas de Páramos.

#### 4.3.2 Equipos para muestreo calidad de agua

##### 4.3.2.1 Agua superficial

A continuación se detallan los equipos necesarios para el muestreo de las variables mínimas indicadas previamente (Tabla 13. Material mínimo para el monitoreo de variables físico-químicas y Tabla) es decir, DQO, SST, PT, NT, OD, pH, CE, macroinvertebrados y diatomeas.

**Tabla 13.** Material mínimo para el monitoreo de variables físico-químicas

Material Físico Químico campo
Frasco polietileno 1000 ml
Frasco ámbar 500 ml
Agua destilada

Reactivos fijación (depende del procedimiento de laboratorio)
Sonda multiparamétrica (T, OD, CE; pH)

**Tabla 14.** Material mínimo para el muestreo de variables hidrobiológicas

<b>Materiales Hidrobiológicos campo</b>
Cepillo dientes
Red Surber para macroinvertebrados
Frascos plásticos muestras Macroinvertebrados
Frascos plásticos muestras Diatomeas
Agua destilada
Etanol para la fijación de muestras

Estos son los materiales básicos que se requieren para el monitoreo, pero dependiendo de los procedimientos y las técnicas de análisis en laboratorio pueden ser incrementados. Además se debe llevar al monitoreo material básico como marcadores, documentos, fichas de campo, documentación, bolsas plásticas, etc.

#### 4.3.2.2 Agua subterránea

Los materiales que se requieren para el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas basada en estos parámetros son los siguientes (Tabla 15).

**Tabla 15.** Material de campo requerido para el monitoreo de las variables mínimas para agua subterránea

<b>Materiales campo aguas subterráneas</b>
Sonda multiparamétrica (pH, CE, OD, T)
Frasco ámbar 1000 ml
Frascos polietileno
Agua destilada
Reactivos fijación (depende del procedimiento de laboratorio)
Muestreador dependiendo del método de muestreo (a profundidad o por bombeo)

Los materiales de campo en el caso de las aguas subterráneas dependen en gran medida del tipo de muestreo que se vaya a realizar lo que depende del acuífero y del pozo. En general se suelen llevar a cabo muestreos por bombeo cuando la calidad del agua subterránea es verticalmente uniforme y existe un método de bombeo, ya sea en el pozo o uno portátil. Otro tipo de muestreo es el muestreo a profundidad en el que se baja un dispositivo por el interior del pozo dejando que se llene a una profundidad conocida. En este segundo caso se requiere de muestreadores tipo thief o tipo grab dependiendo del mecanismo de cierre del dispositivo que se requiera (IDEAM, 2013).

En el caso del monitoreo de aguas subterráneas en ecosistemas de páramo, se recomienda el muestreo en manantiales, ya que no suele haber muchos pozos existentes y el costo de perforación, mantenimiento y control de un pozo es muy elevado y complicado en estos entornos, ya que no hay muchos habitantes en la zona.

#### 4.3.2.3 Agua lluvia

En lo relativo a los equipos de monitoreo necesarios para muestreo de agua lluvia se resumen en la siguiente tabla (Tabla 16).

**Tabla 16.** Materiales de muestreo de agua lluvia

<b>Materiales campo agua lluvia</b>
Sonda multiparamétrica (pH, CE, OD, T) o Phmetro y Conductivímetro
Frasco polietileno 1000 ml
Agua destilada
Reactivos fijación (depende del procedimiento de laboratorio)

En el caso del muestreo de agua lluvia se requiere la instalación previa de una estación meteorológica que posea, como mínimo, un pluviómetro. En la instalación de esta estación meteorológica se debe tener en cuenta la posible evaporación o contaminación de la muestra e instalar un sistema que evite estos dos procesos en el agua recolectada de la lluvia, ya que los muestreos no se van a realizar inmediatamente después de las lluvias.

#### 4.3.3 Toma de muestras y procedimientos de laboratorio

##### **Calidad de la toma de muestra en campo**

El muestreo es el primer paso para asegurar una calidad en los datos. Si el muestreo no se realiza de la forma correcta, los datos no serán fiables aunque todos los procedimientos posteriores sean correctos. Para asegurar la fiabilidad del muestreo se deben llevar a cabo diferentes acciones.

- Comprender y realizar el protocolo de monitoreo de cada parámetro o variable como se indica en los procedimientos metodológicos. En este caso, dado que se ha recomendado el uso de los protocolos del IDEAM, se deben leer y comprender las metodologías y llevarlas a la práctica tal y como están explicadas en los protocolos del agua.
- Llevar a cabo auditorio o controles de calidad de los muestreos. Independiente de que los muestreos los realice una entidad pública o privada, el contratante o financiador del servicio debe llevar a cabo controles de calidad de los muestreos para asegurar que se están realizando todos los procedimientos según lo establecido en las metodologías de campo. Estos controles de calidad o “auditorias” se realizan de forma esporádica y al azar, acompañando al equipo de campo en el muestreo de alguna estación para verificar que se entienden y se ejecutan correctamente los procedimientos. Por ello, es importante que el funcionario que realice el control de calidad conozca a la perfección dichas metodologías. Debido a las dificultades logísticas en ecosistemas de páramo, esta recomendación es complicada de llevar a cabo, pero se recomienda su uso siempre que sea posible. En caso contrario, se puede asegurar la calidad del muestreo mediante los otros puntos definidos.
- Correcta capacitación del personal de campo. Dado que estos protocolos de monitoreo hidrológico de ecosistemas de páramos se desarrollan con el objetivo de llevar a cabo un muestreo rutinario, se recomienda que el mismo equipo de trabajo los lleve a cabo sistemáticamente. Esto facilita la capacitación del mismo, ya que tras la primera capacitación para conocer las metodologías, solo se requerirán pequeñas actualizaciones cuando sea necesario. En cambio, si el equipo de trabajo cambia con cada monitoreo, se requerirá una capacitación completa del equipo previamente a cada campaña de monitoreo.

### **Calidad en los procedimientos de laboratorio**

Para asegurar la calidad de los datos obtenidos se propone en primera instancia llevar a cabo, al menos los análisis físico-químicos, por triplicado con el objetivo de asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Esto permite comparar los 3 resultados obtenidos, asegurando que todos ellos sean similares y utilizando la media aritmética como el dato final resultante. En caso de que los datos de las 3 réplicas analizadas no sean similares, se deberá realizar de nuevo el análisis por triplicado.

En el caso de los parámetros microbiológicos e hidrobiológicos no se recomienda el análisis por triplicado debido al alto costo de tiempo que suponen. Por ello, se propone llevar a cabo controles de calidad de los resultados. Para ello, se toman el 10% de las muestras obtenidas al azar, y se realiza el análisis completo nuevamente, a ser posible, por una persona diferente a la que realizó el primer análisis de dichas muestras. Para comprobar que los análisis están bien realizados debe haber una diferencia menor al 10% en los resultados obtenidos. Este porcentaje de error se puede entender de diversas formas:

- En el recuento y por tanto en la frecuencia relativa o cantidad de organismos de cada especie, familia o género, dependiendo del nivel taxonómico al que se realice el análisis. En este caso, solo se deben tener en cuenta las especies dominantes, ya que las especies raras con frecuencias relativas menores al 2% distorsionarían el resultado de este control de calidad.
- En el valor resultante del índice de calidad de cada una de las comunidades de organismos analizadas. Este control es más fácil de llevar a cabo y más confiable para el análisis de la calidad ecológica, pero se requiere que el índice de calidad de microbiología y de cada uno de los parámetros hidrobiológicos analizados esté desarrollado y verificado su correcto funcionamiento.

Además para asegurar la fiabilidad de los datos obtenidos en laboratorio, se requiere el control rutinario de los equipos e instrumentos utilizados para el análisis. En este aspecto, no se puede recomendar la frecuencia de control, ya que la misma depende de cada equipo y de cada laboratorio.

En cualquier caso, se recomienda el uso de laboratorios de calidad y acreditados por el IDEAM.

#### 4.4 Flujos e interacciones: agua atmosférica - superficial-subsuperficial y subterránea

El muestreo inicial comprende los parámetros in situ pH, Temperatura, Conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, los cuales se obtienen en campo por medio de una sonda multiparamétrico. Esta sonda debe ser calibrada cada día, de acuerdo con el manual de usuario y se debe siempre corroborar que los sólidos disueltos totales se encuentren entre el 55-76% de la conductividad eléctrica medida.

Para el análisis de los iones mayoritarios  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  se deben recolectar las muestras siguiendo los lineamientos del “Protocolo del Agua-Ideam” y preservando las muestras con base a lo indicado por el laboratorio. Las muestras deben estar bien almacenadas y enviadas en los tiempos adecuados a un laboratorio acreditado. Aunque la validación de estos análisis suele ser un



proceso complejo, se recomienda siempre tener en cuenta como mínimo los siguientes criterios: i) error en el balance iónico debe ser menor al 5%. ii) relación entre conductividad eléctrica y sumatoria cationes (meq/l) con valores de 100 aproximadamente. iii) relación Sólidos Disueltos Totales y conductividad eléctrica entre 0,55 y 0,76. (Houslow, 1995).

El monitoreo isotópico debe contemplar como mínimo los siguientes aspectos:

- *Precipitación:* se deben instalar totalizadores que recolecten la cantidad de agua lluvia a nivel mensual cada 500m. La instalación de los totalizadores y recolección de las muestras deberá seguir las indicaciones del protocolo proporcionado por la Organización Internacional de energía atómica-OIEA.
- *Ríos y humedales:* Se deben recolectar las muestras a una frecuencia determinada, en el centro del río o humedal y en la medida de lo posible, lejos de la superficie. Se debe evitar zonas estancadas. En cuencas pequeñas, menores de 50km<sup>2</sup> se debe considerar mediciones semanales o a la escala del evento. Para cuencas mayores de 50km<sup>2</sup> la frecuencia de medición dependerá del objetivo concreto, pero en términos generales se considera que frecuencias semanales, quincenales es suficiente, dado que los tiempos de viaje son mayores.
- *Aguas subterráneas:* El agua subterránea en los sistemas de Páramos y sus sistemas asociados estará representada por los manantiales, debido a que no suelen encontrarse aljibes o pozos. Por lo tanto, es necesario contar con un inventario de manantiales, con el fin de tomar la muestra en ellos, siguiendo los protocolos de monitoreo especificados por la OIEA.

Las muestras deben ser analizadas en laboratorios acreditados que tengan una incertidumbre menor de 0,1 y 0,5‰ para el 18O y 2H respectivamente. Una vez que se obtengan los datos, el análisis de la calidad de la información debe procederse de la siguiente manera:

- Registrar la cantidad de precipitación en cada totalizador.
- Para cada resultado de 18O y 2H, calcular el exceso en deuterio “d”, de la siguiente manera:  $d_{exc} = \delta^{2}H - 8 \cdot \delta^{18}O$ . El exceso en deuterio es generalmente utilizado como un marcador de procesos de evaporación. En efecto la evaporación del agua de superficie tendrá una tendencia a enriquecer isotópicamente el agua restante, disminuyendo su  $d_{exc}$ . Del mismo modo, un  $d_{exc}$  notablemente superior a 10 es signo de procesos de reciclaje de vapor continental a partir de la superficie del agua libre o del mar cerrado como el Mediterráneo. (Mook, 2002). De esta manera, las muestras de cualquier reservorio que no esté sometido a la evaporación tendrá un exceso en deuterio mayor que

8. Por el contrario cuando las muestras tienen un exceso en deuterio levemente menor que 8, se considera un efecto de evaporación leve, con valores entre 4 y 6, se considera un efecto de evaporación importante y con valores inferiores a 3, se puede considerar que han sido muestras mal tomadas o que han sido evaporadas en su procesos de almacenamiento.

- Se compara la tendencia de la precipitación en el tiempo y en la altura: a mayor altura se deben obtener valores más empobrecidos (más negativos de los isótopos) y a mayor cantidad de lluvia se obtienen valores más empobrecidos en los isótopos.
- Se establece un gradiente isotópico de la precipitación
- Se analiza el comportamiento temporal de los datos de fuentes de agua superficial y subterránea: en sistemas donde el agua superficial o subterránea está poco influenciada por la precipitación, se observará que la composición isotópica del  $18\text{O}$  se encuentra estable en el tiempo. Por el contrario, cuando la precipitación tiene un rol importante, se observan grandes diferencias de hasta 5‰ en el tiempo.
- Se comparan los resultados del agua subterránea con el gradiente altitudinal, para estimar la altitud a la cual se recarga el agua.
- Se comparan los datos de agua subterránea vs superficial.

El protocolo de monitoreo del agua (IDEAM 2017), en el capítulo 7 amplía el tema de procedimientos en campo del monitoreo isotópico. En particular considera los siguientes aspectos: la selección de puntos, tipos de medición en ríos, lagos y embalses (diferentes trazadores) y en alta montaña. Además presenta las características de materiales y equipos y los procedimientos para la toma de muestras. (IDEAM & INVEMAR, Protocolo de Monitoreo del Agua, 2017).

## 5. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOCOLO.

### HOJA DE RUTA GENERAL

En el marco de lo propuesto y teniendo en cuenta las características del proceso planteado para formular los programas y desarrollar el monitoreo hidrológico en los ecosistemas de páramo a continuación se presenta una hoja de ruta general para avanzar en la implementación de este protocolo, complementación y ajustes si es necesario:

- a. Aplicar Protocolo de Monitoreo en un Complejo de Páramo como proyecto piloto para probar la viabilidad de la propuesta.
  - Con el propósito de respaldar y analizar la viabilidad de implementación de las propuestas consolidadas en el Protocolo, se sugiere definir conjuntamente entre el Instituto Alexander von Humboldt-IAvH y el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, los criterios para seleccionar un Complejo de Páramo que permita evaluar y ajustar las metodológicas propuestas en el Protocolo para adelantar el monitoreo hidrológico
  - Con base en los criterios seleccionar el Complejo de Páramo para aplicar el Protocolo e implementar el monitoreo hidrológico y propiciar, conjuntamente IAvH e IDEAM, una alianza interinstitucional público – privada, incluyendo academia y en lo posible la comunidad.
  - A partir de esta alianza y de un trabajo interinstitucional formular un Proyecto de Monitoreo Hidrológico en el Complejo Páramo seleccionado
  - Identificar posibles fuentes de financiación y gestionar los recursos para desarrollar el Proyecto.
  - Desarrollar el Proyecto de aplicación del Protocolo y el monitoreo hidrológico, documentar el proceso y lecciones aprendidas.
  - Evaluar los resultados del Proyecto de aplicación en el Complejo, identificar y realizar ajustes y complementos. Elaborar la segunda versión del Protocolo para ser replicada su aplicación en otros Complejos de Páramo.
- b. Integrar el Protocolo de Monitoreo Hidrológico en Páramos en el desarrollo el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, actualmente en proceso de aprobación y adopción por parte del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS.
- c. En el marco de la estrategia integral de monitoreo de la alta montaña, actualizar y complementar el estado del arte del monitoreo hidrológico e hidrogeológico en páramos de Colombia, con los estudios e investigaciones desarrollados por las instituciones, universidades, centros de investigación.
- d. Desarrollar una propuesta de arreglo institucional y operativo orientada a garantizar la sostenibilidad del monitoreo hidrológico, la generación de datos, información y conocimiento sobre el agua en los ecosistemas de páramo y sobre los servicios ecosistémicos que prestan, en particular de regulación, provisión y agua de buena calidad.
- e. Paralelo al desarrollo del Proyecto piloto de aplicación del Protocolo de Monitoreo Hidrológico en un Complejo de Páramo avanzar en formular e implementar una estrategia de capacitación y entrenamiento para actores nacionales y regionales que tienen como función el monitoreo hidrológico. En particular

esta capacitación orientada a los temas del Protocolo tales como: modelación basada en el análisis combinado de información y datos meteorológicos obtenidos mediante sensores remotos y estaciones hidrometeorológicas; aplicación de la isotopía e hidroquímica en el monitoreo de flujos y conexiones agua superficial, subsuperficial y subterránea; monitoreo de la calidad ecológica del agua y bioindicadores.

## BIBLIOGRAFIA

- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2002). *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatica Tensor*. Bogotá: Imprenta IDEAM.
- &Simon, D. (1995). *Introduction. In: Biological assessment and criteria. Tools for water resource planning and decision making*. Florida: Lewis Publishers.
- Aguillo, I. F. (marzo-abril de 2014). Políticas de información y publicación científica. *El profesional de la información*, v. 23(n. 2), pp. 113-118. doi:<http://dx.doi.org/10.3145/epi.2014.mar.02>
- AIGOS. (2015). *Implementación de la bioindicación en el Río Magdalena, Campaña de muestreo para el diagnóstico de las estaciones de la red*. Bogotá.
- AIGOS. (2016). *Implementación de la bioindicación en el Río Magdalena, Campaña de muestreo para el diagnóstico de las estaciones de la red y determinación de la calidad del agua*. Bogotá.
- Akins, L. M., & Akins, J. H. (2009). *Technical report writing guidelines*. Recuperado el 27 de noviembre de 2015, de <http://www8.sunydutchess.edu/faculty/akins/documents/TechnicalReportWritingGuidelines.pdf>
- American Psychological Association. (2010). *Manual de publicaciones de la American Psychological Association* (Tercera edición ed.). (M. Guerra Frías, Trad.) México ; Bogotá: El Manual Moderno.
- Anglada, L. (marzo-abril de 2014). De qué hablamos cuando hablamos de políticas de información. *El profesional de la información*, v. 23(n. 2), pp. 105-111. doi:<http://dx.doi.org/10.3145/epi.2014.mar.01>
- ASCONIT. (2014). *Mejora de la gestión integral de los recursos acuaticos en Colombia: Implementación de indicadores biologicos de la calidad de las aguas*. Bogotá.
- Asociación Española de Normalización. (1996). *Documentación y presentación de informes científicos y técnicos*. Madrid: AENOR.

- Bhatt, G. D. (2000). Organizing knowledge in the knowledge development cycle. *Journal of Knowledge Management*, 4(1), 15 - 26.
- Cameraat. (2014). Calidad del agua en relación con las propiedades del ecosistema. En Cuesta, *Avances de investigación para la conservación de los paramos andinos*.
- Carrillo, J., Cardona, A., & Huizar, R. (2007). *Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico*. . México D.F: Environment Geol. Springer Verlag Editores.
- Castellanos. (2008). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en un nacimiento de río en el páramo de Santurbán, Norte de Santander. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 79-86.
- Cellri et al, R. D. (2012). *Guía Metodológica para el Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos*. Cuenca - Ecuador.
- Chaphekar, S. (1991). An overview on bioindicators. *J. Env. Biol.*, 163-168.
- Chavarec. (2000). The Austrian way of assessing ecological integrity of running waters: a contribution to the EU Water Framework Directive. *Hydriobiologia*, 445-452.
- CIRMAG. (2017). *Documento técnico final de los resultados de la campaña 2016. Convenio especial de cooperación en ciencia y tecnología No. 1-0016-2016 entre CIRMAG y CORMAGDALENA*. Bogotá.
- Cocha. (2009). Estado actual de la calidad físico-química, bacteriológica y biológica del agua en la subcuenca del Río Yanuncay en dos estaciones climáticas (invierno y verano) del cantón Cuenca Provincia del Azuay – Ecuador. *Trabajo de pregrado en Biología*.
- Coello. (2013). Aplicación del ICA-NSF para determinar la calidad del agua de los ríos Ozogoché, Pichahuiña y POMacocho – Parque Nacional Sangay – Ecuador. *Rev. del instituto de investigación RIIGEO*, 66-71.
- Colciencias. (2010). *Documento guía: servicio permanente de indexación de revistas de ciencia, tecnología e innovación colombianas*. Recuperado el 27 de noviembre de 2015, de <http://publindex.colciencias.gov.co:8084/publindex/docs/informacionCompleta.pdf>

- Colciencias. (26 de marzo de 2014). *Guía para la presentación de informes técnicos de avance y final de programas y proyectos de CTeI*. Recuperado el 27 de noviembre de 2015, de <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/documentos/2014/guiaPresentacionInformesTecnicosCTeI.PDF>
- Comisión Europea. (2000). Directiva 2000/60/CE . *Directiva Marco del Agua*. Europa.
- Communities, E. (2007). *Ecological Quality Ratios for Ecological Quality Assessment in Inland and Marine Waters REBECCA Deliverable 10* . Europa: European Communities.
- CONDENSAN. (2012). *Puente entre alturas: la sistematización del Proyecto Páramo Andino en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú*.
- Council of Science Editors Style Manual Committee. (2006). *Scientific style and format the CSE manual for authors, editors, and publishers* (7th ed. ed.). Reston, Virginia: Council of Science Editors in cooperation with the Rockefeller University Press.
- Crespo Coello, P., & Rofriguez, T. (2012). *Puente entre Alturas. La sistematización del proyecto Páramo Andino en Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú*. Quito: CONDESAN.
- David, & Simon. (1995). *Introduction*. In: *Biological assessment and criteria. Tools for water resource planning and decision making*. Florida: Lewis Publishers.
- De Bièvre, B., & Ochoa Tocachi, B. (17 de Septiembre de 2015). *Monitoreo hidrológico para evaluar el impacto de la infraestructura verde*. Obtenido de [http://www.sunass.gob.pe/doc/ConversatorioInfra2015/dia3/24\\_Monitoreo%20Hidrologico%20para%20evaluar%20el%20impacto%20en%20infrestructura%20verde,%20Bert%20DeBievre.pdf](http://www.sunass.gob.pe/doc/ConversatorioInfra2015/dia3/24_Monitoreo%20Hidrologico%20para%20evaluar%20el%20impacto%20en%20infrestructura%20verde,%20Bert%20DeBievre.pdf)
- DNP. (2012). *Documento Conpes. Estrategia Institucional y Financiera de la Red Hidrológica, Meteorológica y Oceanográfica del País*. Bogotá: Sin publicar .
- Eehot et al. (1996). *National Biomonitoring Programme for Riverine Ecosystems: Technical considerations and protocol for the selection of reference and monitoring sites*. NBP Report Series N° 3. South Africa: Institute of water quality studies.

- Eehout. (1996). *National Biomonitoring Programme for Riverine Ecosystems: Technical considerations and protocol for the selection of reference and monitoring sites. NBP Report Series N° 3.* . South Africa: Institute of water quality studies.
- Eftekhazadeh, R. (2008). Knowledge management performance in manufacturing organization. En J. Pindado García, & G. Payne, *Estableciendo puentes en una economía global* (Vol. 1, pág. 58). Madrid, España: Escuela Superior de Gestión Comercial y Marketing, ESIC.
- García , M. (2010). *Definición de criterios para la delimitación de los diferentes tipos de páramos del país y de lineamientos para evitar efectos adversos sobre su integridad ecológica.* Bogotá: Sin publicar.
- García, L. (2015). *Monitoreo de variables biológicas –bioindicación- para la actualización del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico.* Bogotá: Sin publicar.
- Gavilán, C. M. (15 de enero de 2009). *La normalización de la identificación bibliográfica ISBD, ISBN, ISSN.* Recuperado el 27 de noviembre de 2025, de <http://eprints.rclis.org/14250/1/normaliza.pdf>
- Gaviria. (1984). Evaluación limnológica inicial del embalse de Chuza en el páramo de Chingaza. *Acodal*, 5-48.
- Giménez Toledo, E., Román Román, A., & Vázquez Valero, M. (2001). Normalización. En A. Román Román (Ed.), *La edición de revistas científicas: guía de buenos usos* (págs. 17-34). Madrid: CINDOC.
- Gómez Vieites, Á., & Suárez Rey, C. (2004). *Sistemas de información: herramientas prácticas para la gestión empresarial.* México: Alfaomega; Ra-Ma.
- Gómez, S., Rueda, F., & Taupin, J. (2015). Estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga (Colombia). *Revista RPGA*, 4, 44-61.
- GW\_MATE. (2006). *Nota técnica No. 9: gestión sustentable del agua subterránea, conceptos y herramientas.* . Obtenido de [worldbank.org: http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/GWMATE\\_Spanish\\_BN\\_09.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/GWMATE_Spanish_BN_09.pdf)
- Hofstede, & et. al., R. e. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo.* UICN, Quito, Ecuador.



- Humboldt, I. A., Sarmiento, E., Zapata, J., & Nieto, M. (2015). *Biodiversidad. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Bogotá: IAvH.
- IDEAM - MADS. (2016). *Programa Nacional de monitoreo del Recurso Hídrico*. Bogotá: Sin Publicar.
- IDEAM. (2002). *Perfil del Estado de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente en Colombia. Tomo I*. Bogotá .
- IDEAM. (2004). *Guía para monitoreo y seguimiento del agua*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2006). *Guía y protocolos del monitoreo y seguimiento del agua. Informe final Contrato de servicios de Consultoría C-0427-05, Sánchez F.* Bogotá: Sin publicar.
- IDEAM. (2007). *Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: calidad del aire*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (2011). *Hojametodológica índice ICA*. Bogotá.
- IDEAM. (2011). *Monitoreo a los ciclos de agua y carbono en ecosistemas de alta montaña, Caso piloto, Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Bogotá D.C.: Proyecto nacional de adaptación al cambio climático - INAP - Componente B y Conservación Internacional.
- IDEAM. (2011). *Proyecto nacional piloto de adaptación al cambio climático-INAP*.
- IDEAM. (2012). *Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo*. Bogotá, D.C.
- IDEAM. (15 de 02 de 2013). Hoja metodológica- Toma de muestras de aguas subterráneas. *Hoja metodológica- Toma de muestras de aguas subterráneas*. Bogotá, Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales para las evaluaciones regionales del agua*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (08 de 2017). *Catálogo de estaciones*. Bogotá, Bogotá, Colombia.
- IDEAM, & INVEMAR. (2017). *Protocolo de Monitoreo del Agua*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM, Pabón y García. (1996). *Modelo Conceptual de los componentes Hidrológico, Oceanográfico, Meteorológico y Climatológico del Sistema de Información Ambiental*. Bogotá: Nota Técnica del IDEAM.
- IDEAM-INVEMAR. (2017). *Protocolo de monitoreo del agua*. Bogotá: IDEAM.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá, D. C.: IDEAM.
- Laudon, K. C., & Laudon, J. P. (2004). *Sistemas de información gerencial* (8a. ed. ed.). México: Pearson Educación.
- l'eau Agences de. (2000). *Indice Biologique Global Normalisé I.B.G.N. NF-T90-350, Guide Technique*. Francia.
- Llambi, L. S. (2012). *Ecología, Hidrológica y Suelos de Páramos: Proyecto Páramo Andino*.
- Lovett-Doust, J. M.-D. (1994). Biological Assessment of aquatic pollution. A review with emphasis on plants as biomonitors. *Biol. Rev.* , 147-186.
- Luis Daniel Llambí, A. S.-W. (2012). *ECOLOGÍA, HIDROLOGÍA Y SUELOS DE PÁRAMOS Proyecto Páramo Andino*. Bogotá: Monsalve Moreno.
- MADS. (2014). *Programa Nacional de Aguas Subterráneas*. Bogotá: MADS.
- MADS -IAvH. (2011). *Política Nacional para Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos - PNGIBS*. Bogotá: Instituto Humboldt. Recuperado el 13 de 06 de 2018, de [http://www.humboldt.org.co/images/pdf/PNGIBSE\\_espa%C3%B1ol\\_web.pdf](http://www.humboldt.org.co/images/pdf/PNGIBSE_espa%C3%B1ol_web.pdf)
- MADS -IDEAM. (2016). *Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico*. Bogotá: Sin publicar.
- Market B., B. A. (2003). *Bioindicators and biomonitors: Principles, Concepts and Applications*. Amsterdam: Elsevier.
- Massone, H., Martínez, D., & Quiroz, M. (2014). *Estudio del ciclo del agua a través de los átomos*. Obtenido de <http://www.estrucplan.com.ar/secciones/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=3464>
- Massone, H., Martínez, D., & Quiroz, M. (12 de 09 de 2014). *Estudio del ciclo del agua a través de los átomos*.
- MAVDT - IAvH. (2010). *Definición de criterios para la delimitación de páramos del país y de lineamientos para su conservación* (Vol. PARTE II). BOGOTÁ, COLOMBIA: IAvH.
- Mazor, E. (2004). *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology "Books in soils, plants and the environment"*. New York: Marcel Dekker.

- Medina, M. (14 de mayo de 2012). *Política organizacional: concepto y esquema en la empresa*. Recuperado el 27 de noviembre de 2015, de <http://www.gestiopolis.com/politica-organizacional-concepto-y-esquema-en-la-empresa/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-. (2012). *Programa Nacional de Aguas Subterráneas*. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Mook, W. (2000). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico*. Viena.
- More , A., Viñas, P., Bert de Bievre, Acosta, L., & Ochoa , B. (2013). *Establecimiento de un Sistema de Monitoreo Hidrológico del Páramo Andino como base para la seterminación de medidas de adaptación al cambio climático*. Informe Final, Naturaleza y Cultura Internacional NCI, CONDESAN, Lima- Perú. Recuperado el 2017
- Mosquera, G., Célleri, R., Lazo, P., Vaché, K., Perakis, S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometic data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, 3(17), 2930-2947. doi: 10.1002/hyp10927.
- OIEA. (SF). *Gestión de los recursos hídricos mediante la hidrología isotópica*. Colección de Información del Organismo Internacional de Energía Atómica División de Información Pública 02-01581/FS Series 2/03/S.
- OMM. (2008). *Guia de instrumentos y métodos de observación meterológicos (OMM No8 ed.)*. Ginebra, Suiza: Organiación Meteorológica Mundial.
- OMM. (2012). *Guía de Prácticas Hidrológicas. Volumen I. Hidrología - De la medición a la información hidrológica. OMM-No 168*. Ginebra - Suiza: OMM - 6a Edición.
- Owen. (2001). Definition and establishment of reference conditions. . *Resumen reunión REFCOND*.
- Parson. (1996). The effect of habitat-specific sampling of biological assessment of water quality using a predictive model. *Freshwater biology*, 419-434.
- Ponce, E. (2000). *Estudio de Legislación de Aguas, caso Colombia*. Comité Jurídico UICN. Bogotá.
- Prat, N. (1998). *Bioindicadores de calidad de aguas*. Medellín.
- Prodríguez Pablo. (mayo de 2013). Proyecto regional andino de adaptación al cambio climático -PRAA. Adaptación al impacto del retroceso acelerado de glaciares en los andes tropicales. *Sistematización*

*de experiencias y lecciones aprendidas del proceso de incorporación de la variable adaptación al cambio climático en los planes de desarrollo y ordenamiento territorial de los gobiernos locales en la zona de intervención del PRA en Ecuador.* Quito, Ecuador. Obtenido de <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/07/Sistematizacio%CC%81n-inclusio%CC%81n-CC-en-PDOT%C2%B4s.pdf>

- Ramirez. (2008). diatomeas perifiticas en diferentes tramos de dos sistemas loticos de alta montaña (paramo de Santurban, Norte de Santander, Colombia) y su relacion con las variables ambientales. *Acta Biologica Colombiana*, 217-228.
- RAMSAR. (2007). *Lineamientos acerca del agua. Manuales para el uso racional de los humedales.* (Vol. 3a edición. Manual 6. ).
- Rivera, D., & Rodríguez, C. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia.* . Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Rivera, D., Rodríguez, C., & MAVDT -IAvH. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de los páramos de Colombia.* Bogotá.
- Rodriguez-Morales, M., Acevedo, D., Buytaert, W., Ablan, M., & De Bievre, B. (2014). *El páramo como productor y regulador del recurso agua. El caso de la microcuenca de la Quebrada Mixteque, Sierra nevada de Mérida, Vene.* Merida: Universidad de los Andes Venezuela. Recuperado el Diciembre de 2017, de <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/39578/1/Rodriguez2014.pdf>
- Roldan. (1999). Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 375-387.
- Roldan. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: método BMWP/Col.* Medellín: Ed. Universidad de Antioquia.
- Roldan. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 254-274.
- Rubiano. (2016). Plan de caracterización fisicoquímica del río San Francisco desde su nacimiento en el páramo Cruz Verde hasta el final de su canalización superficial en el eje ambiental en la calle 13 con carrera décima en Bogotá, Colombia. *Trabajo de Grado.* Bogotá.

- Sanchez. (2005). El índice BMWP (Biological Working Party score) modificado y adaptado al cauce principal del río pamplonita norte de Santander. *BISTUA*, 54-67.
- Sarmiento , C., Cadena, C., Sarmiento, M., Zapata, J., & León, O. (2013). *Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia. Actualización de la cartografía a escala 1:100.000.* Instituto de Investigación Alexander von humboldt. Bogotá.
- Sarmiento Pinzón, C. E., Sarmiento, M. V., Cadena Vargas, C. E., Ramírez, D. P., Pinzón, L. F., Medina Triana, J. A., . . . León Moya, O. A. (2013). *Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia: actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000.* Bogotá, D.C. Colombia.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sebastián, M. C., Méndez Rodríguez, E. M., & Rodríguez Mateos, D. (maio/ago. de 2000). La necesidad de políticas de información ante la nueva sociedad globalizada: el caso español. *Ciência da Informação*, 29(2), 22-36. Recuperado el 27 de noviembre de 2015, de <http://www.scielo.br/pdf/ci/v29n2/a04v29n2.pdf>
- Secretaria General de la Comunidad Andina, Ministerio del Ambiente (Ecuador)/Proyecto PRAA, Fondo para la Portección del Agua (FONAG). (2102). Propuesta y desarrollo de estandarización de información hidrometeorológica. Quito, Ecuador.
- Shahul Hameed, A., Resmi, T., Suraj, S., Unnikrishnan, C., & Sudheesh, M. (2015). Isotopic characterization and mass balance reveals groundwater recharge pattern in Chaliyar river basin, Kerala, India. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 48-58.
- Sors. (1987). *Citado por Instituto Nacional de Ecología. 2010. Monitoreo Ambiental* . México: Disponible en <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/105/8.html>.
- Terneus. (2002). Comunidades de plantas acuáticas en lagunas de los páramos del norte y sur del Ecuador. *Caldasia*, 379-391.
- Terzer, S. (2016). Isotopes in Precipitation – the IAEA-WMO GNIP network. Presentation on Trainign Course.

- UNESCO - PHI. (09 de 2018). *Programa Hidrológico Internacional (PHI). Octava Fase 2014-2021. Plan Estratégico Seguridad Hídrica: respuestas a los desafíos locales, regionales y mundiales*.  
Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002180/218061s.pdf>
- UNESCO -OMM. (2012). *International Glossary of Hydrology*. Obtenido de UNESCO- Programa Hidrológico Internacional : <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/11/GlosarioHidrologicoInternacional.pdf>
- Vargas. (2011). Nuevos reportes de ubicación y calidad de agua en los humedales altoandinos del páramo del Duende, Chocó. *Bioetnia*.
- Villamarin. (2013). A tool to assess the ecological condition of tropical high Andean streams in Ecuador and Peru: the IMEERA index. *Ecological Indicators*, 79-92.
- Villamarin. (2014). Caracterización física, química e hidromorfológica de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú. *Departamento de Caldas Facultad de Ciencias Naturales y Exactas*.
- Viñas, P. (2017). *Importancia del Monitoreo Hidrológico en páramo como base para la determinación de medidas de adaptación al cambio climático*. Bogotá D.C.
- W Buytart et., R. . (2006). Hidrología de Paramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad.
- Walteros. (2009). Universidad del Valle. *Caracterización hidrobiológica y evaluación ecológica de la calidad del agua del río Guarino*.
- Williams, M., Hood, E., Ostberg, G., Francou, B., & Galarraga, R. (2001). Synoptic survey of surface water isotopes and nutrient concentrations, Paramo high-elevation region, Antisana Ecological Reserve, Ecuador. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 33(4), 397-403.
- Yusof, Z. M., Basri, M., & Zin, N. A. (2010). Classification of issues underlying the development of information policy. *Information Development*, 26(3), p.p. 204-213.