

Calidad del agua y estado actual de las cuencas hidrográficas asociadas a diferentes tipos de coberturas vegetales en áreas dentro y fuera de la reserva La Piedra del Cóndor en Santander

Cristian Mauricio Guevara Jiménez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Forestal

Director

Diego Suescún Carvajal

MSc. Boques y Conservación Ambiental

Codirectora

Estefanía Gómez Betancurt

Bióloga

Esp. En Derecho y Medio Ambiente

Universidad Industrial de Santander

Instituto de proyección Regional de Educación a Distancia IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Este trabajo de grado está dedicado con profundo agradecimiento a las personas que han sido pilares fundamentales en mi vida y en la culminación de este proceso académico. A los docentes Diego Suescún Carvajal y Sandra Milena Díaz, por su invaluable guía y apoyo constante, su dedicación y compromiso han sido una fuente de inspiración. A mi madre, Verónica Jiménez, cuyo amor y sacrificio han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante, gracias por ser mi mayor apoyo. A mis hermanos, Arley Guevara y Julián Guevara, por su compañía y aliento en cada paso del camino, su presencia ha sido esencial en mi vida. A María Daniela Rodríguez Ángel, por ser una de las personas que más me motivaron a finalizar este proceso, su apoyo y confianza en mí han sido invaluableles.

### **Agradecimientos**

Este trabajo de grado no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de diversas personas e instituciones que contribuyeron significativamente en su desarrollo. En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Fundación Parque Jaime Duque, por ser el principal asignador de recursos para la ejecución de este trabajo de grado. Su apoyo económico fue fundamental para llevar a cabo esta investigación, y su compromiso con el desarrollo académico y científico es digno de admiración. A la bióloga Estefanía Gómez Betancurt, por ser una pieza clave no solo en las labores de campo, sino también en la codirección de este trabajo de grado, su experiencia, dedicación y entusiasmo fueron esenciales para el éxito de este proyecto. A la Universidad Industrial de Santander, por proporcionar el entorno académico y los recursos necesarios para la realización de este trabajo. Su apoyo institucional fue invaluable, y la calidad de la educación y los recursos disponibles han sido fundamentales para mi formación y el desarrollo de esta investigación. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por su contribución y apoyo en cada etapa de este proceso. Sin su ayuda y colaboración, este trabajo no habría sido posible. Gracias por creer en mí y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 El ecosistema páramo .....	16
2.2 Cobertura vegetal asociada a ecosistemas de páramo.....	16
2.3 Cuencas hidrográficas, propiedades morfométricas .....	17
2.4 Morfometría .....	19
2.4.1 Área o superficie .....	19
2.4.2 Índice de compacidad coeficiente de Gravelius (Kc) .....	20
2.4.3 Factor de forma .....	21
2.4.4 Índice de alargamiento.....	22
2.4.5 Curva hipsométrica .....	23
2.5 Calidad de agua, cobertura vegetal y alteración de parámetros del agua .....	23
2.5.1 Parámetros físicos y químicos del agua .....	24
2.5.2 Parámetros microbiológicos del agua .....	26
2.6 Normativa para determinar la calidad del agua .....	27
3. Metodología .....	27
3.1 Área de estudio .....	27
3.2 Selección de fuentes hídricas .....	28

3.3 Clasificación de coberturas del suelo.....	31
3.4 Análisis morfométrico .....	32
3.4.1 Pendiente media de la cuenca y curva hipsométrica.....	35
3.5 Parámetros fisicoquímicos .....	35
3.6 Parámetros microbiológicos: .....	35
3.7 Envasado y preservación de muestras.....	36
3.8 Análisis de las muestras .....	36
4. Resultados .....	36
4.1 Clasificación de coberturas del suelo.....	37
4.1.1 Quebrada Laguna Grande .....	37
4.1.3 Quebrada Listará.....	40
4.2 Análisis morfométrico .....	41
4.2.1 Morfometría quebrada Pozo del Indio .....	41
4.2.2 Morfometría quebrada Laguna Grande.....	42
4.2.3 Morfometría quebrada Listará .....	44
4.3 Calidad del agua.....	45
4.3.1 Parámetros fisicoquímicos quebrada Pozo del Indio .....	45
4.3.2 Parámetros microbiológicos quebrada Pozo del Indio.....	47
4.3.3 Parámetros fisicoquímicos quebrada Laguna Grande.....	48
4.3.4 Parámetros microbiológicos quebrada Laguna Grande .....	51
4.3.5 Parámetros fisicoquímicos quebrada Listará .....	51
4.3.6 Parámetros microbiológicos quebrada Listará.....	53
4.4 Recomendaciones de manejo de las microcuencas.....	54

5. Discusión.....	56
6. Conclusiones.....	59
7. Recomendaciones .....	60
Referencias Bibliográficas .....	61
Apéndices.....	66

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Mapa del área de estudio .....	28
Figura 2 Mapa puntos de toma de muestras.....	30
Figura 3 Mapa toma de muestras microcuenca Listará.....	30
Figura 4 Clasificación de uso de suelo Reserva Natural de la Sociedad Civil Piedra del Cónдор.....	32
Figura 5 Delimitación y red de drenaje quebrada Pozo del Indio.....	33
Figura 6 Delimitación y red de drenaje quebrada Laguna Grande.....	34
Figura 7 Delimitación y red de drenaje Quebrada Listará.....	34
Figura 8 Coberturas del suelo para la microcuenca Laguna Grande.....	38
Figura 9 Coberturas del suelo para la microcuenca Pozo del Indio.....	39
Figura 10 Panorámica cobertura presente en la microcuenca Listará.....	40
Figura 11 Curva hipsométrica Quebrada Pozo del Indio.....	42
Figura 12 Curva hipsométrica Quebrada Laguna Grande.....	44
Figura 13 Gráfica curva hipsométrica Quebrada Listará.....	45

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Nombre en función del área de una cuenca hidrográfica.....	20
Tabla 2 Interpretación del índice de compacidad .....	21
Tabla 3 Clasificación de cuencas hidrográficas según su factor de forma. ....	22
Tabla 4 Descripción de unidades hidrográficas según su rango de alargamiento .....	22
Tabla 5 Coberturas del suelo para la microcuenca Pozo del Indio .....	37
Tabla 6 Coberturas del suelo para la microcuenca Laguna Grande.....	39
Tabla 7 Resultados valores morfométricos quebrada Pozo del Indio.....	41
Tabla 8 Resultados valores morfométricos quebrada Pozo del Indio.....	41
Tabla 9 Resultados valores morfométricos quebrada Laguna Grande .....	43
Tabla 10 Resultados valores morfométricos quebrada Listará.....	44
Tabla 11 Resultados de parámetros fisicoquímicos para M1-C1 quebrada Pozo del Indio .....	46
Tabla 12 Resultados de parámetros fisicoquímicos para M2-C1 quebrada Pozo del Indio .....	47
Tabla 13 Parámetros microbiológicos quebrada Pozo del Indio .....	48
Tabla 14 Parámetros microbiológicos M2-C1 quebrada Pozo del Indio.....	48
Tabla 15 Resultados parámetros fisicoquímicos quebrada Laguna Grande .....	49
Tabla 16 Resultados de parámetros fisicoquímicos para M2-C2 quebrada Laguna Grande.....	50
Tabla 17 Resultados análisis microbiológicos quebrada Laguna Grande .....	51
Tabla 18 Resultados análisis microbiológicos quebrada Laguna Grande M2-C2.....	51
Tabla 19 Resultados parámetros fisicoquímicos quebrada Listará.....	52
Tabla 20 Resultados de parámetros fisicoquímicos para M2-C3 quebrada Listará.....	53
Tabla 21 Resultados análisis microbiológicos quebrada Listará .....	53

Tabla 22 Resultados análisis microbiológicos quebrada Listará ..... 54

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Toma de muestras de agua.....	66
Apéndice B. Envasado de muestras de agua para análisis de laboratorio. ....	67
Apéndice C. Medición de parámetros pH y temperatura in situ.....	68
Apéndice D. Suministro de reactivos para conservación de la muestra. ....	69
Apéndice E. Medición de ancho en parte baja en microcuenca Laguna Grande.....	69
Apéndice F. Cuerpos de agua y vegetación acuática.....	70
Apéndice G. Coberturas de herbazal denso, cuerpo de agua y afloramiento rocoso.....	70
Apéndice H. Panorámica de la microcuenca Listará .....	71
Apéndice I. Frailejonal.....	71

## Resumen

**Título:** Calidad del agua y estado actual de las cuencas hidrográficas asociadas a diferentes tipos de coberturas vegetales en áreas dentro y fuera de la reserva Piedra del Cónдор en Santander\*

**Autor:** Cristian Mauricio Guevara Jiménez\*\*

**Palabras Clave:** páramo, cambio de uso del suelo, ciclo hidrológico, morfometría de cuencas.

### Descripción:

Los ecosistemas de páramo son clave en la regulación y provisión hídrica del 70% del recurso hídrico para Colombia. A pesar de esto, actividades antrópicas están generando impactos negativos sobre la calidad del agua, por ello es importante determinar la influencia de estas actividades a través de parámetros que contempla la normativa vigente. Se eligieron tres microcuencas hidrográficas en el páramo del Almorzadero, quebradas Laguna del Indio y Laguna Grande dentro de la Reserva Natural de la Sociedad Civil La Piedra del Cónдор y la quebrada Listará fuera de la reserva. Se analizaron variables fisicoquímicas del agua como pH, temperatura, mercurio, estaño, cadmio, hierro, nitratos, nitritos, Demanda química de oxígeno (DQO) y parámetros microbiológicos como coliformes totales y *Escherichia coli*, teniendo en cuenta los umbrales establecidos por el Decreto 1594 de 1984 para potabilidad del agua. Se evidencio que, con excepción del plomo (por encima del umbral), los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro de rangos óptimos. Se destaca que en las partes bajas de las microcuencas ubicadas dentro del área protegida se presentan altas concentraciones de microorganismos perjudiciales para la salud humana, esto sugiere que hay malas prácticas de pastoreo en predios aledaños a la reserva. La función de regulación hídrica en los páramos es clave y representa un patrimonio natural invaluable. No obstante, las labores tradicionales de uso del suelo y aprovechamiento de los recursos naturales pueden generar impactos perjudiciales para la salud, no sólo aguas abajo, sino también para las mismas comunidades de las partes altas de la montaña.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Programa de ingeniería forestal. Director: Diego Suescún Carvajal MSc. Bosques y Conservación Ambiental, Codirector: Estefanía Gómez Betancurt Bióloga Esp. Derecho y Medio Ambiente

### Abstract

**Title:** Water Quality and Current Status of Watersheds Associated with Different Types of Vegetative Cover in Areas Inside and Outside the Piedra del Condor Reserve in Santander\*

**Author:** Cristian Mauricio Guevara Jiménez\*\*

**Key Words:** paramo, land use change, hydrological cycle, watershed morphometry.

### Description:

Páramo ecosystems are key in the regulation and provision of 70% of Colombia's water resources. Despite this, anthropic activities are generating negative impacts on water quality; therefore, it is important to determine the influence of these activities through parameters contemplated by current regulations. Three watersheds were selected in the Almorzadero páramo, Laguna del Indio and Laguna Grande streams within the Piedra del Cóndor Civil Society Natural Reserve and Listará stream outside the reserve. Water physicochemical variables such as pH, temperature, mercury, tin, cadmium, iron, nitrates, nitrites, COD, and microbiological parameters such as total coliforms and *Escherichia coli* were analyzed, taking into account the thresholds established by Decree 1594 of 1984 for water potability. It is evident that, with the exception of lead (above the threshold), the physicochemical parameters are within optimal ranges. In the lower parts of the microbasins located within the protected area, there are high concentrations of microorganisms that are harmful to human health, this suggests that there are bad grazing practices on land adjacent to the reserve. The water regulation function of the moorlands is key and represents an invaluable natural heritage. However, traditional land use and natural resource exploitation can generate harmful health impacts, not only downstream, but also for the communities in the upper parts of the mountain.

---

\*Degree Work

\*\*Institute of Regional Projection and Distance Education IPRED. Forest Engineering Program. Director: Diego Suescún Carvajal MSc. Forests and Environmental Conservation, Co-director: Estefanía Gómez Betancurt Biologist Esp. Law and Environment

## Introducción

El ecosistema de páramo se caracteriza porque abastece el 70% del agua potable de Colombia (Murad et al., 2024), son hotspots de biodiversidad al presentar altos niveles de endemismo de especies, su temperatura y humedad relativa son constantes a lo largo del año (Zapata et al., 2021), y se ha demostrado que posee una de las tasas de diversificación vegetal más altas del mundo (Madrrián et al., 2013). A pesar de que estos ecosistemas representan un patrimonio natural invaluable, según Murad et al. (2024) desde décadas, ha sido constante la ocupación y el asentamiento humano para extracción minera, pastoreo de ganado y desarrollo de actividades agrícolas. Esto ha causado la pérdida de coberturas naturales y que, en lugar de seguir siendo importantes sumideros de carbono, se convierten en fuentes de emisión (Benavides et al., 2023). Adicionalmente, los páramos son altamente susceptibles a los impactos del cambio climático ya que se han registrado mayores incrementos de temperatura en estos ecosistemas que en áreas más bajas (Mosquera et al., 2023).

Una de las principales preocupaciones que se genera a raíz de la degradación de los páramos es la contaminación del agua; se ha demostrado que en cuencas hidrográficas en que se genera algún tipo de intervención se alteran las propiedades fisicoquímicas y, por ende, aguas abajo estos parámetros hacen que el recurso agua no sea potable (González-Martínez et al., 2019). Así mismo, la actividad agropecuaria extensiva e intensiva hace que en épocas de alta precipitación se incrementen las cargas de nitratos, potasio y *Escherichia coli* lo que supone un riesgo para la salud humana y propicia la eutrofización (Rey-Romero et al., 2022).

La calidad del agua debe evaluarse desde un enfoque integral, teniendo en cuenta el uso del suelo, las coberturas vegetales, las actividades antrópicas que puedan generar contaminación

química y los factores biológicos que puedan influir en los cuerpos de agua (Silveira, 2020). El uso y cobertura del suelo tiene la capacidad de alterar las dinámicas hidrológicas, cambia los niveles de caudal desde las características de los suelos, como incrementar la macroporosidad y reducir la infiltración y la capacidad de retención del agua (Patiño et al., 2021).

La presente investigación se desarrolló a partir de la pregunta ¿Cuál es la calidad del agua y el estado actual de las coberturas vegetales en las cuencas hidrográficas ubicadas en la reserva natural de la sociedad civil La Piedra del Cóndor y predios aledaños? Lo anterior, teniendo en cuenta que en Colombia el páramo de Santurbán se ha visto afectada la calidad del agua a raíz de la aplicación de agro-insumos suministrados a diferentes tipos de cultivos y la intervención de tierras para actividades de minería. Por lo tanto, surgió la necesidad de llevar a cabo un análisis de calidad del agua en los ecosistemas de páramo en la reserva La Piedra del Cóndor, donde se integren las características morfométricas de las cuencas, análisis de coberturas vegetales, y la caracterización de parámetros físicos, químicos y biológicos del agua, esto con la finalidad de identificar las posibles fuentes de contaminación.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Evaluar la calidad del agua en las cuencas hidrográficas asociadas a diferentes coberturas vegetales dentro y fuera de la reserva Piedra del Cóndor.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Identificar las coberturas vegetales según (*Corine Land Cover*) en cada una de las tres cuencas.
- Elaborar la morfometría de tres cuencas hidrográficas, incluyendo parámetros como forma, tamaño, pendiente y red de drenaje y otros indicadores de la dinámica hidrológica.
- Determinar la calidad del agua en dos puntos de cada una de las cuencas considerando parámetros físicos, químicos y biológicos que presenten en cada una de las coberturas vegetales.
- Proponer recomendaciones y medidas de manejo para la conservación y gestión sostenible de las cuencas hidrográficas de la reserva.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 El ecosistema páramo**

A nivel mundial, los ecosistemas de páramo son áreas de alta montaña ubicados en regiones tropicales y subtropicales, conocidos por su diversidad única y su función clave en la regulación del ciclo hidrológico (Patiño et al., 2021). Estos ecosistemas actúan como esponjas naturales al capturar y almacenar agua lluvia, liberándola gradualmente, contribuyen al abastecimiento de fuentes de agua dulce (Mars, 2024). En Colombia, los páramos se localizan en las tres cordilleras y en la Sierra Nevada de Santa Marta, ocupando un área equivalente al 1,4% del territorio nacional. En el país hay 37 complejos de páramos, con una superficie aproximada de 3 millones de ha (Zapata-Jiménez et al., 2022).

El suelo del páramo contiene grandes cantidades de carbono orgánico, esto se debe a que las bajas temperaturas reducen la mineralización y humificación de la materia orgánica. Este es un ecosistema considerado como stock de carbono, por ende, es clave su conservación para la mitigación del cambio climático y mantenimiento en la provisión de servicios los ecosistémicos (Pinos-Morocho et al., 2021). Estudios recientes han demostrado que los suelos del páramo pueden perder hasta un 26% de su contenido de carbono debido a actividades antropogénicas, lo que subraya la importancia de su conservación (Pinos-Morocho et al., 2021).

### **2.2 Cobertura vegetal asociada a ecosistemas de páramo**

Es fundamental, entender la diversidad de flora presente en los ecosistemas de páramo, y sus dinámicas ecológicas. Ubicados principalmente en la región andina, los páramos albergan una gran variedad de especies vegetales adaptadas a condiciones extremas de altitud y clima. Estudios recientes han identificado que la flora de los páramos incluye una gran variedad de especies

endémicas, muchas de las cuales presentan adaptaciones morfológicas y fisiológicas únicas, como la formación de rosetas y la presencia de pubescencia en las hojas para reducir la pérdida de agua (Madriñán et al., 2013).

De acuerdo con Castiblanco-Álvarez et al. (2021) la vegetación de los páramos se clasifica de acuerdo con su fisionomía, no obstante, también está determinada por factores del entorno como el suelo y condiciones climáticas. En estos ecosistemas se encuentran al menos siete tipos de vegetación como: pajonales, conformados por macollas de gramíneas particularmente del género *Calamagrostis*; frailejonales, dominados por caulirrósulas de *Espeletia*; matorrales, dominados por arbustos con especies de los géneros *Castilleja*, *Diplostephium*, *Hypericum* y *Pentacalia*, entre otros; prados, comúnmente presentes en turberas o al margen de cuerpos lénticos de agua, destacando los géneros *Plantago*, *Xenophyllum* y *Distichia*; chuscales, dominada por la especie *Chusquea tesellata*; y bosques achaparrados, con una composición mixta de árboles pequeños o arbustos de los géneros *Escallonia*, *Hesperomeles* y familias como Asteraceae y Ericaceae.

### **2.3 Cuencas hidrográficas, propiedades morfométricas**

La morfometría es usada para el estudio de las cuencas hidrográficas, ésta evalúa las tipologías físicas de una red hídrica que se localiza dentro de una cuenca, subcuenca o microcuenca, las cuales constituyen condicionantes del flujo de agua en las fuentes hídricas, constituyendo la dinámica del régimen fluvial. Las características morfométricas permiten evaluar la amenaza y susceptibilidad por desastres naturales como remociones en masa o avenidas torrenciales en respuesta a precipitaciones intensas (Narváez-Tovar, 2023). Los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica corresponden a una serie de procesos de datos cuantitativos reflejados en cálculos numéricos, obtenidos de las características físicas de las

cuencas, subcuencas y microcuencas. Estos parámetros se utilizan para determinar, analizar y evaluar las redes de drenaje, pendientes y factores de forma de dichas fuentes.

Por otra parte, Ortiz-Quintero (2021) afirma que el análisis de la forma y otras características de las cuencas permite evaluar la disponibilidad del recurso hídrico. Además, también se puede utilizar para determinar la capacidad de almacenamiento de agua, calcular caudales y predecir eventos hidrológicos extremos. Ortiz-Quintero (2021), presenta los tipos de drenaje erosional más frecuentes que se describen a continuación:

**Dendrítico:** Es el patrón que más frecuentemente se presenta, y se caracteriza por mostrar una ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos. Se desarrolla en suelos homogéneos, moderadamente permeables, con pendientes suaves y sin ningún tipo de control. Se presenta con frecuencia, en zonas de rocas sedimentarias blandas, aluviones finos, tobas volcánicas, depósitos de till glacial (brecha consolidada o roca sedimentaria, cuyos materiales de partida se han formado por fenómenos glaciares), principalmente.

**Pinnado:** Es un drenaje dendrítico modificado que presenta un considerable número de tributarios cortos y poco espaciados, e indica un elevado contenido de limo en el suelo. Es típico de zonas planas o casi planas, con materiales muy homogéneos, friables y finos, eólicos o aluviales, como: loess (roca sedimentaria incoherente, de partículas muy finas), ceniza volcánica, till. Tampoco presenta controles.

**Paralelo:** Este patrón se caracteriza por la disposición de tributarios que son paralelos o casi paralelos entre sí. Puede originarse debido a influencias de control topográfico o estructural, siendo más común el control topográfico. Este patrón es frecuentemente observado en áreas con pendientes pronunciadas.

**Rectangular:** Este patrón de drenaje corresponde a una variante del dendrítico se distingue por la confluencia de tributarios con las corrientes principales en ángulos casi rectos. Su formación está influenciada por controles estructurales como diaclasas, foliaciones y fracturas en la roca. La nitidez del patrón rectangular está asociada con la delgadez de la capa de suelo. Este tipo de drenaje se desarrolla típicamente sobre pizarras metamórficas, esquistos y gneis (roca metamórfica compuesta de cuarzo, feldespato y mica); también puede formarse en areniscas resistentes en climas áridos o en areniscas con poca cobertura de suelo en climas húmedos.

## **2.4 Morfometría**

Para obtener la morfometría de las cuencas, de acuerdo con Ortiz-Quintero (2021), se deben calcular parámetros como el área, el índice de compacidad, factor de forma, índice de alargamiento, índice asimétrico, pendiente media de la cuenca, el comportamiento de la red de drenaje y la curva hipsométrica.

### **2.4.1 Área o superficie**

Se denota como la proyección ortogonal del total del área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido-directa o indirectamente a un mismo cauce natural o principal. Esta área está delimitada naturalmente por diferentes cotas topográficas, las cuales se les conoce como división de aguas o parte de aguas (Tabla 1). Cabe hacer énfasis en que el área de una cuenca es un parámetro clave ya que influye directamente en el comportamiento del flujo del agua y la distribución de las precipitaciones y otros procesos hidrológicos (Ortiz-Quintero, 2021).

**Tabla 1***Nombre en función del área de una cuenca hidrográfica*

Área (km <sup>2</sup> )	Nombre
< 5	Unidad
5 – 20	Sector
20 – 100	Microcuenca
100 – 300	Subcuenca
> 300	Cuenca

*Nota. Adaptado de Ortiz-Quintero (2021).***2.4.2 Índice de compacidad coeficiente de Gravelius (Kc)**

El índice de compacidad (Kc) de una cuenca hace referencia a una medida, la cual se encarga de evaluar la forma geométrica de una cuenca hidrográfica, este índice se usa principalmente en la hidrología para hacer una relación entre el área y el perímetro de la cuenca, con la finalidad de tener una métrica que indique qué tan compacta (redonda) o alargada es la forma de esta (Tabla 2). Un índice de compacidad alto indica que la cuenca es más compacta, mientras que un índice más bajo indica que la cuenca presenta un nivel de alargamiento o presenta algún tipo de irregularidad en la forma (Ortiz-Quintero, 2021).

Este índice se rige bajo los siguientes parámetros:

$$Kc = 0,28 x \left[ \frac{P}{\sqrt{A}} \right]$$

**Tabla 2***Interpretación del índice de compacidad*

Valor	Interpretación
1,00 – 1,25	Cuenca redonda a oval redonda
1,25 – 1,50	Cuenca de oval a oval oblonga
1,50 – 1,75	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga
> 1,75	Rectangular

*Nota. Adaptado de Ortiz-Quintero (2021).***2.4.3 Factor de forma**

El factor de forma (F) expresa como la relación entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud, este índice proporciona información sobre la forma de la cuenca indicando si es alargada o compacta (Tabla 3). Además de ello, el factor de forma es una herramienta útil para entender la geometría de la cuenca hidrográfica y su nivel de influencia en su ciclo hidrológico (Ortiz-Quintero, 2021).

$$F = \frac{A}{Lm^2}$$

**Tabla 3**

*Clasificación de cuencas hidrográficas según su factor de forma.*

Valor	Interpretación	Producción Caudal	Potencia Creciente
0,00 – 0,25	Estrecha	Bajo	Bajo
0,25 – 0,50	Alargada	Moderado	Moderado
0,50 – 0,75	Amplia	Alto	Alto
0,75 – 1,00	Ancha	Muy alto	Muy alto

*Nota. Adaptado de Ortiz-Quintero (2021).*

#### **2.4.4 Índice de alargamiento**

El índice de alargamiento ( $I_a$ ) hace la relación entre la longitud axial de la cuenca hidrográfica y su ancho máximo (Tabla 4).

$$I_a = \frac{L}{a}$$

**Donde:**  $I_a$ : Índice de alargamiento, L: Longitud axial, A: Ancho máximo de la cuenca.

**Tabla 4**

*Descripción de unidades hidrográficas según su rango de alargamiento*

Rango	Descripción
<1,4	Poco alargada
1,5 – 2,8	Moderadamente alargada
>2,9	Muy alargada

*Nota Adaptado de Ortiz-Quintero. (2021).*

### 2.4.5 Curva hipsométrica

Se entiende como la representación gráfica del relieve medio de la cuenca, construida llevando en el eje de las abscisas, longitudes proporcionales a las superficies proyectadas en la cuenca, en km<sup>2</sup> o en porcentaje, comprendidas entre curvas de nivel consecutivas hasta alcanzar la superficie total, llevando al eje de las ordenadas la cota de las curvas de nivel consideradas (Ortiz-Quintero, 2021).

$$H = \frac{\sum(c_i * a_i)}{A}$$

Donde:

H: elevación media de la cuenca

ci: cota media del área i, delimitada por dos curvas de nivel

ai: área i entre curvas de nivel

A: área total de la cuenca

## 2.5 Calidad de agua, cobertura vegetal y alteración de parámetros del agua

La calidad del agua en los páramos respecto a sus parámetros físicos, químicos e hidrológicos es crucial para monitorear su calidad y garantizar el suministro de agua potable a las comunidades en la parte media y baja de las cuencas hidrográficas (González-Martínez et al., 2019). Diversos parámetros físicos y químicos como la temperatura, la turbidez, el pH y la concentración de nutrientes influyen en la calidad del agua (Omer, 2019). El cambio climático con el aumento de temperaturas y alteración en los patrones de precipitación también está afectando la calidad del agua en estos ecosistemas (Martínez-Medina et al., 2024). Esto tiene un impacto directo

en las dinámicas hidrológicas y calidad del agua, puntualmente en la recarga de acuíferos (Martínez-Medina et al., 2024).

El agua actúa como un elemento fundamental en procesos físicos, químicos y biológicos que permiten la vida en el planeta, sin embargo, ha sufrido una gran variedad de alteraciones, entre ellas en la revolución industrial, múltiples factores contribuyeron a su contaminación. Actualmente, en los cuerpos de agua se han generado incrementos en los niveles de material particulado en suspensión, afectando así la resiliencia de las cuencas hidrográficas (Gualdrón-Duran, 2016).

Aunque Colombia tiene un potencial hídrico que es tres veces superior al promedio de los países sudamericanos y seis veces mayor que el promedio mundial (Zapata-Jiménez et al., 2022), enfrenta serios problemas de disponibilidad de agua de calidad en muchas de sus regiones, especialmente en las áreas con mayor densidad poblacional. Esto se debe principalmente a la contaminación, la deforestación, la erosión y la pérdida de capacidad de retención y regulación del recurso hídrico, lo que afecta drásticamente la biodiversidad y los ecosistemas que influyen directa e indirectamente en la oferta hídrica (Gualdrón-Duran, 2016).

### ***2.5.1 Parámetros físicos y químicos del agua***

Gualdrón-Duran (2016), afirman que dentro de los parámetros físicoquímicos de utilidad para determinar la calidad del agua se encuentran variables como: temperatura, demanda química de oxígeno (DQO), presencia de sulfatos, nitratos, fosfatos, pH, dureza total, calcio, magnesio, alcalinidad total, hierro entre otras. Es importante saber que para los ecosistemas acuáticos estas variables son de vital importancia para lograr identificar posibles agentes contaminantes que repercuten en la calidad del agua de los cuerpos lóticos.

**Temperatura:** es una de las variables más significativas en los cuerpos de agua, sirviendo de indicativo de la estabilidad ecológica del sistema. Además, las variaciones de este parámetro generan un cambio en el ambiente de desarrollo de la fauna y flora presentes en los cuerpos de agua; elevando el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas en el agua (Omer, 2019).

**Demanda química de oxígeno (DQO):** es un parámetro crucial en la evaluación de la calidad del agua. Mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica presente en una muestra de agua. Este parámetro indica la cantidad de contaminantes orgánicos presentes en el agua. La DQO es más rápida que la demanda biológica de oxígeno (DBO) debido a que es de medición casi inmediata, su unidad de medida se da en ppm de O<sub>2</sub>. Normalmente las aguas no contaminadas tienen valores de DQO de 1 a 5 ppm (Gualdrón-Duran, 2016).

**Nitritos:** Los nitritos son indicadores de contaminación y pueden ser tóxicos para la vida acuática a concentraciones elevadas. La presencia de nitritos en el agua suele ser el resultado de la oxidación incompleta del amoníaco o de la reducción de nitratos, procesos que ocurren en condiciones de baja oxigenación (Omer, 2019).

**Nitrato:** Este parámetro indica el grado de descomposición de materia orgánica animal y/o vegetal. En general las altas concentraciones de nitratos junto con fosfatos en las aguas superficiales hacen que las algas tengan un excesivo crecimiento en un proceso llamado eutrofización. Normalmente las aguas con filtraciones por sistemas de riego que habitualmente contienen fertilizantes conforman varios centenares de ppm (Omer, 2019).

**Turbiedad:** Es una medida de la opacidad causada por la presencia de partículas suspendidas, como sedimentos, microorganismos y materia orgánica. Este parámetro es crucial para evaluar la calidad del agua, ya que una alta turbiedad puede indicar contaminación y afectar

negativamente la salud humana y la vida acuática. La turbiedad se mide en unidades nefelométricas de turbidez (NTU) y es utilizada para determinar la potabilidad del agua y la eficacia de los procesos de tratamiento (Omer, 2019).

**pH:** Es un indicativo del grado de acidez, basicidad y alcalinidad del agua. Además, este parámetro origina variación en la composición de la fauna y flora de los cuerpos de agua e influye en el grado de toxicidad de ciertos compuestos, como el amoníaco y los metales pesados (Gualdrón-Duran, 2016).

**Hierro:** es un elemento común que puede encontrarse tanto en forma disuelta (hierro ferroso) como en forma particulada (hierro férrico). Su presencia puede deberse a la disolución de minerales en el suelo, la corrosión de tuberías y tanques de almacenamiento, o la contaminación industrial. Aunque el hierro no es generalmente peligroso para la salud en las concentraciones típicas encontradas en el agua potable, puede afectar el sabor, el color y la turbidez del agua (Omer, 2019).

### ***2.5.2 Parámetros microbiológicos del agua***

Las aguas naturales pueden contener gran variedad de microorganismos, los cuales pueden contribuir o repercutir en la salud de los seres vivos, algunos de los microorganismos que causan enfermedades son: protozoos, bacterias, virus, algas y los hongos (Gualdrón-Duran, 2016).

**Coliformes totales:** se utilizan para identificar posibles cambios en la localidad biológica del agua, indicando que el cuerpo de agua ha sido contaminado con materia orgánica de origen fecal, tanto animal como humana, viéndose acelerada la productividad primaria de los cuerpos lóticos (Gualdrón-Duran, 2016).

**Coliformes fecales:** Son un grupo de enterobacterias que han sido utilizadas como indicador idóneo para el agua potable. Dentro de este grupo, se destacan bacterias aeróbicas y

anaeróbicas facultativas; aunque el mayor representante es la bacteria *Escherichia coli*, distinguiéndose por su facilidad de crecer a elevadas temperaturas y por la capacidad de producir la enzima glucoronidasa (Dixxlab, 2025).

## **2.6 Normativa para determinar la calidad del agua**

Decreto 1594 de 1984 capítulo IV “Los criterios de calidad establecidos en el presente Decreto, son guías para ser utilizados como base de decisión en el ordenamiento, asignación de usos al recurso y determinación de las características del agua para cada uso”.

Resolución 2115 de 2007 por la cual se establecen características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

## **3. Metodología**

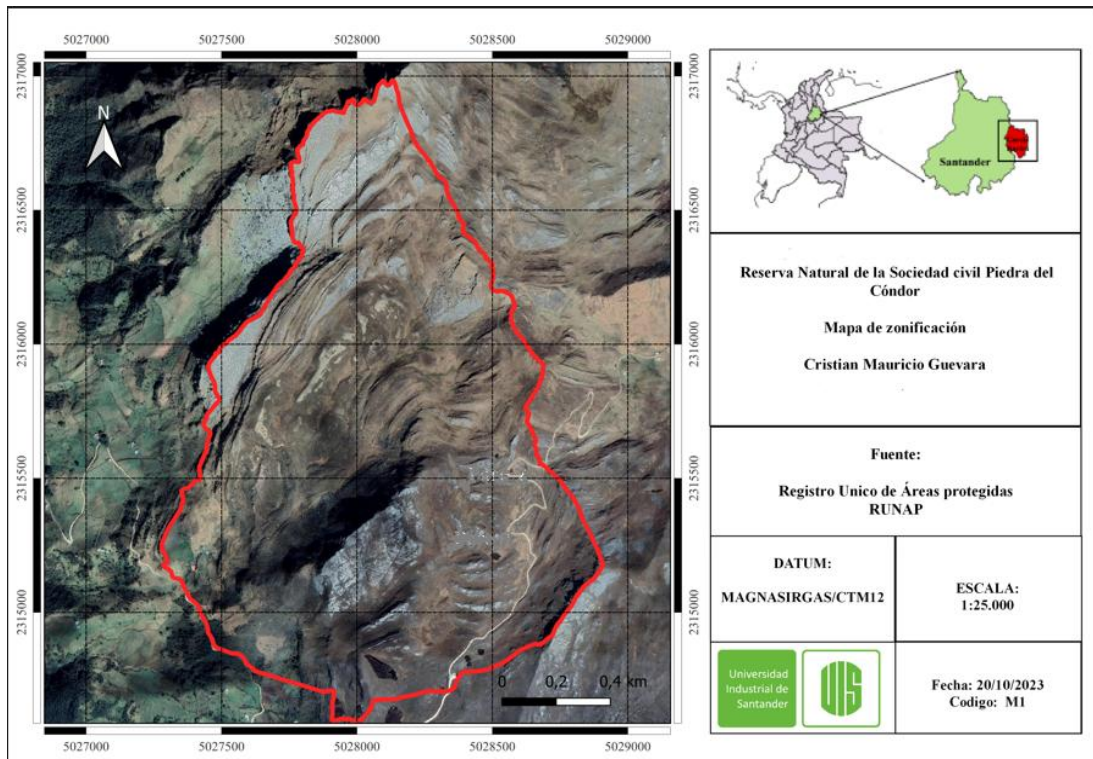
### **3.1 Área de estudio**

El estudio se realizó en el predio de la Reserva Natural de la Sociedad Civil La Piedra del Cóndor, y predios limítrofes. La reserva se encuentra ubicada en el municipio de San Andrés, Santander, inmersa en el páramo del Almorzadero con coordenadas 6.855833°N 72.745000°W, con un área aproximada de 226,6 ha. Desde el año 2021, los predios de la reserva, anteriormente utilizados para prácticas agrícolas como el cultivo de papa y ganadería, han sido objeto de conservación y preservación. Llevando a cabo el establecimiento de una reserva natural, limitando estas actividades para proteger el ecosistema de páramo conservando así su biodiversidad y la mejora del recurso hídrico en la región. Su rango altitudinal comprende desde los 3548 hasta 4085 m s. n. m. El clima es súper húmedo con una temperatura media anual menor a 8°C. El acceso al

predio se realizó por la vía que conduce al sector conocido como Cruz de Piedra, recorriendo aproximadamente 16 km desde el casco urbano del municipio de Cerrito hasta la zona de estudio (Figura 1).

### Figura 1

*Mapa del área de estudio*



### 3.2 Selección de fuentes hídricas

Para la selección de las fuentes hídricas se tuvo en cuenta la georreferenciación de los sitios con usos del suelo acordes a las necesidades del estudio. Además de ello, se consideraron diferentes condicionantes o parámetros para definir el punto óptimo para la toma de la muestra, destacando:

- Presencia de las coberturas contempladas en el estudio a los costados de los cauces.
- Caudal Permanente en variadas épocas del año.

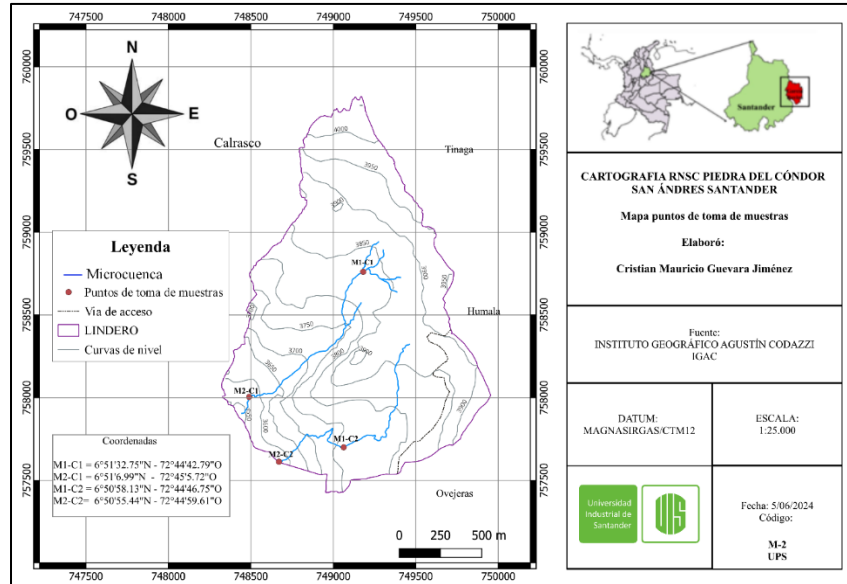
- El nivel de complejidad para el acceso.
- Nivel de contaminación por agentes externos al estudio.

Con base en los factores, se optó por seleccionar las microcuencas: quebrada Pozo del Indio, la cual abarcó la cobertura natural valle de frailejón en la parte alta de la microcuenca, la quebrada Laguna Grande que abarcó la cobertura natural de pajonal y pastos (Figura 2). Por otra parte, se optó por tomar la microcuenca Listará que cuenta con una cobertura vegetal de bajo porte con mayor continuidad, siendo esta la microcuenca ubicada en predios limítrofes de la reserva esto con la finalidad de generar un contraste y conocer la importancia de la delimitación de esta área con fines de conservación. (Figura 3). Los puntos para la toma de muestra se nombraron de la siguiente manera:

- **M1-C1:** Parte alta de la microcuenca quebrada Laguna del Indio
- **M2-C1:** Parte baja de la microcuenca quebrada Laguna del Indio
- **M1-C2:** Parte media/alta de la microcuenca Laguna Grande
- **M2-C2:** parte baja de la microcuenca Laguna Grande
- **M1\_C3:** parte alta de la microcuenca Listará
- **M2\_C3:** parte baja de la microcuenca Listará

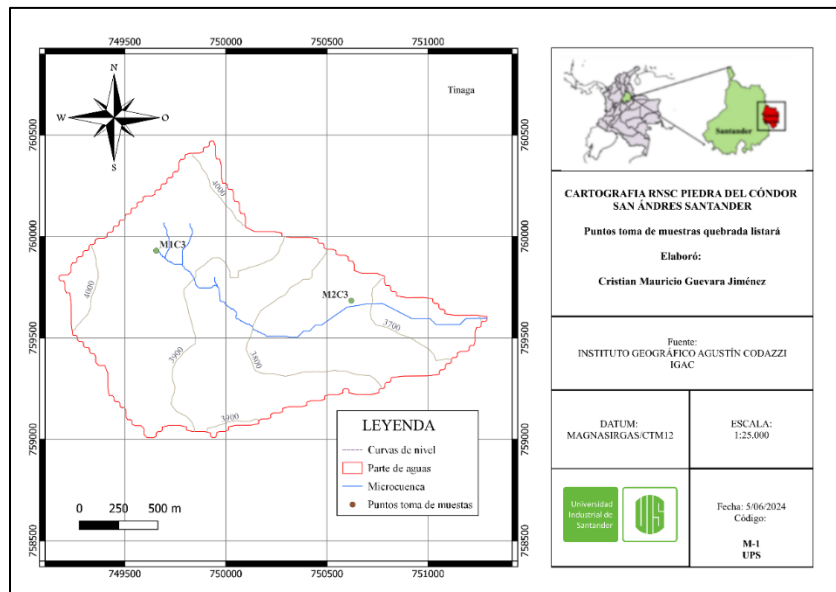
**Figura 2**

*Mapa puntos de toma de muestras*



**Figura 3**

*Mapa toma de muestras microcuenca Listará*



### 3.3 Clasificación de coberturas del suelo

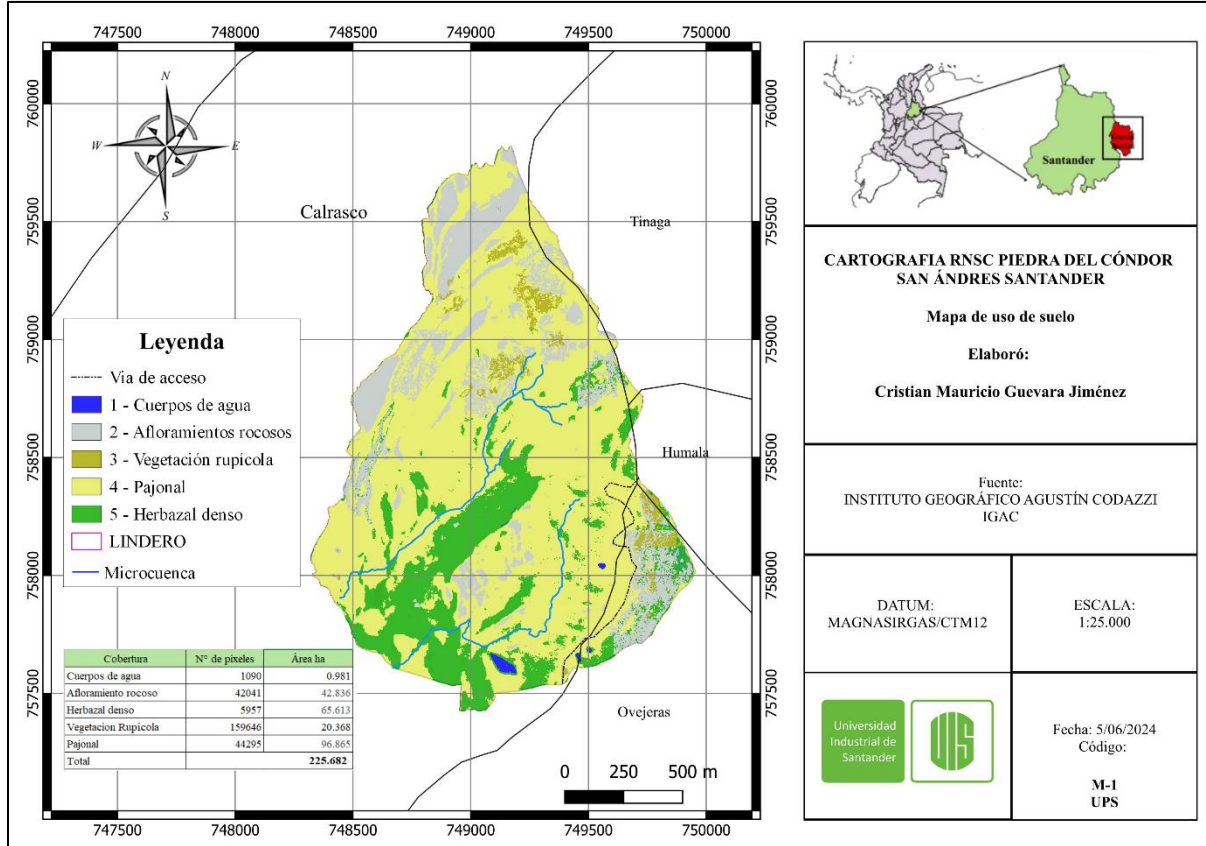
En la etapa preliminar a la selección de los puntos óptimos para la toma de la muestra, se definió realizar una clasificación de coberturas vegetales, basados en los usos de suelo acordes a las coberturas presentes en la reserva (Figura 4). Así mismo, se llevó a cabo una clasificación con mayor nivel de detalle en los cauces principales de cada una de las microcuencas objeto de estudio. Para ello, se llevó a cabo una serie de vuelos con dron para obtener las imágenes de alta resolución. Dichas imágenes fueron procesadas con el software Agisoft Metashape 2.1.3 obteniendo como resultado la ortofoto para el posterior procesamiento en el software Qgis 3.28.9. Para el análisis de cada una de estas ortofotos, se implementó el complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) que permite la clasificación supervisada de imágenes de teledetección, proporcionando herramientas para la descarga, el preprocesamiento y el posprocesamiento de éstas.

La clasificación se realizó a una distancia 30 m a ambos lados de cada uno de los cauces de las microcuencas objeto de estudio. Lo anterior, contemplado en el decreto 2245 del 2017 por el cual se establecen las normas y procedimientos para la delimitación de las rondas hídricas, asegurando la protección y conservación de los recursos hídricos y sus ecosistemas asociados.

Para este caso se tuvo en cuenta la matriz kappa propuesta por Cohen, J. (1960) para corroborar la veracidad y concordancia de cada una de las clasificaciones. En este caso el resultado de esta matriz se interpreta de la siguiente manera: los valores  $\leq 0$  indican que no hay ningún tipo de concordancia; 0,01 a 0,20 una concordancia mínima o nula, 0,21 a 0,40 concordancia con falencias, 0,41 a 0,60 aceptable, 0,61 a 0,80 sustancial y 0,81 a 1,00 casi total. acuerdo perfecto.

**Figura 4**

*Clasificación de uso de suelo Reserva Natural de la Sociedad Civil Piedra del Cóndor*



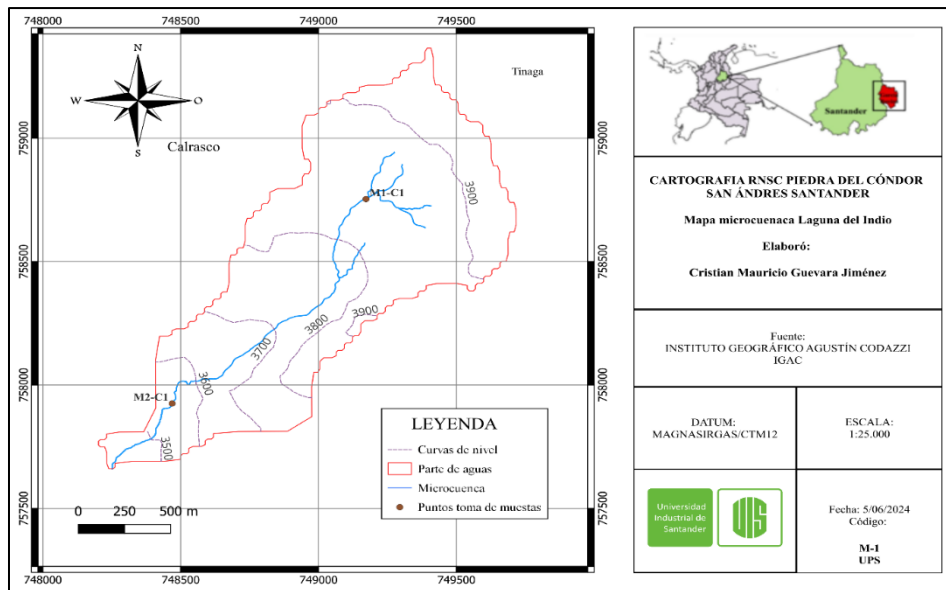
### 3.4 Análisis morfométrico

Para el análisis morfométrico de cada una de las microcuencas se usó un modelo digital de elevación (DEM) con las siguientes características: consta de dimensiones de 3895 píxeles de ancho y 3401 de alto. La resolución espacial es de 0.00026949 grados por píxel en ambas direcciones. Los valores de elevación van de 220 a 4414, con una media de 2177.06 y una desviación estándar de 942.66. El cual, fue entregado por la Fundación Parque Jaime Duque. Posterior a ello, se llevó a cabo la delimitación de cada una de las microcuencas objeto de análisis con la herramienta GRASS del software Qgis 3.28.9 donde primero se importó el DEM del área estudio. Luego, se hizo la orto rectificación con la herramienta r.fill.dir para rellenar depresiones

y evitar vacíos de información, posterior a ello, se calculó la acumulación y dirección de flujo con la función de GRASS r.watershed, definiendo un umbral para la formación de corrientes. Posterior a esto, se extrajo la capa de corrientes con la función r.stream.extract y se delimitó la cuenca con la función r.water.outlet, especificando el punto de descarga de la cuenca. Por último, se hizo uso de la herramienta r.to.vect para vectorizar cada una de las capas resultantes y se añadieron atributos como área y perímetro, usando la calculadora de campos obteniendo así los resultados cartográficos (Figura 5, Figura 6 y Figura 7).

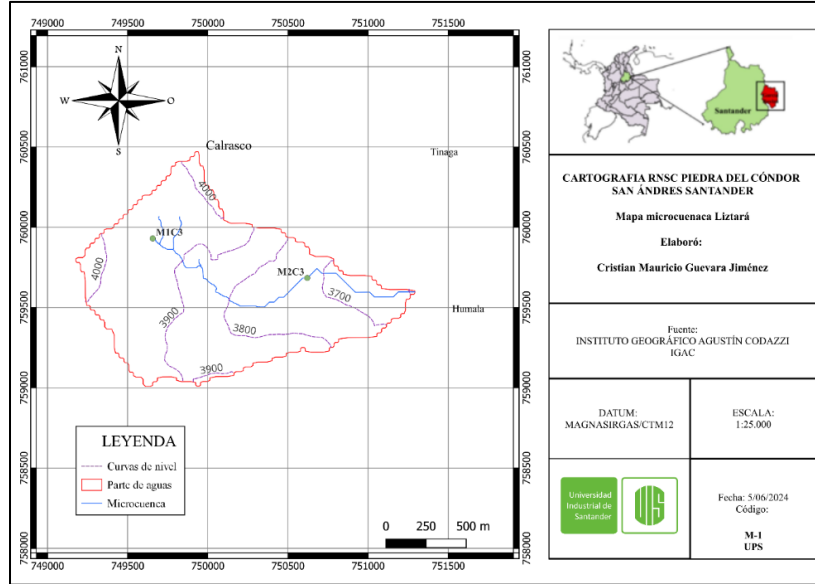
**Figura 5**

*Delimitación y red de drenaje quebrada Pozo del Indio*



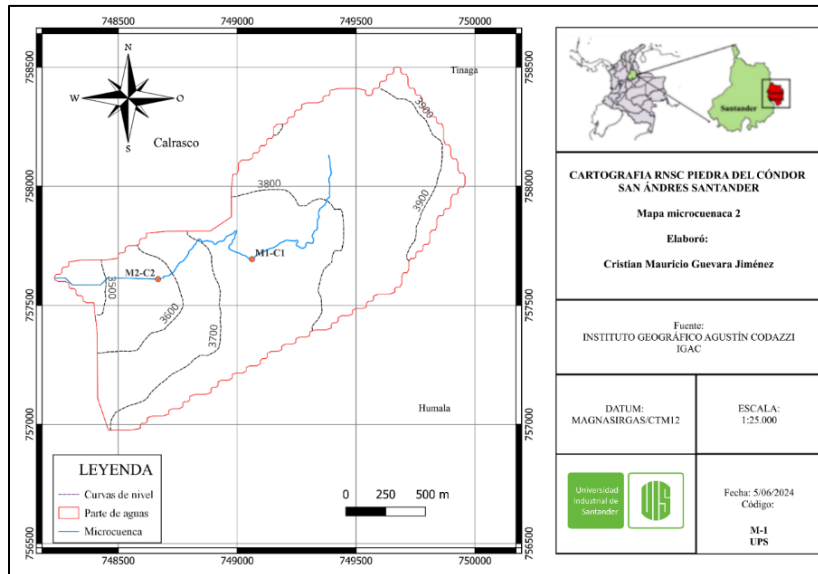
**Figura 6**

*Delimitación y red de drenaje quebrada Listará.*



**Figura 7**

*Delimitación y red de drenaje quebrada Laguna Grande*



### **3.4.1 Pendiente media de la cuenca y curva hipsométrica**

Para la pendiente media de la cuenca, se utilizó la metodología propuesta por Horton (1945). Se basa en relacionar la longitud de cada uno de los cursos de agua y el área de la cuenca, se halló cada una de las longitudes del total de los cauces de la microcuenca mediante la tabla de atributos y calculadora de campos en Qgis y se relacionó con el área total de la misma. En el caso de la curva hipsométrica se tuvo en cuenta el área acumulada en porcentaje y la altitud en metros el cálculo consistió en dividir el área acumulada por el área total y multiplicarlo a su vez por cien.

### **3.5 Parámetros fisicoquímicos**

Los parámetros fisicoquímicos analizados para cada una de las muestras de agua fueron: pH mediante el método(S.M. 4500 – H + B), temperatura °C (S.M 2500 B), estaño mg/L Sn, implementando la digestión por microondas, espectroscopia de emisión en plasma acoplado inductivamente(ICP-OES), arsénico mg/L As (ICP-OES), mercurio (ICP-OES), aluminio (ICP-OES), fosfatos mg/L PO<sub>4</sub> digestión de ácido sulfúrico bajo el standard methods 4500 P,B,D, turbiedad NTU,(NEFELOMETRICO – S.M. 2130 B) cloruros mg/L Cl<sup>-</sup> Argentométrico, Standard Methods 4500- Cl<sup>-</sup> B, sulfatos mg/L SO<sub>4</sub> (Turbidimétrico, Standard Methods 4500 - SO<sub>4</sub> -2 E), fluoruros (Electrodo Iónselectivo - S.M. 4500 -F - C - 0,05 mg/L F<sup>-</sup>), cadmio (ICP-OES), níquel (ICP-OES),, nitratos (Salicilato - J. RODIER, 1998), nitritos (Colorimétrico, Standard Methods 4500 NO<sub>2</sub> -B), sulfatos, DQO y fosfatos.

### **3.6 Parámetros microbiológicos:**

Los parámetros microbiológicos fueron coliformes totales, *Escherichia coli* medido en unidades de número más probable (NMP) por cada 100 ml de muestra, y mesófilos. La toma de cada una de las muestras se realizó en dos puntos específicos, uno en la parte alta de la microcuenca

y otro en la parte baja, estas muestras fueron tomadas en temporada de bajas precipitaciones, las muestras fueron colectadas bajo los criterios especificados por el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM), de la Universidad Industrial de Santander y almacenadas el mismo día para su posterior traslado.

### **3.7 Envasado y preservación de muestras**

El envasado de cada una de las muestras se realizó bajo los criterios establecidos por el Laboratorio de Aguas y Suelos del Centro de Estudios Ambientales (CEIAM) para cada uno de los parámetros a analizar. En el caso de los parámetros fisicoquímicos, se usaron recipientes previamente esterilizados de 2 L estos se llenaron en su totalidad procurando eliminar espacios ocupados por aire que pudieran alterar la muestra. Para el análisis de la demanda química de oxígeno DQO se usaron envases plásticos de 1 L; se adicionó ácido sulfúrico a la muestra hasta alcanzar un valor de pH de 2. Para el análisis de los metales presentes se colectó la muestra en envases de vidrio con capacidad de 250 ml adicionando 20 ml de ácido nítrico hasta conseguir un pH menor a 2.

### **3.8 Análisis de las muestras**

El análisis de cada una de las muestras fue llevado a cabo por el Laboratorio de Aguas y Suelos del Centro de Estudios Investigaciones Ambientales (CEIAM) de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el municipio de Piedecuesta-Santander.

## **4. Resultados**

## 4.1 Clasificación de coberturas del suelo

### 4.1.1 Quebrada Laguna Grande

Las coberturas del suelo predominantes para la quebrada Laguna Grande son el herbazal abierto con un 35,4%. El cual corresponde a zonas de transición o áreas que han sido modificadas por actividades humanas como: El pastoreo y el arbustal con un 17,2% que corresponde las áreas con alto nivel de dificultad para acceder debido a las condiciones topográficas de la microcuenca. En esta área, predominan especies tales como *Hypericum mexicanum*, *Vallea stipularis*, *Paepalanthus lindenii* y *Espeletia conglomerata*.

La matriz Kappa arrojó un resultado de 0,69 lo que confirma la fiabilidad del análisis de clasificación realizado, una buena concordancia entre los datos clasificados y los reales. Además de ello, sugiere que las técnicas utilizadas para el mapeo y análisis de la cobertura terrestre fueron adecuadas. En la Tabla 5 se detallan las áreas para cada cobertura hallada en la microcuenca.

**Tabla 5**

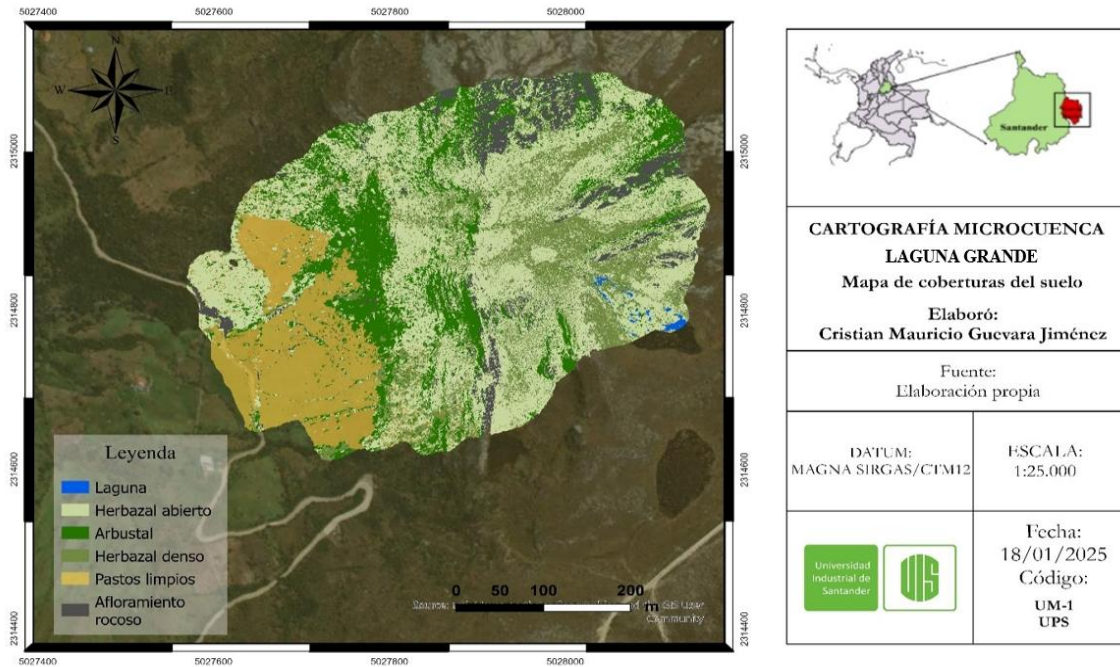
*Coberturas del suelo para la microcuenca Laguna Grande*

Código LCLC	Cobertura	Área (ha)
512	Laguna	0,56
3212	Herbazal abierto	8,31
322	Arbustal	4,05
3211	Herbazal denso	3,29
231	Pastos limpios	3,29
332	Afloramiento rocoso	4,00

En la Figura 8 se observa el mapa de coberturas del suelo para la microcuenca Laguna Grande.

**Figura 8**

*Coberturas del suelo para la microcuenca Laguna Grande*



**4.1.2 Quebrada Pozo del Indio**

El herbazal abierto y las turberas son las coberturas con mayor representatividad en la microcuenca quebrada Pozo del Indio. Dentro de las especies más representativas de esta cobertura se denotan: *Espeletia conglomerata*, *Culcitum canescens* y *Hypericum mexicanum*. Estas especies son de gran importancia y contribuyen a la estabilidad de la microcuenca, principalmente por su capacidad de regular la humedad del suelo y a su vez disminuye la escorrentía, reduciendo la erosión y mejorando así la calidad del agua en la cuenca. En (Tabla 6), se detallan las áreas para cada cobertura hallada en la microcuenca la matriz Kappa arrojó un resultado de 0,86 lo que indica una muy buena precisión de la clasificación.

**Tabla 6**

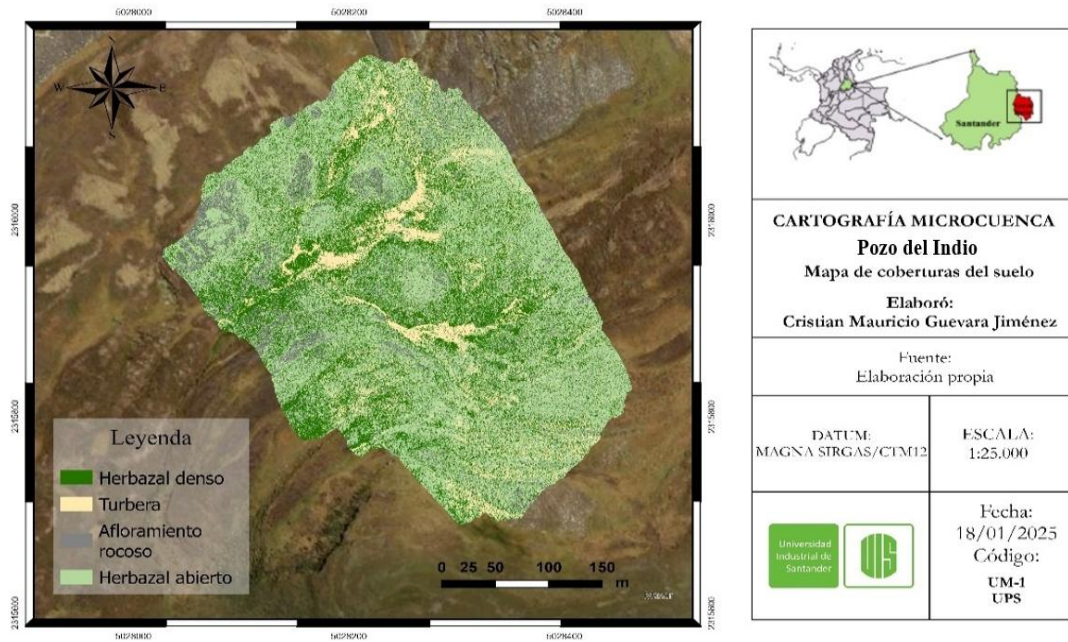
*Coberturas del suelo para la microcuenca Pozo del Indio*

Código LCLC	Cobertura	Área (ha)
511	Cuerpo de agua	0,002
3212	Herbazal denso	1,580
322	Turbera	3,570
3211	Herbazal abierto	5,720
332	Afloramiento rocoso	0,760

En la Figura 9 se observa el mapa de coberturas del suelo para la microcuenca Pozo del Indio

**Figura 9**

*Coberturas del suelo para la microcuenca Pozo del Indio*



### 4.1.3 Quebrada Listará

Siendo esta la microcuenca ubicada en predios aledaños de la reserva se identifica que en la microcuenca quebrada Listará, la cobertura predominante corresponde a un arbustal abierto que ocupa el 50% del área. Esta cobertura cuenta con presencia de especies; tales como: *Weinmannia fagaroides* (Encenillo), *Berberis huertasii* (Cacho de cabra), *Cestrum buxifolium* (Tinto), *Vallea stipularis* (Raque) y *Solanum stenophyllum*. Estas especies juegan un papel crucial en la calidad del agua debido a su contribución en procesos como la regulación hídrica, la conservación del suelo, la prevención de la erosión y la filtración natural del agua. Además, su presencia favorece la biodiversidad y el equilibrio ecológico de la microcuenca, destacando su importancia ambiental y su influencia directa en los recursos.

#### Figura 10

*Panorámica coberturas presentes microcuenca Quebrada-Listara*



## 4.2 Análisis morfométrico

### 4.2.1 Morfometría quebrada Pozo del Indio

La quebrada Pozo del Indio corresponde a una microcuenca oval oblonga alargada, con un moderado caudal en variadas épocas del año y un potencial de creciente moderado con distribución uniforme de su cauce principal (Tabla 7).

**Tabla 7**

*Resultados valores morfométricos quebrada Pozo del Indio.*

Parámetro	Valor calculado
Índice de compacidad (Kc)	1,50
Factor de forma (F)	0,25
Índice de alargamiento (Ia)	2,38
Índice asimétrico	1,00

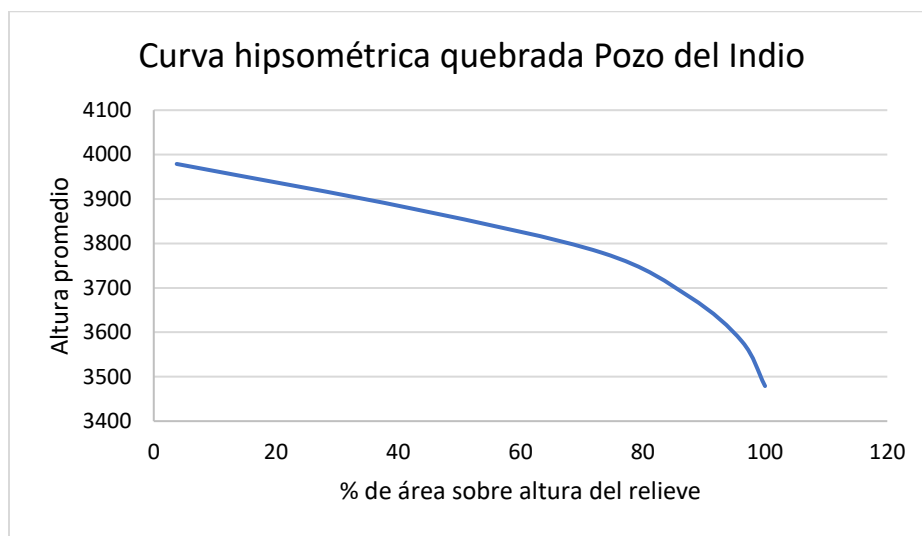
Los resultados obtenidos muestran que la cuenca presenta baja susceptibilidad a presentar grandes volúmenes de aguas de escurrimiento que puedan llegar a generar crecidas o avenidas torrenciales.

**4.2.1.1 Pendiente media de la cuenca.** En este caso la pendiente media del cauce de la quebrada Pozo del Indio arrojó como resultado 3,27% lo cual indica que esta microcuenca cuenta con un tipo de relieve suave con un bajo nivel de pendiente y, por ende, un bajo nivel de sedimentación. Consecuentemente, esta microcuenca presenta procesos de degradación (erosión y arrastre) no significativos por la baja velocidad media que puede llegar a alcanzar la escorrentía en razón a su topografía.

**4.2.1.2 Curva hipsométrica.** Dado el procesamiento de datos se obtiene una curva hipsométrica que corresponde a una curva cóncava (Figura 11).

**Figura 11**

*Curva hipsométrica quebrada Pozo del Indio*



#### **4.2.2 Morfometría quebrada Laguna Grande**

Al tener en cuenta los valores obtenidos una vez procesados los datos (Tabla 8), se logra identificar que la quebrada en estudio corresponde a una microcuenca de oval oblonga a rectangular oblonga estrecha con bajo caudal, moderadamente alargada con el cause principal recargado a una vertiente.

**Tabla 8***Resultados valores morfométricos quebrada Laguna Grande*

Parámetro	Valor calculado
Índice de compacidad (Kc)	1,78
Factor de forma (F)	0,52
Índice de alargamiento (Ia)	0,42
Índice asimétrico	1,25

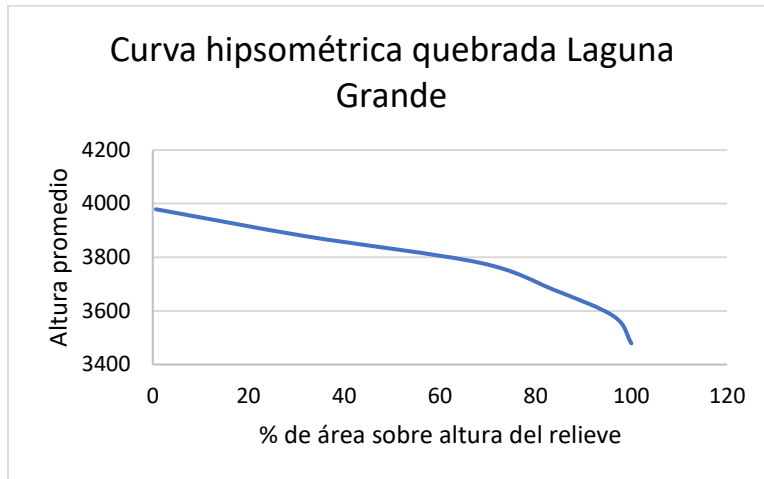
Los resultados sugieren que la microcuenca presenta una forma que propicia que el tiempo de concentración sea moderado y, por ende, hay amenazas por crecidas o avenidas torrenciales ante eventos de precipitación de alta intensidad.

**4.2.2.1 Pendiente media.** En la pendiente media de la quebrada Laguna Grande se obtuvo un valor de 12,6% lo que corresponde a un relieve accidentado, con alto potencial de creciente.

**4.2.2.2 Curva hipsométrica.** La tendencia de la curva permite inferir que la quebrada Laguna Grande corresponde a un afluente maduro con parámetros equilibrados en cuanto a etapas de procesos erosivos y sedimentación (Figura 12).

**Figura 12**

*Curva hipsométrica quebrada Laguna Grande*



**4.2.3 Morfometría quebrada Listará**

Una vez procesados los datos (Tabla 9), se puede afirmar que la quebrada Listará es una microcuenca alargada con baja susceptibilidad a avenidas torrenciales. La configuración alargada de la microcuenca otorga un tiempo de concentración mayor, lo que puede contribuir a una respuesta con mayor facilidad ante eventos de precipitación intensa.

**Tabla 9**

*Resultados valores morfométricos quebrada Listará*

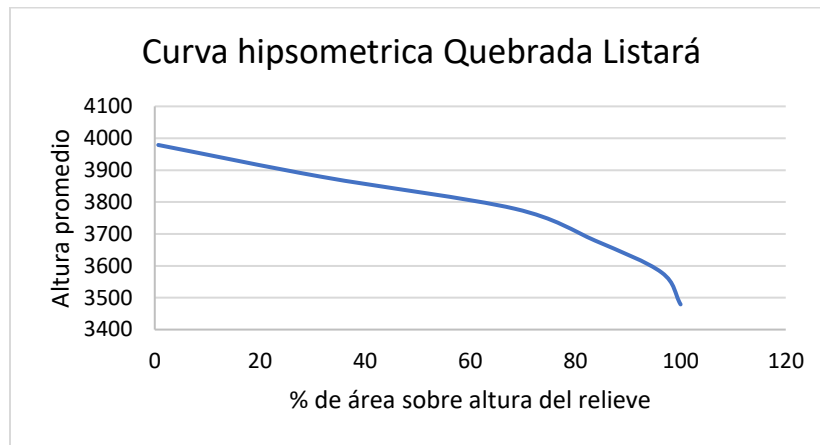
Parámetro	Valor calculado
Índice de compacidad (Kc)	1,49
Factor de forma (F)	0,52
Índice de alargamiento (Ia)	1,36
Índice asimétrico	1,87

Tanto el factor de forma como el índice de alargamiento indican que la forma de la cuenca es alargada, por su parte el índice asimétrico deja comprender que la descarga hídrica se dirige a una de las vertientes ya que la esorrentía superficial es alta.

**4.2.3.1 Curva hipsométrica.** La tendencia de la curva permite inferir que la quebrada Listará corresponde a una microcuenca de edad madura y procesos tanto de erosión como de sedimentación estabilizados (Figura 13).

### Figura 13

*Gráfica curva hipsométrica quebrada Listará*



## 4.3 Calidad del agua

### 4.3.1 Parámetros fisicoquímicos quebrada Pozo del Indio

En la parte alta de la microcuenca Pozo del Indio, algunos parámetros para destacar de los resultados son: El pH ligeramente ácido (6.1) y la turbiedad elevada (34 NTU) sugieren condiciones que influyen en la calidad del agua. Mientras que elementos como el plomo (0.117 mg/L) y el aluminio (0.540 mg/L) presentan concentraciones que requieren monitoreo debido a sus posibles efectos tóxicos, debido a los altos niveles de concentración. Por otra parte, otros

compuestos como nitratos, nitritos y fosfatos están dentro de los umbrales establecidos por la normativa y no representan riesgos para la salud humana según decreto 1595 de 1984.

(Tabla 10).

**Tabla 10**

*Resultados de parámetros fisicoquímicos para M1-C1 quebrada Pozo del Indio*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
pH	Unidades de pH	6,1000
Temperatura	°C	25,0000
DQO	mg/LO 2	52,0000
Fluoruros	mg/L F-	0,0423
Sulfatos	mg/L SO 4	<10,0000
Cloruros	mg/L Cl -	24,0000
Nitratos	mg NO 3 -N/L	0,4600
Nitritos	mg NO 2 -N/L	<0,0050
Turbiedad	NTU	34,0000
Fosfatos	mg/L PO 4	<0,1000
Arsénico	mg/L As	0,0030
Aluminio	mg/L Al	0,5400
Mercurio	mg/L Hg	<0,0005
Estaño	mg/L Sn	0,3000
Cadmio	mg/L Cd	0,0030
Níquel	mg/L Ni	0,0050
Plomo	mg/L Pb	0,1170

En la Tabla 11 se evidencian los resultados de parámetros fisicoquímicos de la muestra tomada en la parte baja de la microcuenca (M2-C1) Pozo del Indio. Los parámetros como el pH (6,81), la temperatura (25,3 °C), la turbiedad (35 NTU), los nitratos (0,26 mg NO<sub>3</sub>-N/L), los fosfatos (<0,1 mg PO<sub>4</sub>/L) y el mercurio (<0,0005 mg/L) están dentro de los límites normativos, indicando un comportamiento estable que no representa riesgos significativos en la calidad del

agua. Sin embargo, se identifica una elevada concentración de plomo (0,232 mg/L) que genera un alto grado de preocupación.

**Tabla 11**

*Resultados de parámetros fisicoquímicos para M2-C1 quebrada Pozo del Indio*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
pH	Unidades de pH	6,8100
Temperatura	°C	25,3000
DQO	mg/LO 2	37,0000
Fluoruros	mg/L F-	0,0623
Sulfatos	mg/L SO 4	<10,0000
Cloruros	mg/L Cl -	<5,0000
Nitratos	mg NO 3 -N/L	0,2600
Nitritos	mg NO 2 -N/L	<0,0050
Turbiedad	NTU	35,0000
Fosfatos	mg/L PO 4	<0,1000
Arsénico	mg/L As	0,0010
Aluminio	mg/L Al	0,5100
Mercurio	mg/L Hg	<0,0005
Estaño	mg/L Sn	<0,1000
Cadmio	mg/L Cd	<0,0020
Níquel	mg/L Ni	<0,0040
Plomo	mg/L Pb	0,2320

#### ***4.3.2 Parámetros microbiológicos quebrada Pozo del Indio.***

Los resultados del análisis microbiológico realizado a la muestra (M1-C1) parte alta de la microcuenca se encuentran dentro de los umbrales normales (Tabla 12), según establecido en decreto 1595 de 1984 para aguas naturales de cauces superficiales.

**Tabla 12***Parámetros microbiológicos quebrada Pozo del Indio*

<b>Quebrada Pozo del Indio</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
Coliformes Totales	NMP/100 ml	<1,8
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	<1,8
Mesófilos	UFC/ml	0,0

En la Tabla 13 se observa que la parte baja de la microcuenca Pozo del Indio (muestra M2-C1) presenta altos niveles de mesófilos que puede generar un riesgo para la salud humana.

**Tabla 13***Parámetros microbiológicos M2-C1 quebrada Pozo del Indio*

<b>Quebrada Pozo del Indio</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
Coliformes Totales	NMP/100 ml	<1,8
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	<1,8
Mesófilos	UFC/ml	784,0

#### **4.3.3 Parámetros fisicoquímicos quebrada Laguna Grande**

En la parte alta de la quebrada Laguna Grande, se destaca un pH de 7,55 que está dentro del rango óptimo, la turbiedad en 34 NTU, los nitratos que presentan un resultado de 0,13 mg NP3-N/L y el mercurio con una concentración menor a 0,0005 mg/L, todos estos no representan riesgos para la salud humana ya que se encuentran dentro del umbral establecido por la normativa. Se presentan concentraciones elevadas de plomo (0,7880 mg/L) que está por encima del límite permitido según el decreto 1595 de 1984 (Tabla 14).

**Tabla 14***Resultados parámetros fisicoquímicos quebrada Laguna Grande*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
pH	Unidades de pH	7,5500
Temperatura	°C	24,8000
DQO	mg/LO 2	14,0000
Fluoruros	mg/L F-	0,0532
Sulfatos	mg/L SO 4	<10,0000
Cloruros	mg/L Cl -	<5,0000
Nitratos	mg NO 3 -N/L	0,1300
Nitritos	mg NO 2 -N/L	<0,0050
Turbiedad	NTU	1,0000
Fosfatos	mg/L PO 4	<0,1000
Arsénico	mg/L As	<0,0010
Aluminio	mg/L Al	0,2300
Mercurio	mg/L Hg	<0,0005
Estaño	mg/L Sn	0,0300
Cadmio	mg/L Cd	0,0020
Níquel	mg/L Ni	0,0040
Plomo	mg/L Pb	0,7880

En la Tabla 15 se evidencian los resultados de parámetros fisicoquímicos de la muestra tomada en la parte baja de la microcuenca (M2-C2) Laguna Grande. Es de gran importancia resaltar que el pH presente en la muestra es de 4,46, lo cual se encuentra dentro del rango óptimo para mantener la estabilidad de los ecosistemas de páramo en la zona; la turbiedad, con un valor de 2 NTU, indica buena calidad del agua, relevante para el desarrollo de procesos como la regulación hídrica y la captación de agua en estos ecosistemas; los nitratos presentan una concentración de 0,18 mg NP3-N/L, adecuada para sostener el balance de nutrientes necesario para

el óptimo desarrollo de la flora presente en la zona; y el mercurio tiene una concentración inferior a 0,005 mg/L, alineándose con los estándares de seguridad ambiental. Sin embargo, el nivel de concentración de plomo de 0,523 mg/L excede los criterios admisibles, lo cual representa un riesgo potencial tanto para la salud humana como para las dinámicas del ecosistema, ya que impacta negativamente la calidad del agua y a su vez la flora presente en áreas circundantes a la microcuenca.

**Tabla 15**

*Resultados de parámetros físicoquímicos para M2-C2 quebrada Laguna Grande*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
pH	Unidades de pH	4,4600
Temperatura	°C	25,0000
DQO	mg/LO 2	19,0000
Fluoruros	mg/L F-	0,0390
Sulfatos	mg/L SO 4	<10,0000
Cloruros	mg/L Cl -	<5,0000
Nitratos	mg NO 3 -N/L	0,1800
Nitritos	mg NO 2 -N/L	<0,0050
Turbiedad	NTU	2,0000
Fosfatos	mg/L PO 4	<0,1000
Arsénico	mg/L As	0,0020
Aluminio	mg/L Al	0,0900
Mercurio	mg/L Hg	<0,0005
Estaño	mg/L Sn	0,0350
Cadmio	mg/L Cd	0,0020
Níquel	mg/L Ni	0,0040
Plomo	mg/L Pb	0,5230

#### 4.3.4 Parámetros microbiológicos quebrada Laguna Grande

Los análisis a los cuales se sometió la muestra de la parte alta de la microcuenca presentan parámetros normales según lo establecido por el decreto 1595 de 1984 (Tabla 16). Sin embargo, la parte baja presenta un nivel elevado de coliformes totales >1,8 NMP/100 ml (Tabla 17), lo que ha sido generado posiblemente por el establecimiento de semovientes en áreas limítrofes a la microcuenca.

**Tabla 16**

*Resultados análisis microbiológicos quebrada Laguna Grande*

Parámetro	Unidades	Resultado
Coliformes Totales	NMP/100 ml	>1,8
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	<1,8
Mesófilos	UFC/ml	0,0

**Tabla 17**

*Resultados análisis microbiológicos quebrada Laguna Grande M2-C2*

Parámetro	Unidades	Resultado
Coliformes Totales	NMP/100 ml	<1,8
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	<1,8
Mesófilos	UFC/ml	784,0

#### 4.3.5 Parámetros fisicoquímicos quebrada Listará

De acuerdo con los resultados del análisis realizado a la parte alta de la microcuenca Listará, los parámetros están dentro de los umbrales óptimos (Tabla 18). De los resultados se destacan el pH que es de 6,22 que está dentro del rango óptimo, la turbiedad en 11 NTU, los nitratos que presenta un resultado de 0,31 mg NP3 -N/L y el mercurio con una concentración

menor a 0,005 mg/L, todos estos no representan riesgos para la salud humana ya que se encuentran dentro del umbral establecido por la normativa.

**Tabla 18**

*Resultados parámetros fisicoquímicos quebrada Listará*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
pH	Unidades de pH	6,2200
Temperatura	°C	25,6000
DQO	mg/LO 2	27,0000
Fluoruros	mg/L F-	0,0605
Sulfatos	mg/L SO 4	<10,0000
Cloruros	mg/L Cl -	<5,0000
Nitratos	mg NO 3 -N/L	0,3100
Nitritos	mg NO 2 -N/L	<0,005
Turbiedad	NTU	11,0000
Fosfatos	mg/L PO 4	<0,1000
Arsénico	mg/L As	<0,0010
Aluminio	mg/L Al	0,0900
Mercurio	mg/L Hg	<0,0005
Estaño	mg/L Sn	0,0080
Cadmio	mg/L Cd	0,0020
Níquel	mg/L Ni	0,0030
Plomo	mg/L Pb	0,0080

En la Tabla 19 se evidencian los resultados de parámetros fisicoquímicos de la muestra tomada en la parte baja de la microcuenca Listará. Algunos parámetros para destacar de los resultados son el pH con un resultado de 6,22 que está dentro del rango óptimo, la turbiedad en 11 NTU, los nitratos que presenta un resultado de 0,31 mg NP3 -N/L y el mercurio con una concentración menor a 0,0005 mg/L, todos estos no representan riesgos para la salud humana ya que se encuentran dentro del umbral establecido por la normativa.

**Tabla 19***Resultados de parámetros fisicoquímicos para M2-C3 quebrada Listará*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
pH	Unidades de pH	6,2200
Temperatura	°C	25,6000
DQO	mg/LO 2	27,0000
Fluoruros	mg/L F-	0,0605
Sulfatos	mg/L SO 4	<10,0000
Cloruros	mg/L Cl -	<5,0000
Nitratos	mg NO 3 -N/L	0,3100
Nitritos	mg NO 2 -N/L	<0,0050
Turbiedad	NTU	11,0000
Fosfatos	mg/L PO 4	<0,1000
Arsénico	mg/L As	<0,0010
Aluminio	mg/L Al	0,0900
Mercurio	mg/L Hg	<0,0005
Estaño	mg/L Sn	<0,0080
Cadmio	mg/L Cd	<0,0020
Níquel	mg/L Ni	<0,0030
Plomo	mg/L Pb	<0,0080

**4.3.6 Parámetros microbiológicos quebrada Listará**

Los análisis a los cuales fue sujeto la muestra de la parte alta, muestra que las variables están dentro de los rangos establecidos por la normativa (Tabla 20).

**Tabla 20***Resultados análisis microbiológicos quebrada Listará*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
Coliformes Totales	NMP/100 ml	<1,8
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	<1,8
Mesófilos	UFC/ml	0,0

En la Tabla 21 se evidencian los resultados de parámetros microbiológicos de la muestra tomada en la parte baja de la microcuenca Listará. Para esta microcuenca la concentración está en un rango admisible para la potabilización del agua.

**Tabla 21**

*Resultados análisis microbiológicos quebrada Listará*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultado</b>
Coliformes Totales	NMP/100 ml	<1,8
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	<1,8
Mesófilos	UFC/ml	21,0

#### **4.4 Recomendaciones de manejo de las microcuencas**

Teniendo en cuenta que los resultados de este estudio permiten tener una visión integral desde el componente técnico de las microcuencas y que los funcionarios del parque Jaime Duque dieron a conocer que el área ha sido invadida en repetidas ocasiones por ganado, se formulan recomendaciones (Tabla 22) que aportan a los objetivos nacionales al 2030 que propone el Estudio Nacional del Agua, entre los que se destacan reducción de la contaminación en cuerpos hídricos superficiales y aumentar el uso eficiente del agua (Ideam, 2023).

**Tabla 22**

Recomendaciones de manejo para las microcuencas estudiadas

Aspectos	Microcuencas		
	Pozo del Indio	Laguna Grande	Listará
Uso del suelo	Si bien, el mayor porcentaje de coberturas de la microcuenca son naturales, se debe evitar que las áreas de pastos para ganadería afecten las rondas hídricas.	Se recomienda mantener el estado actual de las coberturas presentes en la microcuenca y uso de suelo para conservación.	Se recomienda mantener el estado actual de las coberturas presentes en la microcuenca y uso de suelo para conservación.
Pastoreo de ganado	Se recomienda evitar el acceso del ganado a las rondas hídricas a fin de reducir las concentraciones de mesófilos en la parte baja de la microcuenca que representan un riesgo para el consumo humano.	A pesar de que no se evidencian coberturas para pastoreo, en la parte baja de la microcuenca se hallaron altas concentraciones de microorganismos mesófilos y por ende se ratifica que se presenta invasión por ganado que contamina los cuerpos de agua.	Se recomienda impedir el acceso de ganado al área de la microcuenca para evitar contaminación de cuerpos hídricos.
Rondas hídricas	Es necesario delimitar las rondas hídricas con el fin de evitar invasión de ganado y por ende disturbios y contaminación de los cuerpos de agua.	Se recomienda hacer cerramiento y delimitación de rondas hídricas de la microcuenca.	Se recomienda hacer cerramiento y delimitación de rondas hídricas de la microcuenca.

## 5. Discusión

Colombia cuenta con el 50% de los páramos existentes, ecosistemas con particularidades edáficas, climáticas, geológicas que además, cuenta con altas tasas de endemismo; pese a ser la fuente del 70% del recurso hídrico del territorio nacional con presencia en las tres cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta, los páramos son sometidos a diferentes presiones como el cambio de coberturas y uso del suelo lo que impacta directamente las dinámicas ecológicas y la biodiversidad (Alzate-Guarin et al., 2021).

Los Andes es la región biogeográfica que alberga la mayor cantidad de personas en Colombia (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2020), por esta razón ha sido una de las áreas más afectadas por el cambio de coberturas y usos del suelo a lo largo de los años (Obando-Almeciga, 2019; Correa et al., 2020). La mayor predominancia de coberturas del suelo para las tres microcuencas estudiadas corresponde a herbazales abiertos, arbustales y turberas que coincide con lo que describe Castiblanco-Álvarez et al. (2021), quienes afirman que especies herbáceas del género *Calamagrostis*, praderas (equivalente a turberas) asociadas a cuerpos de agua y matorrales (arbustales) son comunes en el ecosistema de páramo. Conservar las coberturas naturales dentro de las microcuencas y en la reserva La Piedra del Cóndor es clave porque contribuye a evitar la extinción local de especies catalogadas bajo algún grado de amenaza por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) para el páramo del Almorzadero (Zapáta-Jiménez et al., 2022).

La caracterización hidrológica, que comúnmente se hace mediante el cálculo de índices morfométricos es clave en la gestión del riesgo ya que permite comprender cómo es el comportamiento de la escorrentía y los caudales de una cuenca posterior a eventos de precipitación

(Ortiz-Quintero, 2021). Las microcuencas estudiadas son ovales por lo que no representan alto riesgo de procesos como erosión, remoción en masa o avenidas torrenciales, esto se debe a que de acuerdo con Ortiz-Quintero (2021) la forma de la cuenca está correlacionada con los tiempos de concentración. Para el caso de las tres microcuencas, se obtuvieron resultados similares a los encontrados para la cuenca del río Cubillos ubicada en el páramo de Guerrero respecto al índice de compacidad y el factor de forma, ya que estos parecen no tener relación lógica al indicar por un lado que su forma es oval, y por otro que es oblonga (Ortiz-Quintero, 2021), sin embargo, visualmente se identifica que las microcuencas tienden a ser alargadas.

La evaluación de la calidad del agua en las tres microcuencas permite identificar los efectos ocasionados por el uso del suelo años atrás en la calidad del agua lo cual es crucial para entender tanto la salud de estos ecosistemas como los posibles impactos de las actividades humanas. La microcuenca Pozo del Indio y Laguna Grande, presenta valores que superan los umbrales establecidos para mesófilos lo que sugiere una posible influencia por las actividades de ganadería en predios aledaños al área de la reserva, esto hace que los residuos orgánicos puedan llegar hasta fuentes hídricas por procesos de infiltración en el suelo y flujos subsuperficiales en favor de la pendiente. Este hallazgo es importante, ya que el exceso de nitratos en el agua puede tener efectos negativos sobre la salud humana (Matovelle, 2021).

En términos de pH, se observó que dos de las tres microcuencas presentaron valores ligeramente ácidos, lo cual es característico de los ecosistemas de páramo, debido a la composición orgánica y la alta presencia de materia orgánica en descomposición en el suelo (Hofstede & Llambí, 2020). Estos valores de pH presentan un riesgo bajo para el consumo humano ya que los valores óptimos deben ser entre 5 y 9 de acuerdo con el Decreto 1594 de 1984. Otro aspecto relevante fue la evaluación de las concentraciones de *Escherichia coli*, que en general fueron bajas

en todas las microcuencas, lo que sugiere que la presencia de fuentes de contaminación directa por aguas residuales humanas es limitada.

Un parámetro que llama la atención es el plomo, esto debido a sus elevadas concentraciones que supera los rangos establecidos por la normativa en las microcuencas Pozo del Indio y Laguna Grande sin presentarse actividades mineras u otras que impliquen el uso del elemento en la zona de estudio o en sus alrededores. Lo anterior apoya los hallazgos realizados por Hernández-Rodríguez et al. (2021), quienes demostraron a partir de estudios documentados y publicados, que el plomo representa un riesgo por sus altas concentraciones en el suelo y en el agua en diversas partes del país, por ende, la Fundación Parque Jaime Duque en uso de sus facultades opto por realizar un segundo análisis. En el cual, se hallaron parámetros  $< 0,100$  los cuales, se encuentran dentro de los umbrales establecidos para el elemento plomo. Sin embargo, es importante continuar con muestreos periódicos para conocer el comportamiento de estos parámetros con el fin de trazar rutas de acción que mitiguen los impactos en la biodiversidad y la salud humana.

Es evidente que conservar las coberturas naturales en los páramos propicia la buena salud de los ecosistemas y agua de calidad para la población en las partes medias y bajas de las cuencas, no obstante, se observa que se requieren implementar mejores prácticas de pastoreo en zonas aledañas ya que, a pesar de que, dos de las microcuencas están dentro de un área de reserva, en la parte baja presentan contaminación por microorganismos. Es importante mencionar que en ocasiones el ganado bovino de predios aledaños invade las áreas de la reserva y por ende contaminan los cuerpos de agua, sin embargo, actualmente se llevan a cabo labores de delimitación y cerramiento de predios por parte del personal encargado del área protegida.

## 6. Conclusiones

Las coberturas del suelo para las microcuencas Pozo del Indio y Laguna presentan una baja tasa de transformación en el uso del suelo, lo que refleja un índice de conversión medio a bajo. Este comportamiento se mantiene a pesar de que la reserva La Piedra del Cóndor fue registrada como parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINA) hace menos de cuatro años. La gestión del riesgo cobra cada vez mayor importancia en los instrumentos de planificación territorial, y es en este contexto en el que evaluar la dinámica hidrológica para caracterizar la respuesta de las microcuencas ante eventos extremos de precipitación.

Las tres microcuencas ubicadas en el ecosistema de páramo muestran una calidad de agua aceptable; sin embargo, los análisis evidencian impactos negativos significativos derivados de las actividades antropogénicas, particularmente la ganadería. Según el estudio, las prácticas tradicionales de pastoreo ovino están asociadas a una alteración considerable en los parámetros de potabilidad del agua aguas abajo, debido a la presencia de microorganismos perjudiciales para la salud humana. Basado en esto es necesario fomentar prácticas sostenibles en las áreas de influencia, orientadas a la protección y conservación de estos ecosistemas estratégicos.

## **7. Recomendaciones**

Desarrollar jornadas de capacitación para las comunidades en que se den a conocer los impactos del pastoreo cerca de cuerpos hídricos sobre el agua que usan incluso para su propio consumo.

Desarrollar propuestas de delimitación y cerramiento de los cuerpos de agua de acuerdo con la normativa establecida.

Analizar la calidad del agua en la parte media y baja de la cuenca del Río Guaca, con el fin de contrastar los resultados de parámetros obtenidos en tributarios (como los que se estudiaron en este proyecto). Con esto se podrá entender la influencia agropecuaria sobre el recurso hídrico.

Realizar monitoreos periódicos con la finalidad de analizar con mayor precisión el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y biológicos en variadas épocas del año.

### Referencias Bibliográficas

- Alzate-Guarin, F. A., Cano Gallego, D. E., & Ortiz Gentry, R. d. C. (2021). estado de conservación de las especies de plantas angiospermas de los páramos de Antioquia. *Acta Biológica Colombiana*, 27(2), 177. 10.15446/abc.v27n2.89521
- Benavides, J. C., Rocha, S., & Blanco, E. A. (2023). Spatial and temporal patterns of methane emissions from mountain peatlands in the northern Andes across a disturbance gradient. *Frontiers in Earth Science*, 11 <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2023.1078830>
- Castiblanco-Álvarez, F., Pérez-Martínez, &., Laura Victoria, Ávila-Rodríguez, &., Liz Alejandra, & Vargas-Ríos, O. (2021). Plantas de páramo: formas de vida y adaptación. In O. Vargas-Ríos (Ed.), *Bases ecológicas y sociales para la restauración de los páramos* (pp. 39–85). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Correa-Ayram, C., Etter, A., Díaz-Timoté, J., Rodríguez-Buriticá, S., Ramírez, W. y Corzo, G. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. [A Coefficient of Agreement for Nominal Scales - Jacob Cohen, 1960](#)
- DANE. (2020). *Geovisor Registro Estadístico Base de Población - REBP*. <https://geoportal.dane.gov.co/>. Recuperado 01/02/2025, de <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/sociedad/registro-estadistico-personas/>

- Dixxlab. (2025). coliformes fecales o *E. coli* ¿cuál es el indicador microbiológico para el reglamento de agua potable? <https://www.dixxlab.com>. Recuperado 16/10/2024, de <https://www.dixxlab.com/cual-es-el-indicador-microbiologico-para-el-reglamento-de-agua-potable-coliformes-fecales-o-e-coli>
- González-Martínez, M. D., Huguet, C., Pearse, J., McIntyre, N., & Camacho, L. A. (2019). Assessment of potential contamination of Paramo soil and downstream water supplies in a coal-mining region of Colombia. *Applied Geochemistry*, 108, 104382. 10.1016/j.apgeochem.2019.104382
- Gualdrón-Duran L E. (2016). *Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos* (Especialización).
- Hernández-Rodríguez, C. B., Gutierrez-Malaxechebarria, A., & Zafra-Mejía, C. A. (2021). Reported Lead Levels in Different Environmental Matrices in Colombia. *Ingeniería Y Universidad*, 2510.11144/Javeriana.iued25.rlld
- Hofstede, R. G. M., & Llambí, L. D. (2020). Plant Diversity in Paramo—Neotropical High Mountain Humid Grasslands. In M. I. Goldstein, & D. A. DellaSala (Eds.), *Encyclopedia of the World's Biomes* (pp. 362–372). Elsevier. 10.1016/B978-0-12-409548-9.11858-5
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, v. 56, p. 275–370.
- Ideam (2023). Estudio Nacional del Agua 2022. Ideam. 464 pp
- Madriñán, S., Cortés, A. J., & Richardson, J. E. (2013). Paramo is the world's fastest evolving and coolest biodiversity hotspot. *Frontiers in*

*Genetics*, 4 <https://www.frontiersin.org/journals/genetics/articles/10.3389/fgene.2013.001>

[92](#)

Mars, M. (2024). Conserving Ecuador's Ecosystems. <https://fsc.org>. Retrieved 01/02/2025, from <https://fsc.org/en/newscentre/stories/conserving-ecuadors-ecosystems-a-look-at-sustainable-forest-management-in>

Martínez-Medina, S., Cottyn, H., Garrido, A.M., Kirshner, J. & O'Bryen, R. (2024). Water factories of the high Colombian mountains: Paramo as 'infrastructural nature'. *Water Alternatives*, 17(1): 167-186

Matovelle, C. (2021). Paramo to Pasture Conversion in a Mountain Watershed: Effects on Water Quality and Quantity. *Mountain Research and Development*, 41(4), R74. 10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00026.1

Mosquera, G. M., Hofstede, R., Bremer, L. L., Asbjornsen, H., Carabajo-Hidalgo, A., Célleri, R., Crespo, P., Esquivel-Hernández, G., Feyen, J., Manosalvas, R., Marín, F., Mena-Vásquez, P., Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A., Pesántez, J., Riveros-Iregui, D. A., & Suárez, E. (2023). Frontiers in paramo water resources research: A multidisciplinary assessment. *Science of the Total Environment*, 892, 164373. 10.1016/j.scitotenv.2023.164373

Ministerio de Agricultura. (1984). *Decreto 1594 de 1984*. Diario Oficial No. 36.700, del 26 de junio de 1984. [https://archivo.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_1594\\_de\\_1984.pdf](https://archivo.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1594_de_1984.pdf)

- Murad, C. A., Pearse, J., & Huguet, C. (2024). Multitemporal monitoring of paramos as critical water sources in Central Colombia. *Scientific Reports*, *14*(1), 16706. 10.1038/s41598-024-67563-z
- Narváez-Tovar, J. C. (2023). Caracterización morfométrica de la microcuenca del Caño Caribito en el municipio de Puerto Lleras - Meta a partir de un modelo digital de elevación
- Obando-Almeciga, D. E. (2019). *Cambio en el uso del suelo de los páramos colombianos a lo largo de la historia* (Ingeniería). <http://hdl.handle.net/1992/45279>
- Omer, N. (2019). Water Quality Parameters. In J. K. Summers (Ed.), *Water Quality - Science, Assessments and Policy*. IntechOpen. 10.5772/intechopen.89657
- Ortiz-Quintero, L. F. (2021). *Cuencas hidrográficas y ecología del paisaje: una guía conceptual y metodológica* (Primera ed.). UD.
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C., Domínguez, I., Daza, M., Oviedo-Ocaña, R., Buytaert, W., & Ochoa-Tocachi, B. F. (2021). Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean paramos and its effect on streamflow buffering. *Catena*, *202*, 105227. 10.1016/j.catena.2021.105227
- Pinos-Morocho, D., Morales-Matute, O., & Durán-López, M. E. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador Paramo. *Revista De Ciencias Ambientales*, *55*, 157–179. 10.15359/rca.55-2.8
- Rey-Romero, D., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Effect of agricultural activities on surface water quality from paramo ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(55), 83169–83190. 10.1007/s11356-022-21709-6

- Silveira, H. M. (2020). Evaluación de huella de carbono y huella hídrica de cultivos bioenergéticos en Uruguay (Maestría).
- Trujillo, A. R., Barroso, F. U., & Escobar, Y. C. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* (1st ed.). Universidad del Valle. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt1rfsqf5>
- Zapata, A., Rivera-Rondón, C. A., Valoyes, D., Muñoz-López, C. L., Mejía-Rocha, M., & Catalan, J. (2021). Paramo Lakes of Colombia: An Overview of Their Geographical Distribution and Physicochemical Characteristics. *Water*, 13(16)10.3390/w13162175
- Zapata-Jiménez, J. A., Sarmiento-Pinzón, C. E. y Rivera-Muñoz, A. B. (2022). *Entre Páramos. ¿En qué estamos con los páramos en el siglo XXI?* Ecological Carbon Offset Partners Suc. Colombia. Proyecto Modelos innovadores de conservación, Programa Páramos y Bosques de USAID. Bogotá.

## Apéndices

### Apéndice A.

*Toma de muestras de agua.*



**Apéndice B.**

*Envasado de muestras de agua para análisis de laboratorio.*



**Apéndice C.**

*Medición de parámetros pH y temperatura in situ.*



**Apéndice D.**

*Suministro de reactivos para conservación de la muestra.*



**Apéndice E.**

*Medición de ancho en parte baja en microcuenca Laguna Grande.*



**Apéndice F.**

*Cuerpos de agua y vegetación acuática.*



**Apéndice G.**

*Coberturas de herbazal denso, cuerpo de agua y afloramiento rocoso.*



**Apéndice H.**

*Panorámica de la microcuenca Listará*



**Apéndice I.**

*Frailejonal*

