

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA FITOPLANCTÓNICA A
PARTIR DE LA MEDICIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN TRES LAGUNAS DEL
SISTEMA LACUSTRE DE CHINGAZA**

**LINDA XIMENA ROBAYO MARTINEZ
CAMILO ANDRES RODRIGUEZ LEÓN**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ
2015**

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA FITOPLANCTÓNICA A
PARTIR DE LA MEDICIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN TRES LAGUNAS DEL
SISTEMA LACUSTRE DE CHINGAZA**

**LINDA XIMENA ROBAYO MARTINEZ
CAMILO ANDRES RODRIGUEZ LEÓN**

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Ambientales

**Directora
LILIANA SALAZAR LÓPEZ
Bióloga M.Sc.**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ
2015**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

CONTENIDO

1. RESUMEN	9
2. INTRODUCCIÓN	10
3. OBJETIVOS.....	12
3.1 GENERAL.....	12
3.2 ESPECIFICOS.....	12
4. MARCO DE REFERENCIA.....	13
4.1 MARCO CONTEXTUAL	13
4.1.1 Humedales.	13
4.1.2. Bienes y servicios ecosistémicos prestados por humedales.	14
4.1.3 Lagunas de alta montaña.	16
4.1.4 Descripción del área.....	16
4.2. MARCO TEORICO	20
4.2.1 Ciclo del carbono.....	20
4.2.1 Oxígeno.....	22
4.2.2 Oxígeno y dióxido de carbono.....	23
4.2.3 Fitoplancton.....	24
4.2.4 Productividad primaria.....	24
4.3. MARCO INSTITUCIONAL	26
4.3.1 Parque Nacional Natural Chingaza.	26
4.3.2 Convenio Universidad Santo Tomás.	26
4.4. MARCO LEGAL.....	26
5. METODOLOGÍA	28
5.1 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	29
5.2 RECONOCIMIENTO GENERAL DE CAMPO	29
5.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	30
5.3.1 Número de muestras y estaciones de muestreo en las lagunas.	30
5.3.2 Elección de variables físicas y químicas.	32
5.3.3 Métodos para la determinación de la productividad primaria.	33
5.3.4 Método de botella clara y oscura.....	33
5.3.5 Método de Clorofila a.	34
5.3.6 Registro y seguimiento de muestras.	35

5.4 TRABAJO DE CAMPO	35
5.4.1 Medición de parámetros fisicoquímicos.....	36
5.4.2 Toma de muestras de clorofila a.	36
5.4.3 Método botella clara y oscura.....	37
5.5 TRABAJO DE LABORATORIO	37
5.5.1 Procedimiento para el análisis de muestras de clorofila a.....	37
5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
5.6.1 Análisis estadístico Modelos en SPSS.....	38
5.6.2 Definición del estado trófico de las lagunas.	39
6. PRODUCTIVIDAD PRIMARIA PARA EL SISTEMA LACUSTRE CHINGAZA...	40
6.1 LAGUNA DEL ARNICAL	40
6.1.1 Clorofila a.	41
6.2 LAGUNA EL MEDIO	43
6.2.1 Clorofila a.	45
6.3 LAGUNA CHINGAZA	46
6.3.1 Clorofila a.	48
6.4 COMPARACIÓN DE LA PPN ENTRE LAS TRES LAGUNAS	49
7. INFLUENCIA ALTITUDINAL EN LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA.....	53
8. RELACIÓN DINÁMICA ENTRE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA CON RESPECTO A LA TASA FOTOSINTÉTICA ENTRE LAS TRES LAGUNAS.....	55
8.1 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	55
8.1.1 pH.....	55
8.1.2 Temperatura.	57
8.1.3 Oxígeno disuelto.....	58
8.1.4 Conductividad.....	60
8.1.5 Potencial redox.....	61
8.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	63
8.2.1 Laguna del Arnical.....	63
8.2.2 Laguna El Medio.	67
8.2.3 Laguna Chingaza.	71
8.2.4 Análisis integral.	74
9. SERVICIOS AMBIENTALES	80

9.1 SERVICIOS DE APROVISIONAMIENTO.....	80
9.2 SERVICIOS DE REGULACIÓN.....	81
9.3 SERVICIOS DE APOYO	82
9.4 SERVICIOS CULTURALES Y RECREATIVOS.....	82
9.4.1 Ecoturismo de aventura.....	82
9.4.2 Ecoturismo naturalista.	82
9.4.3 Ecoturismo educativo.	83
9.5 PRODUCTIVIDAD PRIMARIA COMO SERVICIO ECOSISTÉMICO	83
10. CONCLUSIONES	84
11. RECOMENDACIONES	86
12. GLOSARIO	87
13. BIBLIOGRAFIA	89
ANEXO A.....	94
ANEXO B.....	96

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Importancia de parámetros físico-químicos en las lagunas.	32
Tabla 2 Clasificación del grado de eutrofia en lagos y embalses.	39
Tabla 3 Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua.	39
Tabla 4 Correlación de Spearman entre PPN y clorofila a para la laguna del Arnical.	43
Tabla 5 Correlación de Spearman entre PPN y clorofila a para la laguna El Medio.	46
Tabla 9 Correlación de Spearman entre PPN y clorofila a para la laguna Chingaza.	49
Tabla 10 Estadísticos descriptivos de productividad para las tres lagunas.	50
Tabla 11 Correlaciones entre la PPN y la clorofila a con la altitud de las lagunas.	53
Tabla 12 Coeficientes de correlación de Spearman.	54
Tabla 13 Comunalidades del ACP para laguna del Arnical.	63
Tabla 14 Varianza explicada para el ACP de laguna del Arnical.	63
Tabla 15 Matriz de componentes para la laguna del Arnical.	64
Tabla 16 Comunalidades del ACP para laguna El Medio.	67
Tabla 17 Varianza explicada para el ACP de la laguna El Medio.	68
Tabla 18 Matriz de componentes para la laguna El Medio.	68
Tabla 19 Comunalidades del ACP para la laguna Chingaza.	71
Tabla 20 Varianza explicada para el ACP de laguna Chingaza.	72
Tabla 21 Matriz de componentes para laguna Chingaza.	73
Tabla 22 Comunalidades del ACP integral.	75
Tabla 23 Varianza explicada para el ACP integral.	76
Tabla 24 Matriz de componentes rotados de las tres lagunas.	77

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de ubicación geográfica del PNN Chingaza.	17
Ilustración 2 Ubicación de las tres lagunas en el PNN Chingaza.....	18
Ilustración 3 Fotografías de las lagunas.	18
Ilustración 4 . Distribución de las precipitaciones medias multianuales durante el año para la estación Chuza.	19
Ilustración 5 Diagrama de metodología para la investigación.	28
Ilustración 6. Mapa de la laguna de Chingaza con las estaciones de muestreo	31
Ilustración 7. Mapa de la laguna del Arnical con las estaciones de muestreo	31
Ilustración 8. Mapa de la laguna El Medio con las estaciones de muestreo	32
Ilustración 9 Medición de parámetros físico-químicos.	36
Ilustración 10 Fotografía tomada al realizar la filtración para clorofila a.	37
Ilustración 11 Trabajo en laboratorio del análisis de las muestras de clorofila a. ...	38
Ilustración 12 Gráfica de PPN para laguna del Arnical.	41
Ilustración 13 Gráfica de concentración de clorofila a para laguna del Arnical.	42
Ilustración 14 Gráfica de PPN para laguna El Medio.	44
Ilustración 15 Gráfica de concentración de clorofila a para la laguna El Medio.	45
Ilustración 16 Gráfico de PPN para laguna Chingaza.....	47
Ilustración 17 Gráfico de la concentración de clorofila a para laguna Chingaza. ...	48
Ilustración 18 Eficiencia fotosintética en los tres sistemas lagunares.	51
Ilustración 19. Gráfica de pH para las tres lagunas por muestreo.	55
Ilustración 20. Gráfica de temperatura para las tres lagunas por muestreo.....	57
Ilustración 21. Gráficas de Oxígeno Disuelto para las tres lagunas por muestreo.	59
Ilustración 22. Gráfica de conductividad para las tres lagunas por muestreo.	60
Ilustración 23. Gráfica de Potencial Redox para las tres lagunas por muestreo. ...	62
Ilustración 24 Gráfico de sedimentación para el ACP de laguna del Arnical.	65
Ilustración 25 Gráfico Biplot para laguna del Arnical.....	66
Ilustración 26 Gráfico de sedimentación para el ACP de laguna El Medio.	69
Ilustración 27 Gráfico Biplot de la laguna El Medio.	70
Ilustración 28 Gráfico de sedimentación para laguna Chingaza.	72
Ilustración 29 Gráfico Biplot para laguna Chingaza.	74
Ilustración 30 Gráfico de sedimentación para las tres lagunas.	76
Ilustración 31 Gráfico Biplot para las tres lagunas.	78

1. RESUMEN

En el sistema lacustre Chingaza se seleccionaron tres lagunas (Arnical, El Medio, Chingaza) que hacen parte de la zona Ramsar del Parque Nacional Natural Chingaza y la subcuenca río Frío; se realizaron muestreos en época seca y época de lluvias con el objetivo de determinar la productividad primaria por medio del método botella clara – botella oscura, se tomaron muestras de clorofila *a* y se midieron parámetros físico-químicos (temperatura, pH, potencial redox, oxígeno disuelto y conductividad) para establecer un modelo que permita diferenciar el metabolismo de las lagunas.

Por medio de las concentraciones de clorofila *a* se estableció a partir del Índice de Carlson y la metodología para evaluar el grado de eutrofia de ecosistemas de lagos y embalses desarrollada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico que los tres sistemas son mesotróficos, lo cual indica niveles de productividad más altos a los esperados para lagunas de alta montaña y un potencial ecológico moderado; igualmente se identificó la fuerte relación entre la laguna El Medio y la laguna Chingaza en cuando a las concentraciones de clorofila *a*. Es importante mencionar que las diferencias entre estas lagunas se evidenciaron en el Análisis de Componentes Principales donde el potencial redox es la variable físico-química que mejor se ajustó a los principales componentes.

Para finalizar se identificaron los servicios ambientales prestados por el área de estudio por medio de los lineamientos para valorar los beneficios derivados de los servicios de los ecosistemas de humedales, entre los cuales se reconocen el abastecimiento de agua potable a las poblaciones aledañas y el 80% del Distrito Capital, así como hábitat para la biodiversidad, eco-turismo, regulación climática, control de inundaciones y el más importante que es la fijación de energía por medio de la fotosíntesis.

Palabras Clave: Productividad primaria, mesotrófico, clorofila *a*, servicios ecosistémicos, fotosíntesis.

2. INTRODUCCIÓN

La importancia del Parque Nacional Natural Chingaza radica en la cantidad de servicios ambientales que genera por ser un ecosistema de páramo, su principal función es el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Bogotá D.C y algunos municipios de Cundinamarca; presenta un sistema lacustre al cual pertenecen lagunas que fueron incluidas en la lista de Humedales de Importancia Internacional, en cumplimiento de la Ley 357 de 1997, por lo que hacen parte de la zona RAMSAR del parque de la cual se eligieron tres lagunas para ser estudiadas: el Arnical, El Medio y Chingaza, que se encuentran dentro de la subcuenca de Río Frio .

La evaluación de la productividad primaria fitoplanctónica en las tres lagunas se desarrolló por medio de la medición de oxígeno disuelto, el método de botella clara y botella oscura, por otra parte se determinó la biomasa fitoplanctónica midiendo las concentraciones de clorofila *a* y con ayuda de una sonda multiparamétrica se determinaron las condiciones fisicoquímicas (pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y potencial redox) en cada laguna. Se realizaron cinco muestreos de los cuales se hicieron dos en épocas de lluvias y tres en época seca lo que permitió evidenciar la variabilidad de las condiciones con respecto al factor climático.

Los resultados fueron analizados inicialmente con estadística descriptiva que permitió determinar el comportamiento de la productividad primaria y los parámetros fisicoquímicos, además se determinó por medio de la concentración de clorofila *a* y aplicando el índice de Carlson y la metodología de la OCDE para evaluar el grado de eutrofia de ecosistemas de lagos y embalses, que las tres lagunas presentan un nivel mesotrófico; por lo anterior se debe realizar un seguimiento mensual al comportamiento de estos cuerpos de agua ya que por sus condiciones de lagunas de alta montaña su nivel de eutrofia deberían ser sistemas oligotróficos. Por otra parte se estableció la influencia de la variación altitudinal en la productividad de cada laguna, factor que se evaluó por medio de una correlación de Spearman y donde se pudo determinar que esta no es una variable significativa que incida en la productividad primaria y biomasa fitoplanctónica.

Por medio del Análisis de Componentes Principales se evaluó y se determinó la influencia de las condiciones fisicoquímicas de las lagunas con la productividad primaria y la biomasa fitoplanctónica, donde se pudo establecer si las condiciones explicaban o no el funcionamiento de cada laguna y el sistema en general, y donde finalmente se pudo concluir que el potencial redox es la variable principal y más significativa que explica el comportamiento de estos sistemas. Por último, se identificó por medio de los lineamientos para valorar los beneficios derivados de los servicios de los ecosistemas de humedales desarrollado por Ramsar, además de las visitas realizadas y asistencia a reuniones con personal del parque, que el PNN Chingaza presta servicios ambientales como el abastecimiento de agua

potable, hábitat para la biodiversidad, regulación climática, control de inundaciones y fijación de energía por medio de actividad fotosintética, debido a esto se deben continuar investigaciones en el parque por la importancia de los estudios de ecosistemas de páramo en Colombia como fortaleza para el desarrollo de estrategias de conservación.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Evaluar la productividad primaria del fitoplancton por medio de la medición del oxígeno disuelto en tres lagunas del Parque Nacional Natural Chingaza estableciendo la oferta de servicios ecosistémicos en torno a la conservación de éste sistema lacustre.

3.2 ESPECIFICOS

- Determinar la productividad primaria aportada por la fotosíntesis algal en las tres lagunas.
- Analizar la incidencia de la variación altitudinal en la producción de oxígeno y consumo de CO₂ entre las tres lagunas a estudiar.
- Realizar un modelo que permita predecir la relación dinámica entre los parámetros físico-químicos del agua con respecto a la tasa fotosintética entre las tres lagunas.
- Identificar los servicios ecosistémicos que prestan las lagunas por ser de alta montaña.

4. MARCO DE REFERENCIA

El consumo mundial de agua dulce aumentó seis veces entre 1900 y 1995 (teniendo en cuenta que es más del doble del índice de aumento poblacional). Actualmente, hay un grupo de países que albergan un tercio de la población y que experimentan estrés por déficit hídrico, extrapolarlo dicha información, para el 2025, dos de cada tres habitantes de la Tierra vivirán en condiciones de estrés por déficit hídrico [1].

Por la gran variedad de regímenes climáticos, su ubicación geográfica y relieve, Colombia es uno de los países que contiene mayor riqueza con respecto a recursos hídricos a nivel mundial; pero teniendo en cuenta que la mayor densidad poblacional y las actividades socioeconómicas que requieren mayor demanda del recurso se encuentran ubicadas en las regiones con baja oferta hídrica, el aumento de impactos de origen antropogénico sobre el agua y la insatisfacción de necesidades hídricas de los ecosistemas influyen en la disminución progresiva de la disponibilidad del recurso hídrico [2].

El PNN Chingaza es una de las reservas más importantes de los andes colombianos debido a que por su ubicación, se encuentra en un ecosistema de páramo, el cual presta una gama de servicios ambientales pues en él se desarrollan comunidades biológicas importantes y un factor potencial de sostenimiento y producción de agua para abastecer la ciudad de Bogotá [3]. A partir del decreto 233 del 30 de enero de 2008, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial designa el humedal Chingaza como de importancia internacional, conforme a la ley 357 del 21 de enero de 1997 donde el Congreso de la República de Colombia autorizó los acuerdos realizados en la “Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas” realizada en Ramsar el 2 de febrero de 1971 [4].

4.1 MARCO CONTEXTUAL

4.1.1 Humedales.

Los humedales son aquellos ecosistemas donde el principal factor controlador del medio (junto con la fauna y flora asociada) es el agua. Estos, se dan cuando la capa del nivel freático se halla en la superficie terrestre o cerca de ella, así como en las zonas donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas [1].

En la convención relativa a los humedales de importancia internacional realizada en 1971 en Ramsar, Irán se definieron los humedales como:

“Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres

o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” [5].

La conservación de los humedales tiene gran prioridad debido a que están entre los ecosistemas más productivos del mundo; esto debido a que contienen gran diversidad biológica, son fuentes de agua y en éstos se origina la productividad primaria de la cual innumerables especies vegetales y animales dependen; así mismo, contribuyen al sostenimiento de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados [1].

A pesar de los inadecuados usos que se le han dado a los humedales, en la actualidad se consideran como uno de los ecosistemas más importantes y estratégicos del planeta por los bienes y servicios que prestan, además de cumplir con funciones ecológicas fundamentales para el hombre como la regulación de los regímenes hidrológicos y provisión de recursos [6], así como sus funciones de mitigación de impactos por inundaciones, absorción de contaminantes, retención de sedimentos, recarga de acuíferos y provisión de hábitats para las especies [7].

De acuerdo con el decreto 233 del 2008, se designó como humedal idóneo para incluir en la Lista de Humedales de Importancia Internacional, al Sistema Lacustre de Chingaza, localizado en el Municipio de Fómeque (Cundinamarca), al interior del PNN Chingaza, subcuenca del río frío, con un área aproximada de 4.058 Ha y con una altura media de 3.500 msnm. Los principales humedales que conforman el Sistema Lacustre de Chingaza son: Laguna Chingaza, Laguna El Medio, Laguna del Arnical, Laguna Alto del Gorro, Laguna Las Encadenadas, Laguna Fría, Laguna Regadas y Laguna El Alumbre [4].

Esta selección se debe a que por su extensión y cobertura, el Sistema Lacustre de Chingaza es un eje de la regulación del clima, igualmente, es fundamental para el funcionamiento hidrológico regional por la regulación de caudales y es básico para el desarrollo de la subcuenca del río Frío, su principal afluente. Del mismo modo, éste sistema se encuentra en una de las regiones de montaña más húmedas del país, y sus páramos y humedales son centros de endemismo, donde además se refugian aproximadamente 500 especies de fauna y 400 especies de flora, de las cuales varias se encuentran en vía de extinción. Hay que mencionar, además, el reconocimiento del área por ser hábitat de especies de aves migratorias (norte-sur) y simultáneamente es uno de los refugios de fauna más importantes del norte de los Andes Colombianos [4].

4.1.2. Bienes y servicios ecosistémicos prestados por humedales.

Los humedales a lo largo de la historia de la humanidad han sido indispensables para el desarrollo de la vida siendo utilizados para un gran número de actividades como la agricultura, la ganadería, la industria, asentamientos, entre otras; dichas actividades han contribuido a la degradación de estos ecosistemas con el único propósito de realizar un uso excesivo de los recursos para obtener beneficios

económicos que no cubren ni una cuarta parte del valor que representa un humedal para la sociedad y el medio ambiente. A pesar de los inadecuados usos que se le han dado a los humedales, en la actualidad se consideran uno de los ecosistemas más importantes y estratégicos del planeta por la cantidad de bienes y servicios que prestan [6] [8].

Son gran cantidad los bienes y servicios prestados por los humedales además de valiosos, sin embargo no aplican para todos los ecosistemas ya que lo hacen en función de su clase, tamaño y ubicación [8]. Los humedales cumplen funciones ecológicas fundamentales para el hombre como la regulación de los regímenes hidrológicos y provisión de recursos [6]. Los bienes y servicios más importantes que prestan los humedales de alta montaña son:

4.1.2.1 Abastecimiento. Considerado como uno de los más importantes servicios que prestan los ecosistemas debido a que en muchas ocasiones son utilizados para abastecer comunidades enteras, incluso grandes ciudades; por tanto aumenta considerablemente la preocupación por su conservación ya que puede generar graves problemas de escases y calidad del agua si es afectada por actividades antropogénicas [6].

4.1.2.2 Control de inundaciones. Los humedales pueden ser ralentizadores de las aguas de escorrentía superficial causadas por altas precipitaciones, impidiendo que se produzcan crecidas repentinas que puedan afectar el medio donde se encuentran, este proceso se lleva a cabo gracias a las turberas y pastizales húmedos que actúan como esponjas absorbiendo grandes cantidades de agua lo que permite que su filtración sea más lenta, reduciendo la velocidad y volumen de agua que entra a los ríos; otro mecanismo que utilizan son la llanuras de inundación que actúan como depósitos de almacenamiento reduciendo la profundidad y velocidad de las aguas de escorrentía [8].

4.1.2.3 Reservorios de biodiversidad. Los humedales pertenecen a los ecosistemas con mayor biodiversidad, contienen gran número de especies de plantas y animales que dependen completamente de ellos y con la protección de estos ecosistemas se benefician por ejemplo especies endémicas importantes [8].

4.1.2.4 Turismo y recreación. Además de las funciones ecológicas y las anteriormente mencionadas los humedales por su diversidad animal y sus grandiosos paisajes representan un atractivo para usos recreativos y de ecoturismo, lo que genera ingresos que benefician a las comunidades y contribuyen a los programas y actividades de protección y manejo sostenible de estos ecosistemas [8].

4.1.2.5 Retención de carbono. Una de las funciones principales de los ecosistemas es la retención de carbono ya que la materia orgánica que se encuentra en los humedales se descompone acumulándose en los suelos o la vegetación, causando un efecto importante frente al calentamiento global [6].

4.1.3 Lagunas de alta montaña.

Los lagos y lagunas de alta montaña hacen parte de complejos ecosistemas con características particulares sometidos a rigurosas condiciones climáticas las cuales afectan directamente las aguas y sus diferentes comunidades, por tanto, estos ecosistemas son vulnerables y pueden presentar desequilibrio ecológico causado por cambios climáticos de la atmósfera o actividades antropogénicas causando la degradación de las cuencas a las que pertenecen, razón por la cual en Colombia la mayoría de lagunas de alta montaña se encuentran bajo protección en zonas de reserva natural [9] [10].

Los ecosistemas de alta montaña son de vital importancia en la producción de agua ya que hacen parte específicamente de los páramos, nacimiento de los principales recursos hídricos del mundo, debido a esto se introdujo el tema de conservación a nivel internacional en la agenda 21, en busca de la protección de estos ecosistemas y la cantidad de bienes y servicios que ofrecen [9].

Dentro de los ecosistemas de alta montaña se puede encontrar una clasificación por zonas de acuerdo a sus condiciones geográficas y ecológicas: superpáramo, paramo, subpáramo y alto andina; por otra parte, presentan características importantes con respecto a condiciones morfométricas, físico-químicas y de calidad; estos cuerpos de agua de alta montaña son de origen glaciar y generalmente son oligotróficos, con pH ácido, baja conductividad y alta transparencia debido a que son aguas no contaminadas [9] [11].

Debido a las condiciones climáticas extremas de los páramos que se encuentran en altitudes mayores a 3.000 msnm en el caso de Colombia y presenta propiedades como cuerpos de agua inundables, se pueden encontrar especies como la macrófitas y el fitoplancton que contribuyen a la productividad primaria de las lagunas [9] [11].

4.1.4 Descripción del área.

Este estudio se realizó en la zona Ramsar del sistema lacustre Chingaza; los muestreos que se realizaron se ejecutaron en la lagunas Chingaza, laguna El Medio y laguna del Arnical, las cuales hacen parte de la subcuenca del río frío y geográficamente están a diferentes alturas sobre el nivel mar, éstas representan extensos reservorios de agua con diversas áreas de espejo de agua; la laguna Chingaza, es la más extensa del estudio, tiene un área de 88 Ha y se encuentra a una altura de 3.250 msnm. Sus coordenadas son 4°31'40.43"N y 73°45'3.54"O. La laguna El Medio tiene un área de 5,25 hectáreas y se encuentra a 3.720 msnm. Sus coordenadas son 4°30'19.74"N y 73°44'22.18"O. Ahora bien, la última laguna y la más pequeña es la laguna del Arnical, cuyas coordenadas son 4°30'2.92"N y 73°46'14.98"O; está ubicada a 3.500 msnm y tiene un área de 2,5 Ha [12].

Para referenciar el PNN Chingaza se implementó el software ArcGIS 10.2 como una herramienta cartográfica que permitiera visualizar de manera precisa la

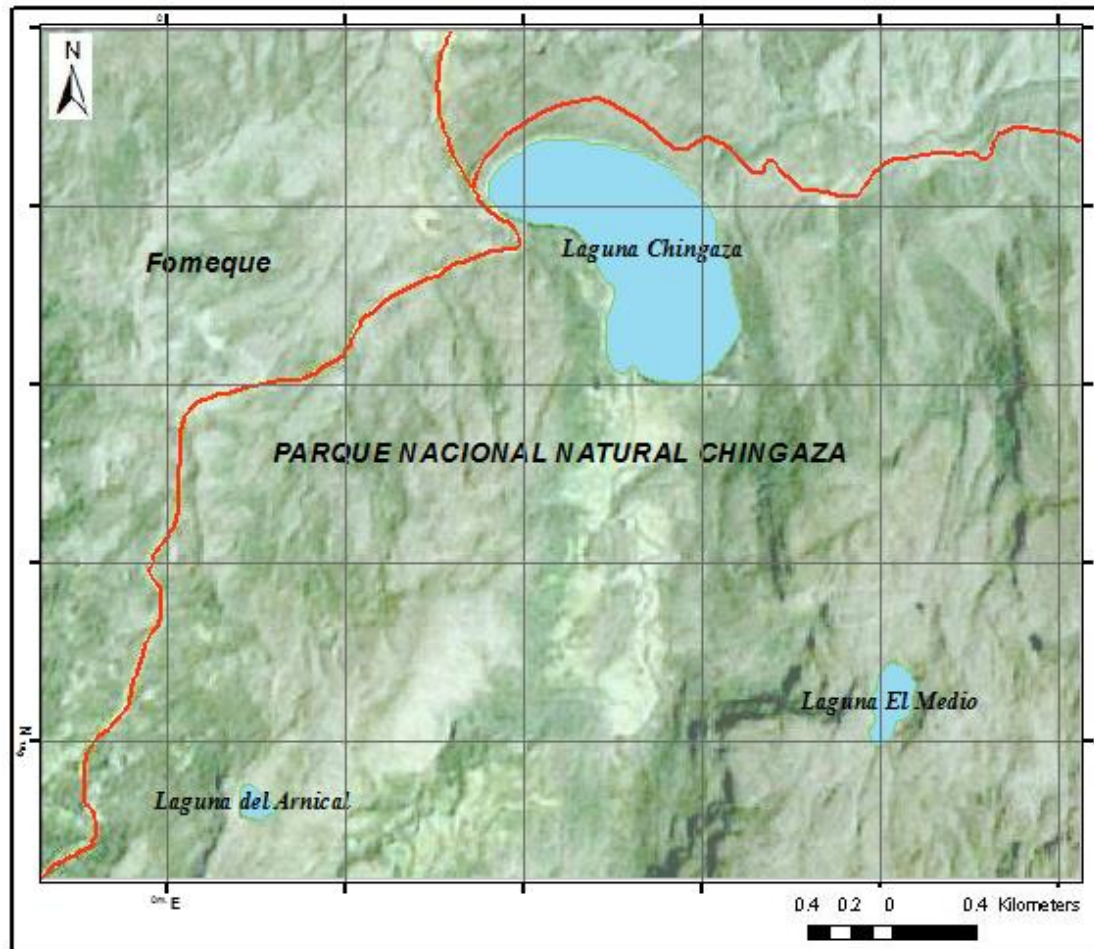
delimitación del parque y los municipios que comprende; para lo anterior se utilizaron como referencia las capas geográficas de municipios, cuerpos de agua, vías y áreas protegidas en formato shape (shp) que contiene el Sistema de información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial (SIG-OT); posteriormente se realizó la georreferenciación, digitalización de las capas mencionadas y se realizó una edición para finalmente obtener los siguientes mapas:

Ilustración 1. Mapa de ubicación geográfica del PNN Chingaza.



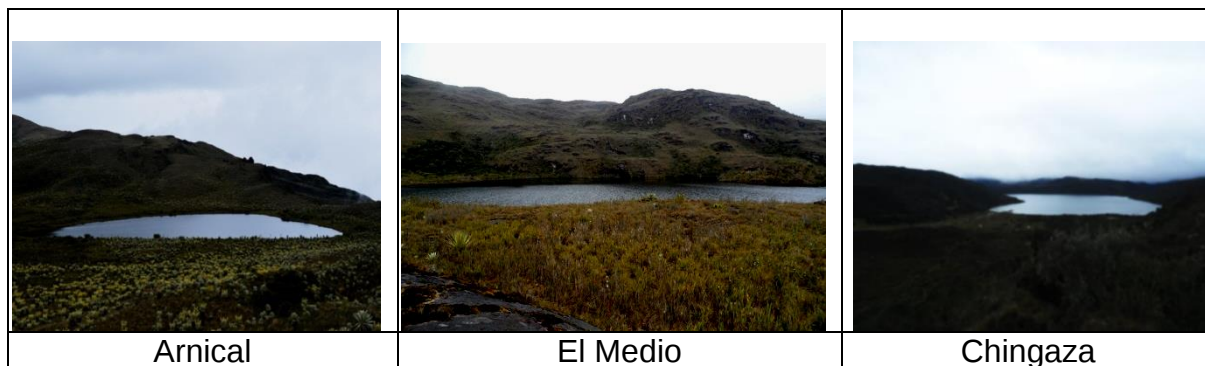
Fuente: Los Autores.

Ilustración 2 Ubicación de las tres lagunas en el PNN Chingaza.



Fuente: Los autores.

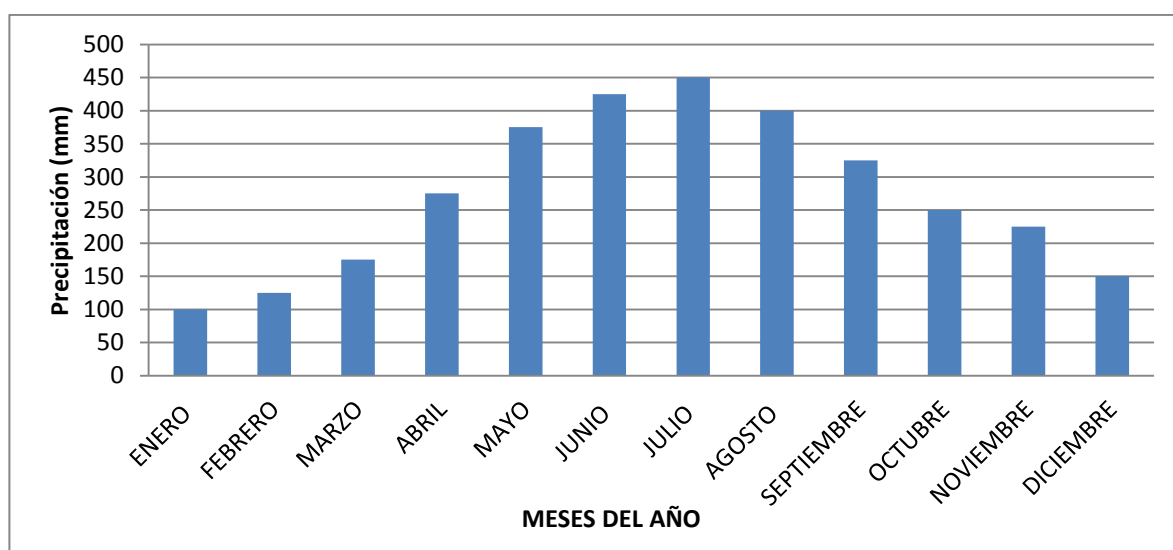
Ilustración 3 Fotografías de las lagunas.



Fuente: Los autores.

El clima de la zona está determinado por la influencia de los vientos alisios del sureste, que produce un régimen de precipitaciones unimodal, con un solo periodo de lluvias entre mayo y agosto, y otro relativamente seco entre diciembre y febrero. La temperatura promedio de la zona fluctúa entre 7-10°C y el periodo de lluvias puede durar hasta 8 meses continuos de abril a noviembre. La humedad del ambiente es alta para toda la zona y durante todo el año se mantiene entre 85-90%. La evaporación es de 500-600 mm anuales; los valores más altos están entre el 40-50% del total de la evaporación anual y se presentan de diciembre a febrero (meses con mayor temperatura) [13].

Ilustración 4 . Distribución de las precipitaciones medias multianuales durante el año para la estación Chuza.



Fuente: [13].

La unión de los ríos Chuza, La playa y río Frío generan el río Guatiquía, el cual es el sistema hidrográfico al que pertenecen las lagunas de estudio. Estas lagunas son oligotróficas; sin embargo, en épocas de mayor pluviosidad se recibe material alóctono que genera un incremento en la concentración de nutrientes de las lagunas [13].

4.1.4.1 Suelo. La influencia glaciaria es uno de los factores principales que hay que tener en cuenta para entender la formación de los suelos del área de estudio además del clima, los organismos, el material parental, relieve y tiempo. Todos estos agentes, en diferentes grados hacen que los suelos del páramo de Chingaza sean ácidos, que tengan baja saturación de bases, pobres en sílice, ricos en aluminio, con alta capacidad de absorción del agua y con un alto dominio de arcillas. Debido a que la temperatura de la zona llega a caer por debajo de los 0°C, se dan procesos erosivos y de escurrimiento donde se dan desplazamientos masivos y lentos de formaciones arcillosas debido a la gravedad (solifluxión), aquí

es donde el relieve junto con las unidades geomorfológicas contribuye en la formación de los suelos de páramo [13].

4.1.4.2 Flora. Según el Plan de Manejo del PNN Chingaza (2006), se tuvo que realizar un estudio con el fin de identificar la flora de la región; como consecuencia de esto, se reconocieron 168 familias, 403 géneros y 885 especies entre los grupos de plantas vasculares, no vasculares, líquenes, hepáticas, musgos, helechos, gimnospermas y angiospermas. De estas especies identificadas, cinco especies tienen distribución restringida, es decir, son endémicas (*Espeletia uribei*, *Pasiflora cuatrecasaii*, *Breutelia maegdefraui*, *Pentacalia axillariflora* y *Tillandia sp.nov.*). Específicamente, en la zona de estudio, se identifica la presencia de vegetación abierta de pequeños árboles y arbustos más o menos aislados donde se puede observar la mezcla de elementos procedentes del bosque junto con los del páramo; ahora bien, asociadas a varias comunidades de vegetación nativa de la zona, existen especies de *Sphangnum* (musgo de pantano) que contribuyen en gran medida en la conservación de éstas zonas de humedales debido a que pueden absorber hasta 40 veces su peso en agua [13].

4.1.4.3 Fauna. El parque alberga especies que se encuentran en vía de extinción entre las cuales se encuentra el oso de anteojos (*Tremarctos ornatus*), la danta de páramo (*Agoutti taczanowskii*), el gallito de roca (*Rupicola peruviana*) y el puma (*Felix concolor*), entre otras. Así mismo, la zona posee alta presencia de especies con alta tolerancia ambiental, como el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), y el cusumbo (*Nasua nasua*). Con respecto a la herpetofauna, se han identificado 16 especies de anfibios y 6 de reptiles, entre los cuales, se encuentran dos especies endémicas (*Atelopus muisca* y *Atelopus lozanoi*). Al mismo tiempo, la avifauna se encuentra representada por la distribución de 196 especies distribuidas en 38 familias, entre las que se destacan *Penelope montagnii*, *Chamaepetes goudotii*, *Aulacorhynchus prasinus* y *Andigena nigrirostris* [13].

4.1.4.4 Aspectos político administrativos. La zona seleccionada para este estudio hace parte de la jurisdicción del municipio de Fómeque (Cundinamarca), el cual está localizado al oriente del departamento de Cundinamarca, en el costado occidental del PNN Chingaza; hace parte de la vertiente hidrográfica del Orinoco. Su superficie es de 55.565 Ha, de las cuales 27.148 están declaradas como Parque Nacional, aproximadamente el 49% de su área total [13].

4.2. MARCO TEORICO

4.2.1 Ciclo del carbono.

Las formas de carbono más importantes en los ecosistemas acuáticos son el carbono inorgánico disuelto (CID), carbono orgánico disuelto (COD) y carbono orgánico particulado (COP). El CID consiste en el dióxido de carbono, bicarbonatos y carbonatos; los cambios entre estas formas están indirectamente afectados por el pH, la fotosíntesis y la actividad respiratoria de los organismos

acuáticos. EL COD es la mezcla de varias sustancias, los reactivos biológicos, los compuestos de bajos pesos moleculares y las sustancias húmicas de alto peso molecular; además, tiene entradas alóctonas, que son la fuente más importante de COD debido a la secreción y excreción de organismos de todos los niveles tróficos. La fuente principal de producción de COP consiste en el carbono que se encuentra en los organismos y el detritus; los cambios en este se producen debido a la muerte, alimentación y el parasitismo. El COP puede ser transformado en CID por medio de la respiración y en COD por medio de la secreción, excreción y autólisis [14].

4.2.1.1. Carbono orgánico.

Una de las características generales frente a la distribución y las transformaciones del carbono orgánico en los ecosistemas acuáticos indican que este se encuentra en mayores proporciones de forma soluble. Con respecto al COP existen tres fuentes principales: una fuente alóctona, una procedente de la zona litoral y otra de la zona pelágica. Los aportes alóctonos realizados desde la cuenca que drena el lago y lo que se exporta del mismo tiene forma de COD y es el flujo más alto de carbono que tiene el lago. El origen bioquímico del COD presente en los ecosistemas acuáticos debe principalmente a la actividad fotosintética [15].

La microflora controla el movimiento del carbono dentro de los límites de las condiciones ambientales que se encuentran en constante variación por medio de una serie de reacciones que oscilan simultáneamente; estas fuentes de materia orgánica se acoplan a las composiciones de los sustratos orgánicos, las pérdidas por consumo animal y la sedimentación. Es importante, tener en cuenta la relación del carbono orgánico del sistema con respecto al nitrógeno, debido a que el contenido del último disminuye con el aumento del COD si aumenta la proporción de materia orgánica alóctona con respecto a la autóctona, pues la materia orgánica disuelta de origen alóctono contiene bajos porcentajes de nitrógeno, contrario a la producida autóctonamente dentro del lago ya que las algas tienen un contenido de nitrógeno mucho más alto [15].

Dentro de un lago, las fuentes autóctonas de materia orgánica se encuentran en la zona litoral debido a la secreción y autólisis de la microflora, en la zona pelágica están los productores primarios donde sobresale el fitoplancton. Ahora bien, con respecto a las fuentes alóctonas de materia orgánica, se encuentra que éstas son de origen terrestre, resultado de la producción fotosintética [15].

4.2.1.2 Carbono inorgánico.

El carbono en los sistemas de aguas continentales se encuentra de tres formas, principalmente en productos en equilibrio con el ácido carbónico, en menor proporción aparece formando parte de compuestos orgánicos (carbono detrítico disuelto y particulado) y finalmente una pequeña parte que se encuentra en los seres vivos en forma de carbono. La representación de las reacciones de equilibrio y distribución de las formas del CO_2 se expresa como [15]:

$$\Sigma \text{CO}_2 = \text{CO}_2 + \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 \quad (1)$$

En las zonas abiertas y aireadas de los lagos el intercambio de CO_2 entre agua y atmósfera es rápido y completo pero la distribución espacial y temporal de este es alterada por el metabolismo microbiano en las zonas estratificadas de los lagos y por la fotosíntesis en las zonas no turbulentas del área litoral. El carbono inorgánico presente en estas aguas compone uno de los principales nutrientes del metabolismo de las algas y micrófitos en su proceso de fotosíntesis [15].

Los valores de pH en las aguas dulces permiten identificar la forma de carbono que se puede encontrar, así entonces si el pH es inferior o igual a 5 domina el CO_2 libre, si es mayor a 9.5 aparece el $\text{CO}_3^{=}$ significativamente y a valores entre 7 y 9 predomina el HCO_3^- ; por tanto, se puede concluir que la concentración de carbono dependerá de los valores de pH en el agua, el cual será determinado por reacciones del ácido carbónico y la cantidad de carbonato y bicarbonato que proceden de la meteorización de rocas, para el caso de las aguas dulces el carbonato más importante es el CaCO_3 en forma de calcita o polifórmo, y si se éste encuentra presente la solubilidad del CO_2 aumenta, pero en caso que el CO_2 se pierda por diversas razones, como por ejemplo la fotosíntesis de la flora litoral y del fitoplancton, el CaCO_3 se precipita en grandes cantidades hasta que se restablezca el equilibrio mediante la formación de CO_2 [15].

4.2.1 Oxígeno.

El oxígeno disuelto es esencial para el metabolismo de todos los organismos acuáticos que presentan una respiración de tipo aerobio y la distribución de éste en las lagunas es esencial para comprender el comportamiento de los organismos que habitan en este ecosistema. Los aportes de oxígeno disuelto procedentes de la atmósfera y los procesos fotosintéticos además de la distribución del oxígeno en el agua son compensados por el metabolismo de consumo que aportan los organismos. En consecuencia, la proporción bajo la cual se usa el oxígeno con respecto a su síntesis permite una evaluación del metabolismo del lago como un todo [15].

La distribución del oxígeno en un lago influye significativamente sobre la solubilidad de muchos nutrientes inorgánicos y los cambios de accesibilidad de nutrientes están regulados por las variaciones entre los ambientes aerobios y anaerobios de un lago. Ahora bien, si los cambios de disponibilidad de nutrientes regulados por el oxígeno se prolongan durante largos periodos de tiempo, la productividad del lago puede ser alterada y mantenerse así [15].

Con respecto a los parámetros que influyen en la solubilidad del oxígeno en el agua, se encuentra la temperatura que lo influye de forma no lineal, es decir, la solubilidad del oxígeno aumenta considerablemente cuando la temperatura del agua disminuye. Ahora bien, la presión también es un factor que influye en la solubilidad de los gases en el agua, es por esto, que el equilibrio del oxígeno

atmosférico junto con la concentración del oxígeno en el agua dependen de la presión atmosférica y en consecuencia de la altitud de la superficie de la laguna; en consecuencia, la cantidad de gas que permanece disuelto en el agua está regida por la presión atmosférica a la cual están expuestos los cuerpos de agua a una altitud determinada, por las condiciones meteorológicas y por la presión hidrostática existente a una determinada profundidad [15].

El contenido de oxígeno en los lagos muy productivos o eutróficos (con gran cantidad de nutrientes y gran producción orgánica) se agota rápidamente, debido a los procesos oxidativos; la distribución resultante se denomina clinógrada. Ahora bien, cuando se habla de sistemas poco productivos u oligotróficos (pobre en nutrientes y con escasa producción orgánica), la concentración de oxígeno con respecto a la profundidad está ampliamente regulada [15], de ahí, que los sistemas oligotróficos experimenten pocas variaciones en la concentración de oxígeno con respecto a la profundidad y el tiempo [16].

4.2.2 Oxígeno y dióxido de carbono.

El oxígeno y el dióxido de carbono deben ser considerados simultáneamente en las lagunas debido a su cerrada interrelación en la fotosíntesis y respiración. El oxígeno participa en muchas reacciones químicas y biológicas importantes y el oxígeno disuelto es la variable que generalmente se mide en la limnología; éste es consumido continuamente en la respiración por organismos aerobios pero es producido únicamente por organismos fotosintéticos cuando existe la suficiente disponibilidad de luz y nutrientes. Cuando el oxígeno disminuye a bajos niveles, provoca un cambio en el estado de oxido-reducción (potencial redox) y en la solubilidad de muchos metales y algunos nutrientes. Ahora bien, El dióxido de carbono en el agua frecuentemente muestra una relación inversa con el oxígeno pues es producto de la respiración por organismos aerobios, respiración anaerobia de la materia orgánica, por la fermentación y también proporciona la principal fuente de carbono para la fotosíntesis. Comparado con el oxígeno, el CO_2 es 30 veces más soluble que el oxígeno en el agua y al disolverse puede producir ácido carbónico (H_2CO_3), que se disocia en diversas fracciones dependiendo del pH bajo el cual se encuentre [17].

El parámetro más influyente a la hora de regular las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono es la temperatura, pero sus niveles también dependen de la fotosíntesis, respiración de organismos aerobios, aireación del agua, presencia de otros gases y otras oxidaciones químicas que puedan ocurrir. La distribución de oxígeno y dióxido de carbono en los ecosistemas lénticos proporcionan una medida conveniente de la producción orgánica y la descomposición y forma la base de la mayoría de los métodos de medición de la productividad primaria [17].

La fotosíntesis produce oxígeno y consume dióxido de carbono, mientras que la respiración consume oxígeno y produce dióxido de carbono, en consecuencia, las concentraciones de ambos dependen de cuál sea el proceso que se esté desarrollando en el ecosistema. Los altos rangos de producción en el epilimnion

durante el día tienden a disminuir por la noche; Los niveles de dióxido de carbono disminuyen a medida que aumenta la producción de oxígeno, pero se suplementan en cierta medida por la reserva de bicarbonatos y carbonatos. La actividad fotosintética de las algas y las plantas superiores es junto con la atmósfera, una de las mayores fuentes de oxígeno en ecosistemas acuáticos; ahora bien, con respecto al dióxido de carbono, la respiración ocurre en todas las profundidades, tanto en el día como en la noche y junto con la atmósfera son las principales fuentes de CO₂ para éstos ecosistemas [17].

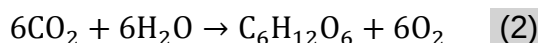
4.2.3 Fitoplancton.

Esta comunidad se concibe como las algas que están a merced de las corrientes en los lagos, lagunas y grandes ríos, éstas están constituidas por diversas especies que pertenecen al grupo de organismos fotosintéticos y tienen gran relevancia en la productividad primaria de los ecosistemas, y que además ocupan el primer eslabón en la cadena alimenticia de los ecosistemas acuáticos; éstas especies son relevantes para el metabolismo de los ecosistemas donde se desarrollan, cada una se caracteriza por tener requerimientos fisiológicos básicos que permiten y limitan su desarrollo, como la luz, la temperatura y los nutrientes orgánicos e inorgánicos disponibles, por otra parte, su crecimiento y control poblacional se ven influenciados por condiciones de competencia, depredación y parasitismo de las demás especies acuáticas [18] [19].

El fitoplancton es relevante en la productividad primaria de los ecosistemas, ya que representa la mayor síntesis de materia orgánica, especialmente en lagos de gran tamaño que la productividad usualmente representa el aporte principal de materia orgánica y energía potencial que rige el sistema [18].

4.2.4 Productividad primaria.

La productividad se define como la velocidad a la cual el carbono inorgánico se transforma en una forma orgánica mediante la actividad metabólica de los organismos portadores de clorofila. La reacción básica de la fotosíntesis involucra la captación de carbono inorgánico y la liberación de oxígeno molecular de acuerdo con la ecuación, por tanto, si se asume que por cada molécula de oxígeno liberada se asimila un átomo de carbono, la productividad primaria puede evaluarse mediante los cambios en la concentración de oxígeno [20]. En síntesis, la productividad hace referencia a la habilidad que tiene un organismo de cualquier nivel trófico para producir biomasa en un tiempo determinado, es decir, la productividad primaria es la materia orgánica que transforman los organismos autótrofos a partir del carbono inorgánico [21]. La fotosíntesis se desarrolla produciendo oxígeno y es la forma más importante a nivel biológico para la reducción de CO₂ presente en la atmósfera, lo cual se evidencia en la reacción química [15]:



Los nutrientes en el agua tienen gran importancia, ya que son limitantes de la productividad primaria, debido a que con aumentos en la concentración de fósforo, aumenta la biomasa de algas lo que produce mayor tasa fotosintética, del mismo modo sucede cuando se aumenta la cantidad de nitrógeno [21]. Las técnicas para medir las tasas fotosintéticas están basadas en la estequiometría de la reacción que se muestra en la ecuación 2, los rangos de producción de oxígeno, los rangos de uso de CO₂ en el agua, o los cambios en la concentración de materia orgánica. La técnica de las botellas claras y oscuras es adecuada para medir la tasa sintética del fitoplancton en el agua [22]. Ésta compara los cambios en la concentración de oxígeno que se presentan en fragmentos de la comunidad planctónica que han sido confinados en botellas claras, con aquellos que tienen lugar en botellas oscuras durante el mismo periodo [20].

Si se conoce la concentración de oxígeno al inicio de un experimento, cabe esperar que en la botella clara el oxígeno se incremente debido a la actividad fotosintética (aunque una parte del mismo es consumida por la respiración de las plantas y animales), mientras que en la botella oscura la concentración inicial sea abatida por la respiración de la comunidad [20].

4.2.4.1 Productividad primaria bruta. Es la velocidad de acumulación de materia orgánica producida por la fotosíntesis, es decir, es el total de energía fijada; para que este proceso se lleve a cabo es importante la luz que se absorbe, la cual es transformada en fotosintátos [15].

4.2.4.2 Productividad primaria neta. Es el total de biomasa que sobra después de que los organismos autótrofos suplan sus necesidades energéticas, es decir, es el restante que no fue utilizado en los procesos de respiración. Uno de los factores limitantes de la productividad primaria neta es la evapotranspiración, debido a que a mayor evapotranspiración, menor es ésta, del mismo modo se ve afectada por la precipitación en la misma relación [15].

$$PPN = PPB - (\text{RESPIRACIÓN} + \text{CONSUMO DE AUTÓTROFOS})$$

La productividad neta de un ecosistema es el flujo de CO₂ neto que circula desde ó hacia el ecosistema, es decir, es la diferencia de la captura de carbono gracias a la fotosíntesis menos las pérdidas generadas por la respiración de autótrofos y heterótrofos. Para calcular el carbono fijado dentro de un ecosistema, se debe cuantificar la PPN¹ ya que ésta incluye el carbono acumulado en los suelos y biomasa sin tener en cuenta las pérdidas del mismo [4].

¹ PPN: Productividad Primaria Neta.

4.3. MARCO INSTITUCIONAL

4.3.1 Parque Nacional Natural Chingaza.

El Parque Nacional Natural Chingaza fue declarado mediante la Resolución 154 de junio de 1977 y es el área protegida más importante de Cundinamarca, así como uno de los parques que mayores beneficios económicos produce a nivel nacional [23]. Se encuentra ubicado en la cordillera oriental de los Andes Colombianos, al nororiente de Bogotá; su territorio abarca 11 municipios, 7 de los cuales pertenecen al oriente del departamento de Cundinamarca (Fómeque, Guasca, La Calera, Choachí, Gachalá, Junín y Medina) y los restantes al noroeste del departamento del Meta (San Juanito, El Calvario, Restrepo y Cumaral). El parque tiene rangos de temperatura entre los 4°C hasta los 21,5°C distribuidas en alturas entre 800 y 4.020 msnm; gracias a esta diversidad de cambios, en la zona se encuentran bosques de piso templado y frío, subpáramo y páramo [12].

En el Parque Nacional Natural Chingaza se encuentran las lagunas de Siecha y las lagunas del macizo de Chingaza, el cual posee más de 40 lagunas naturales, dentro de las cuales se tomaron tres para el estudio de la productividad primaria.

4.3.2 Convenio Universidad Santo Tomás.

Funcionarios del Parque Nacional Natural Chingaza, con apoyo de la docente Liliana Salazar, iniciaron con la propuesta de desarrollar proyectos de investigación por parte de estudiantes de la facultad de Ingeniería Ambiental que quisieran adoptarlo como proyecto de grado. Como resultado, se inició un convenio entre ambas entidades con el fin de dar apoyo a estas investigaciones, necesarias para desarrollar estrategias de conservación en el parque.

Dentro del convenio, el parque se comprometió a dar apoyo logístico y alojamiento sin costo a los estudiantes que realizaran investigaciones con el compromiso de que los documentos finales se compartieran con dicha entidad. Inicialmente se realizaron tres investigaciones, de las cuales ésta es una de ellas; las otras dos están enfocadas hacia el estudio de macroinvertebrados y tanto zoo como fitoplancton, estas tres investigaciones se desarrollaron en la misma área de estudio.

4.4. MARCO LEGAL

Mediante la resolución No. 065 de junio 24/1968 del INCORA se reservan y declaran como PNN los páramos de Sumapáz y Chingaza. El páramo de Chingaza ubicado en el municipio de Fómeque (Cundinamarca) comprendiendo los ríos La Playa, Frio y Chuza con una extensión de 20.000 Ha [13].

Mediante resolución No. 0550 de junio 19 de 1998, el Ministerio del Medio Ambiente amplió el PNN Chingaza quedando en total con un área aproximada de 76.600 Ha, bajo la jurisdicción de los municipios de Guasca, La Calera, Junín,

Gachalá, Medina, Fómeque y Choachí en Cundinamarca y, de Restrepo, San Juanito, Cumaral y Calvario en el Meta [13].

Ley 357 de 1997: Por medio de esta ley, se aprueba la “Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas” que se suscribió en Ramsar en febrero 02/1971 [24].

Decreto 233 del 2008: por medio de éste decreto se designan unos humedales, abarcando el sistema lacustre de Chingaza, para ser incluidos en la lista de humedales de importancia internacional [4].

Decreto 3930 del 2010: reglamenta los usos del agua, los residuos líquidos y otras disposiciones con el fin de garantizar la calidad del agua para consumo humano y, en general, para las demás actividades en que su uso es necesario. Así mismo, regula entre otros aspectos, la clasificación de las aguas, señala las que deben ser objeto de protección y control especial, fija su destinación y posibilidades de aprovechamiento, estableciendo la calidad de las mismas y ejerce control sobre los vertimientos que se introduzcan en las aguas superficiales o subterráneas, interiores o marinas, a fin de que éstas no se conviertan en focos de contaminación que pongan en riesgo los ciclos biológicos, el normal desarrollo de las especies y la capacidad oxigenante y reguladora de los cuerpos de agua [25].

Resolución 2115 del 2007: Por medio de ésta se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano [26].

Decreto 1575 del 2007: Por medio de éste se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del agua para Consumo Humano con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada [27].

Resolución 0769 de 2002: Por la cual se dictan disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos [28].

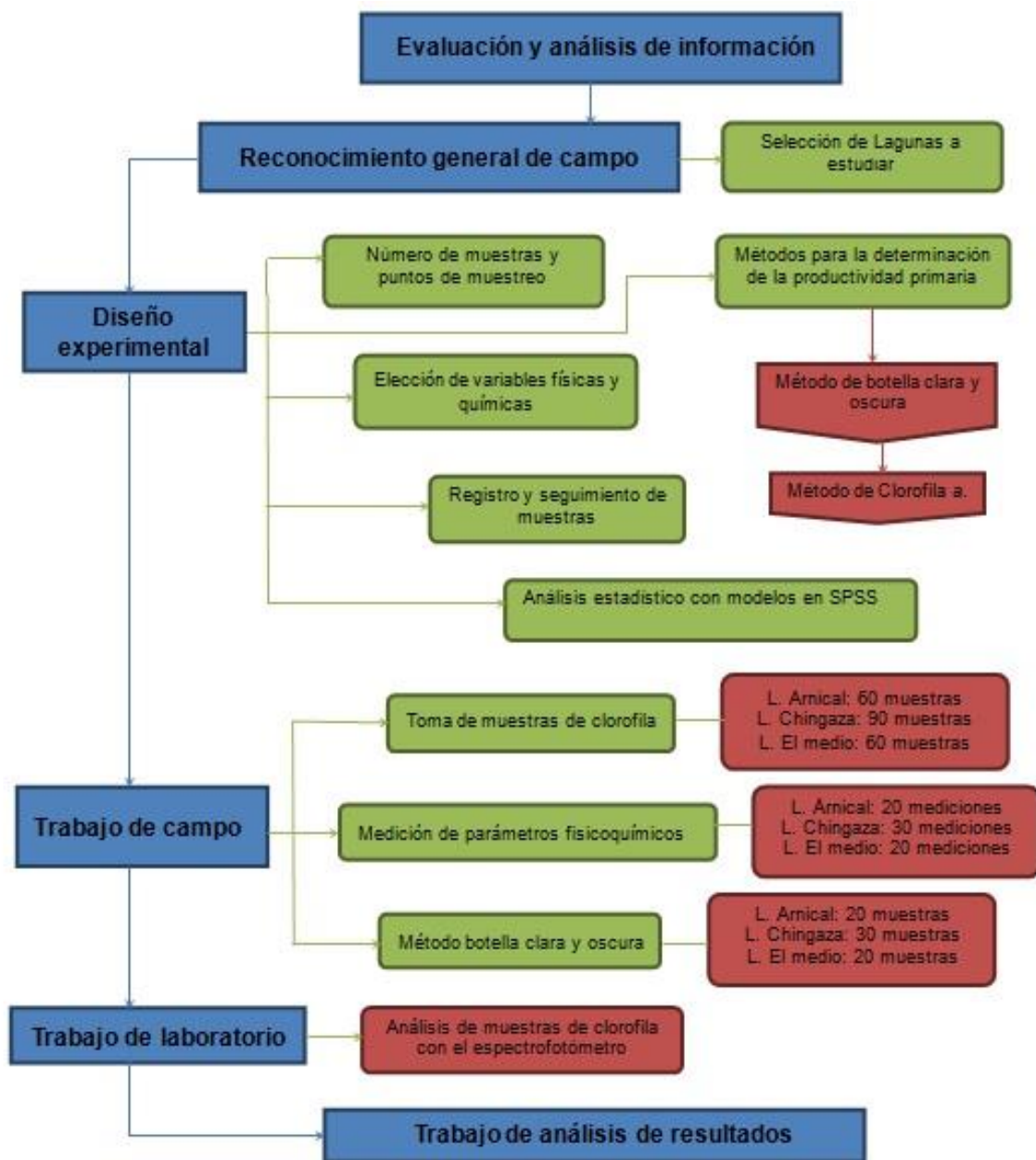
Resolución 0839 de 2003: Se establecen los términos de referencia para la elaboración del estudio sobre el estado actual y el plan de manejo ambiental de los páramos [29].

Resolución 196 de 2006: Se adopta la guía técnica para la formulación de planes de manejo para humedales en Colombia [30].

5. METODOLOGÍA

El proceso metodológico para evaluar la productividad primaria de las lagunas Arnical, El Medio y Chingaza que pertenecen a la subcuenca del Río Frío ubicada dentro del sistema lacustre de Chingaza comprendió el desarrollo de las siguientes fases:

Ilustración 5 Diagrama de metodología para la investigación.



Fuente: Los autores.

5.1 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

El desarrollo de la investigación se basó en una evaluación y análisis riguroso de la información secundaria existente en temas como humedales de importancia Ramsar, limnología, productividad primaria y ecosistemas de páramo entre otros documentos que permitieron establecer lineamientos básicos para el inicio del proyecto y su posterior desarrollo.

La información necesaria para el proyecto refirió, compiló y analizó temas específicos en limnología, productividad primaria, estadística aplicada a modelos ecológicos, servicios ambientales derivados de las funciones ecosistémicas de los humedales Ramsar y metodologías para toma y análisis de muestras de parámetros fisicoquímicos. Entre los documentos estudiados se tiene como referencia estudios realizados por y para el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Parques Nacionales Naturales de Colombia que permitieron determinar las condiciones generales del sistema lacustre de Chingaza.

En términos generales los estudios realizados en torno a la productividad primaria y estudios limnológicos en sistemas de páramo en Colombia son escasos, razón por la cual la investigación en este campo es importante para el desarrollo de información de los ecosistemas estratégicos de nuestro país, sin embargo para el desarrollo de esta investigación se tomaron como antecedentes los siguientes estudios:

- Santiago Gaviria, 1993, “Aspectos limnológicos de las lagunas de Chingaza” [31].
- Donato Rondón, 1996, “Ecología de dos sistemas acuáticos de páramo” [32].
- Orlando Vargas, 2003, Universidad Nacional de Colombia: “Parque Natural Nacional Chingaza” [12].
- Parques Nacionales Naturales de Colombia: 2009, “Plan estratégico y de manejo para el Parque Natural Nacional Chingaza” [13].
- Robert G. Wetzel: 1981, “Limnología” [18].

5.2 RECONOCIMIENTO GENERAL DE CAMPO

En el PNN Chingaza existe un complejo de aproximadamente 40 lagunas, que hacen parte de la gran cuenca del río Orinoco; se seleccionó la subcuenca del río Frio que presenta conectividad ecológica con las lagunas del Arnical, Chingaza y El Medio, las cuales hacen parte de la zona Ramsar, razón por la cual, además de su ubicación, estas lagunas fueron seleccionadas para el desarrollo de esta investigación [13].

Para la determinación de los puntos de muestreo en cada una de las lagunas y la definición del número total de muestras y tiempos de muestreos a desarrollar, se

realizó una visita de campo de carácter diagnóstica, con los profesionales de la Unidad de Parques Nacionales Naturales.

La visita diagnóstica se realizó del 27 al 30 de junio de 2014, donde se visitaron las lagunas del Arnical, El Medio y Chingaza; en el recorrido se observaron las características generales del terreno, la fauna asociada, la vegetación y el acceso a las lagunas, el cual presentó un nivel considerable de dificultad por lo que los puntos de muestreo se ubicaron en zonas accesibles; las lagunas se encuentran a largas distancias por lo que el tiempo es un factor limitante y determinante para el muestreo.

A partir de la disponibilidad y características del parque se establecieron los tiempos y puntos de muestreo, así como la logística necesaria para realizar las diferentes visitas. Finalmente se estableció el compromiso del parque en la logística de los muestreos además del apoyo de transporte debido a las largas distancias que se deben recorrer.

5.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental se realizó teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Determinación del número de muestras y puntos de muestreo en las lagunas.
- Selección de variables físicas y químicas.
- Métodos para la determinación de la productividad primaria.
- Registro y seguimiento de muestras.
- Análisis estadístico con SPSS.

5.3.1 Número de muestras y estaciones de muestreo en las lagunas.

El PPN Chingaza y las condiciones físicas de la zona determinadas en la visita diagnóstica fueron los factores determinantes para calcular el número de muestras y cantidad de muestreos realizados; por disponibilidad del parque y de acuerdo con el coordinador se acordaron 5 muestreos que respondieron a diferentes épocas climáticas (períodos de lluvias, transición y épocas secas), en cada visita se realizaron muestreos a las tres lagunas, estableciendo los siguientes puntos:

- Laguna del Arnical: 4 estaciones.
- Laguna El Medio: 4 estaciones.
- Laguna de Chingaza: 6 estaciones.
- Total para el sistema lagunar: 14 estaciones por 5 muestreos que se realizaron, siendo 75 muestras en total.

Los puntos de muestreo se tomaron teniendo en cuenta dos factores: el primero la salida y entrada de la laguna y el segundo de acuerdo a la visita diagnóstica

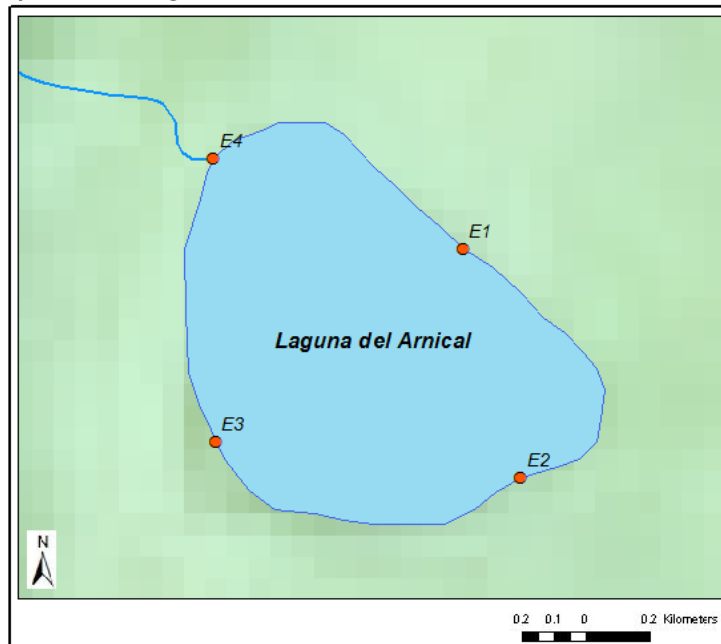
donde se asignaron estaciones en los lugares donde se observara cambio del biotopo que pudiera significar variaciones en las condiciones de las lagunas.

Ilustración 6. Mapa de la laguna de Chingaza con las estaciones de muestreo



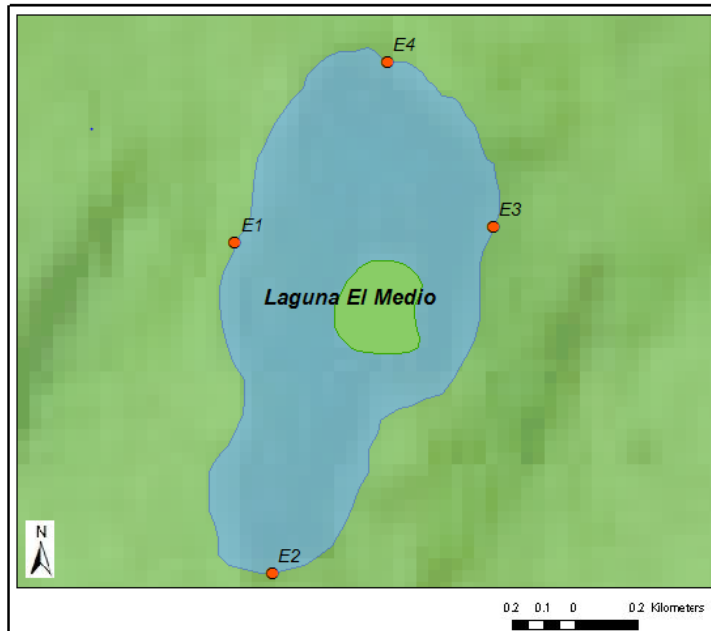
Fuente: Los autores.

Ilustración 7. Mapa de la laguna del Arnical con las estaciones de muestreo



Fuente: Los autores.

Ilustración 8. Mapa de la laguna El Medio con las estaciones de muestreo



Fuente: Los autores.

5.3.2 Elección de variables físicas y químicas.

Dentro de las variables físicas y químicas que pueden describir las características generales en cuanto a la calidad del agua y que se deben incluir en estudios limnológicos están la conductividad, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, temperatura y pH. Es importante también conocer la altitud y la variación altitudinal aguas arriba y aguas debajo de cada laguna [33].

Tabla 1 Importancia de parámetros físico-químicos en las lagunas.

Concepto	Justificación Lagunas
Oxígeno disuelto	
Cantidad efectiva de oxígeno gaseoso (O_2) en el agua, expresada en términos de su presencia en el volumen de agua (miligramos de O_2 por litro) o de su proporción en el agua saturada (porcentaje).	Es uno de los factores asociados a la vida acuática, al incidir en casi todos los procesos químicos y biológicos; las condiciones aeróbicas (presencia de oxígeno) favorecen la diversidad de especies deseables como los peces que en general pueden subsistir a concentraciones de OD superiores a 3 mg/L.
pH	
El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno (H^+) en una sustancia y sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en el agua. El resultado de una medición de	El pH es un parámetro a considerar cuando queremos determinar la especiación química y solubilidad de varias sustancias orgánicas e inorgánicas en la laguna. Es un factor abiótico que regula procesos biológicos mediados por enzimas (ej. fotosíntesis, respiración); la disponibilidad de

pH viene determinado por una consideración entre el número de protones (iones H^+) y el número de iones hidroxilo (OH^-). Cuando el número de protones iguala al número de iones hidroxilo, el agua es neutra.	nutrientes esenciales que limitan el crecimiento microbiano en muchos ecosistemas (ej. NH_4^+ , PO_4^{3-} y Mg^{2+}) y la movilidad de metales pesados tales como cobre, que es tóxico para muchos microorganismos.
Temperatura	
La temperatura es un parámetro que indica calidad del agua ya que se regula la cantidad de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, además puede generar cambios en la actividad biológica.	Es importante porque actúa sobre procesos como la actividad biológica de las lagunas, la absorción de oxígeno y la precipitación de compuestos.
Conductividad	
La conductividad específica del agua es la medida de la habilidad para transportar una corriente eléctrica y varía con el tipo y cantidad de iones que contenga. Valor permisible: Menor o igual a 1.000 mS/cm.	Puede ser factor importante para medir e identificar fácilmente los sólidos disueltos en el agua. Cuando la conductividad del cuerpo de agua se encuentra fuera del rango el agua no es adecuada para la vida de ciertas especies.
Potencial redox	
El Potencial Redox (Eh) es un valor relativo medido contra el punto 0 del electrodo normal de hidrógeno u otro electrodo secundario de referencia. Un valor Eh positivo y de alta magnitud es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación mientras un valor Eh negativo es indicativo de un ambiente altamente reductor.	Las reacciones de oxidación y reducción son mecanismos que regulan el comportamiento de algunos compuestos presentes en cuerpos de agua; el potencial redox afecta la distribución y la actividad metabólica de microorganismos y su función en los diferentes ecosistemas.

Fuente: [26] [25] [34].

5.3.3 Métodos para la determinación de la productividad primaria.

La productividad primaria refiere la tasa de acumulación de materia orgánica por actividad fotosintética o la tasa de conversión de energía radiante en energía química y materia orgánica, se determina en unidades de masa de carbono sobre volumen por unidad de tiempo ($mg\ C\ m^{-3}\ h^{-1}$). Para su determinación existen varios métodos de análisis como: el método de Winkler, por el cual se mide el oxígeno disuelto, método de botella clara y oscura y el método de carbono radioactivo o C^{14} ; para el desarrollo de esta investigación se seleccionaron los siguientes métodos:

5.3.4 Método de botella clara y oscura.

Este método se utiliza para determinar la tasa fotosintética y la productividad primaria bruta (fotosíntesis total) y neta (disponible) a partir del oxígeno disuelto presente en los cuerpos de agua. Para la lagunas ésta se realizó con dos botellas de volumen conocido que se sumergen en el agua para sacar una muestra homogénea, una botella es cubierta totalmente con papel aluminio que representara la botella oscura, en la cual no hay fotosíntesis, sino solamente respiración, y la otra completamente transparente, en la cual si se lleva a cabo la fotosíntesis, se sellan de manera que no queden burbujas en su interior, posteriormente se introducen en el agua por un periodo de tiempo determinado de 1 hora, antes de introducir las botella con una sonda se mide el oxígeno disuelto

inicial en el agua y pasado el tiempo estimado se retiran las botella y se miden las concentraciones de oxígeno en cada una de ellas, midiendo en miligramos por litro [35] [36].

A partir de los resultados se establece la tasa de respiración con base en la siguiente ecuación:

$$R = \frac{C_0 - C_d}{\Delta t} \quad (3)$$

Dónde:

R= Tasa de respiración

C₀= Concentración inicial de O₂ (Oxígeno disuelto en el agua)

C_D= Concentración final de O₂ de la botella oscura

Δt= Tiempo de muestreo

Luego se halla la productividad primaria bruta a partir de la fórmula:

$$PG = \frac{C_L - C_D}{\Delta t} \quad (4)$$

Dónde:

PG= Productividad primaria bruta

C_L= Concentración final de O₂ de la botella clara.

Finalmente se determina la productividad neta de oxígeno

$$PN = \frac{C_L - C_0}{\Delta t} \quad (5)$$

$$PN = PG - R \quad (6)$$

PN= Productividad primaria neta

5.3.5 Método de Clorofila a.

Por medio de éste método se estimó la concentración de clorofila a, variable a partir de la cual se determinó la capacidad de captura de carbono del fitoplancton y el estado trófico de los ecosistemas. Para la recolección de las muestras se tomaron de cada uno de los puntos de las tres lagunas 0.5 L de agua y se filtraron a través de un sistema de filtración, el residuo resultante contuvo el fitoplancton además de bacterias y detrito que quedaron retenidos en el filtro; las muestras fueron etiquetadas, recubiertas con papel aluminio y finalmente congeladas para su conservación hasta el análisis en el laboratorio.

La muestra en el laboratorio se expuso a una corriente de vapor con el fin de romper las clorofilasas, luego se secaron las muestras y se mantuvieron en la oscuridad durante 20 horas en acetona al 90%; para determinar la clorofila a fue necesario medir la pérdida del extracto en un espectrofotómetro a 665 y 750 nm, ya que estas son las longitudes de onda en las cuales absorbe la clorofila a; finalmente se estimó la concentración de clorofila de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Chl } a = \frac{11.4 (A_{665} - A_{750}) V_E}{L V_F} \quad (7)$$

Chl a: Clorofila a (mg m^{-3})

A_x : Absorbancia (nm)

V_E : Volumen del extracto (ml)

L: longitud del recipiente del espectrofotómetro (cm)

V_F : Volumen filtrado (L)

5.3.6 Registro y seguimiento de muestras.

Para asegurar la rigurosidad y precisión de los resultados se realizó un registro debido a que es un gran número de muestras y debe medirse el comportamiento de la productividad primaria de las lagunas con respecto al tiempo, para esto se creó una base de datos la cual permite identificar la fecha, la laguna y el tipo de muestra, además de anotarse las observaciones adicionales con respecto al momento de cada muestreo; cada una tuvo un código de identificación el cual coincidió con el código de los rótulos de información de las diferentes muestras. Por otra parte los datos obtenidos en cada muestreo fueron registrados de acuerdo a la clasificación del tipo de muestra: parámetros fisicoquímicos, producción de oxígeno y captura de carbono en las tres lagunas y en tierra.

El seguimiento correcto de muestras y datos se realizó después de la toma de muestras en la tres lagunas del parque, con informes resultado del trabajo de campo y actualización de las bases de datos.

5.4 TRABAJO DE CAMPO

En el PNN Chingaza se realizaron desde el mes de junio de 2014 hasta mayo del 2015 seis vistas cada una con una duración de cuatro a cinco días debido a que el muestreo de cada laguna duraba aproximadamente un día y los dos restantes eran para el transporte de ida y regreso del municipio de La Calera a la estación de la Paila donde se encuentra la cabaña para el hospedaje durante los días de muestreo; la primera visita fue de carácter diagnóstico en la que se realizó un reconocimiento de las tres lagunas y se determinó la logística necesaria para el trabajo de campo; las cinco visitas restantes correspondieron a los respectivos muestreos compuestos de los siguientes procedimientos en cada uno de los puntos de muestreo. En cada punto de muestreo se realizaron las siguientes actividades:

- Medición de parámetros fisicoquímicos
- Toma de muestras de clorofila
- Medición de productividad primaria

Además de las actividades mencionadas, se tomaron con ayuda de un GPS datos de altitud y coordenadas geográficas en cada punto de muestreo.

Es importante resaltar que el muestreo en cada laguna se realizó a las mismas horas en todas las fechas, con el fin de tener valores de productividad primaria que se pudieran estandarizar y comparar sin que se vean afectados por variables como la radiación solar por hora del día. En consecuencia, cada día se realizó el muestreo en una laguna diferente, siempre manteniendo las horas de los muestreos entre lagunas.

5.4.1 Medición de parámetros fisicoquímicos.

Para medir los diferentes parámetros fisicoquímicos en cada punto de muestreo de las tres lagunas se utilizó una sonda multiparamétrica marca “Quanta”, la cual arrojó datos de temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, valor pH, porcentaje de saturación de oxígeno, potencial redox y sólidos suspendidos totales. [37]

Ilustración 9 Medición de parámetros físico-químicos.



Fuente: Los autores.

5.4.2 Toma de muestras de clorofila a.

La toma de clorofila a para determinación de la biomasa se realizó por medio de una muestra y dos repeticiones por punto de muestreo, en cada uno se tomaba la muestra homogénea con 500 ml de agua y se pasaba a través de un equipo de filtrado la cual consistía en un Erlenmeyer con desprendimiento lateral y un sistema de filtro de agua para campo; el resultante del proceso era el residuo que quedaba en el papel filtro, este era empacado y etiquetado en bolsas de propileno

resellables las cuales se cubrieron con papel aluminio con el fin de proteger las muestras de la luz y se pusieron en una nevera de icopor con hielo para mantener las muestras congeladas hasta llegar al lugar de hospedaje donde se situaban en el congelador.

Ilustración 10 Fotografía tomada al realizar la filtración para clorofila a.



Fuente: los autores.

5.4.3 Método botella clara y oscura.

Para la determinación de la productividad primaria en las tres lagunas se manejó el método de botella clara y oscura en campo, para lo cual se utilizaron dos recipientes de vidrio de 1 litro, uno de estos fue recubierto con papel aluminio en su totalidad para impedir el paso de la luz; cada recipiente fue sumergido en el agua hasta ser llenado en su totalidad, se cerró de tal manera que no quedaran burbujas para evitar la oxigenación y se introdujeron en el agua durante un periodo de hora y media. Transcurrido el tiempo se retiraron los recipientes y a cada uno se le midió la concentración de oxígeno disuelto con la sonda multiparamétrica; anterior a este proceso ya se había determinado el oxígeno disuelto inicial en la toma de parámetros fisicoquímicos de cada punto.

5.5 TRABAJO DE LABORATORIO

El trabajo en el laboratorio comprendió únicamente el análisis de las muestras de clorofila a con siguiente procedimiento:

5.5.1 Procedimiento para el análisis de muestras de clorofila a.

Inicialmente las muestras fueron dejadas en acetona al 90% y refrigeradas en recipientes individuales durante un periodo de 24 horas sin contacto con la luz. Pasado el tiempo establecido se colocaron los filtros recolectados en campo en una corriente de vapor durante dos minutos con el fin de romper las células y liberar los pigmentos de la muestra, luego en un mortero se maceraron los filtros con 10 ml de acetona al 90% durante un minuto, el resultante se dispuso en los

recipientes de vidrio del espectrofotómetro en el cual se midió la absorbancia a longitudes de onda de 665 nm (clorofila a) y 750 nm (Turbidez de la muestra), posteriormente se realizaron los cálculos correspondientes a este método de determinación de biomasa.

Ilustración 11 Trabajo en laboratorio para el análisis de las muestras de clorofila a.



Fuente: los autores.

5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se realizó primero por estadística descriptiva mostrando gráficamente el comportamiento de las lagunas con respecto a la productividad primaria e igualmente se analizaron los parámetros fisicoquímicos tomados en campo explicando los fenómenos presentados. Posteriormente se analizaron los datos por medio de la metodología de Análisis de Componentes Principales ya que esta técnica permite el tratamiento de las variables observadas reduciendo el número de variables y desarrollando combinaciones que sintetizan los datos y los relacionan entre sí.

5.6.1 Análisis estadístico Modelos en SPSS.

SPSS es un software especializado en el análisis estadístico el cual se utilizó para la creación de un modelo matemático que relacionó una base de datos que incluyó todas las variables analizadas en este estudio, es decir, en este caso se tienen registros de temperatura, altitud, conductividad, pH, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, clorofila a y productividad primaria; los datos se ingresaron en el sistema, para establecer un análisis integral de las variables y la correlación que existe entre las mismas, estableciendo en primera instancia el comportamiento de cada una de las 3 lagunas y posteriormente la relación integral entre ellas.

5.6.2 Definición del estado trófico de las lagunas.

Para definir el estado trófico de los ecosistemas y poder evaluar las lagunas con respecto a su productividad, se utilizaron las siguientes técnicas:

- Clasificación del grado de eutrofia según OCDE: el Programa de Cooperación sobre la Eutrofización desarrollado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) propuso una clasificación para el grado de eutrofia de lagos y embalses a partir de variables medidas en campo. Para éste estudio, se analizó el estado trófico de las lagunas teniendo en cuenta la concentración de clorofila *a* a partir de la tabla 2 [38].

Tabla 2 Clasificación del grado de eutrofia en lagos y embalses.

Grado de eutrofia	Media de Clorofila <i>a</i> (mg m ⁻³)
Ultraoligotrófico	<1
Oligotrófico	1 – 2.5
Mesotrófico	2.5 – 7.9
Eutrófico	8 – 25
Hipereutrófico	> 25

Fuente: [39].

- Índice del Estado Trófico (IET o TSI): en 1977, Carlson propuso este índice, el cual varía entre 0 y 100, de oligotrófico a hipereutrófico y se obtiene a partir de parámetros medidos en campo, como la clorofila *a*. A partir de la ecuación que figura a continuación, se estableció que a partir de las concentraciones obtenidas de clorofila *a*, se puede conocer el estado trófico de cada laguna [38].

$$TSI_{Chl-a} = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln Chl\ a}{\ln 2,5} \right) \quad (8)$$

Chl *a* = mg m⁻³

Tabla 3 Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua.

Estado trófico	TSI	Chl – <i>a</i> (mg m ⁻³)
Oligotrófico (TSI <30)	0	0.04
	10	0.12
	20	0.34
	30	0.94
Mesotrófico (30 < TSI < 60)	40	2.6
	50	6.4
	60	20
Eutrófico (60 < TSI < 90)	70	56
	80	154
	90	427
Hipereutrófico (90 < TSI < 100)	100	1183

Fuente: [39].

6. PRODUCTIVIDAD PRIMARIA PARA EL SISTEMA LACUSTRE CHINGAZA

La productividad primaria es la velocidad con la cual la actividad metabólica de los organismos fotosintéticos transforma el carbono inorgánico a una forma orgánica [20]. Su medición permite conocer el estado trófico de un ecosistema e identificar los bienes y servicios asociados a éste proceso metabólico.

El método de botella clara y botella oscura utiliza los cambios en el oxígeno disuelto para estimar el metabolismo neto y bruto de las comunidades presentes en el agua; este método mide tanto la respiración como la fotosíntesis, pues tiene en cuenta los cambios en la concentración del oxígeno en la botella clara y la botella oscura durante una incubación in situ durante determinado tiempo. Los cambios en la tasa fotosintética muestran casi instantáneamente las perturbaciones producidas por los nutrientes, la luz, contaminantes o cambios físicos en el ambiente [17].

A continuación se relaciona el análisis de la productividad primaria para cada una de las lagunas, donde M1, M2, M3, M4 y M5 hacen referencia a las fechas de muestreos y E1, E2, E3, E4, E5 y E6 hacen referencia a las estaciones de muestreo:

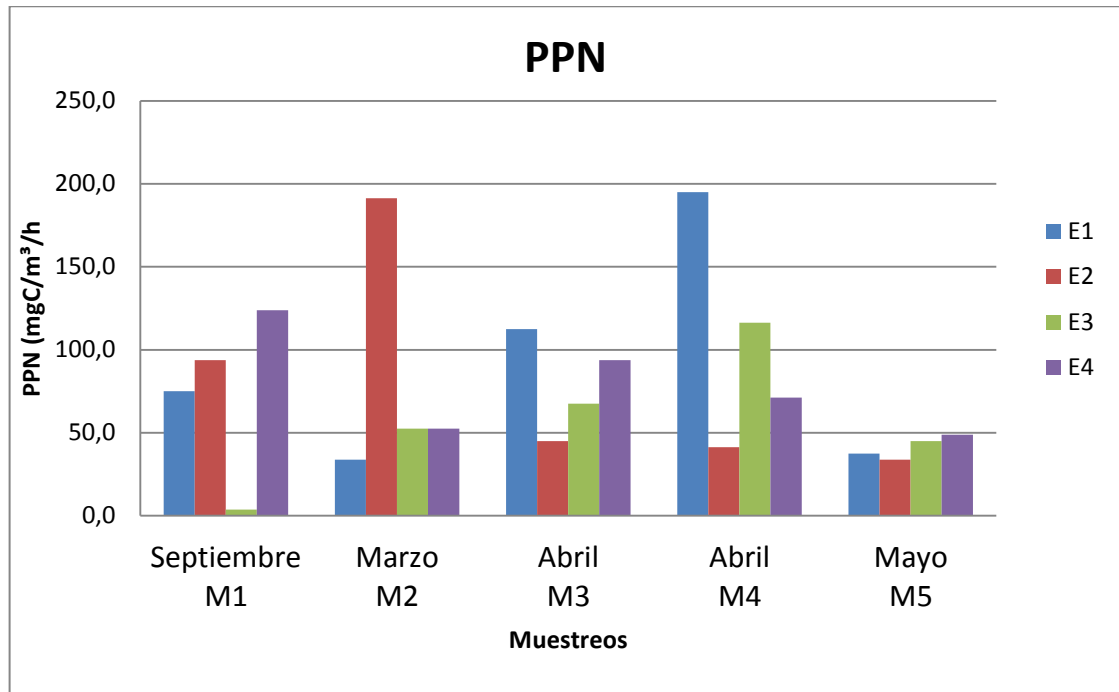
6.1 LAGUNA DEL ARNICAL

La productividad primaria neta en la laguna del Arnical presentó valores entre 3,75 y 191,25 mg C m⁻³ h⁻¹, con una media de 76.7 mg C m⁻³ h⁻¹ y una moda de 33.75 mg C m⁻³ h⁻¹, además de una desviación estándar de 50,6 mg C m⁻³ h⁻¹ lo que indica que existe una gran variabilidad de los datos frente a la media debido a la influencia tanto de cambios en la precipitación como en los horarios de muestreo.

Teniendo como base que la productividad depende de las condiciones climáticas reinantes para la eficiencia fotosintética, la precipitación, la radiación solar y la temperatura son fundamentales para este proceso, así, en la zona se tiene un comportamiento unimodal con periodos de lluvia entre mayo y septiembre y un periodo de sequía entre diciembre y marzo, siendo los meses restantes de transición, condiciones que hacen que esta productividad oscile (gráfica 12) [32].

De acuerdo con los resultados del análisis estadístico descriptivo se pudo identificar que para el primer (M1) y el último muestreo (M5), realizados en épocas de altas precipitaciones, la PPN obtuvo los valores promedios más bajos con respecto a los muestreos realizados en época de sequía. Los picos de PPN para los muestreos M2, M3 y M4 se ven fuertemente influenciados por la hora a la que se tomaron las muestras siendo la radiación solar un factor determinante en la velocidad con la cual el fitoplancton desarrolla su proceso de fotosíntesis, aumentando la producción de oxígeno [32].

Ilustración 12 Gráfica de PPN para laguna del Arnical.



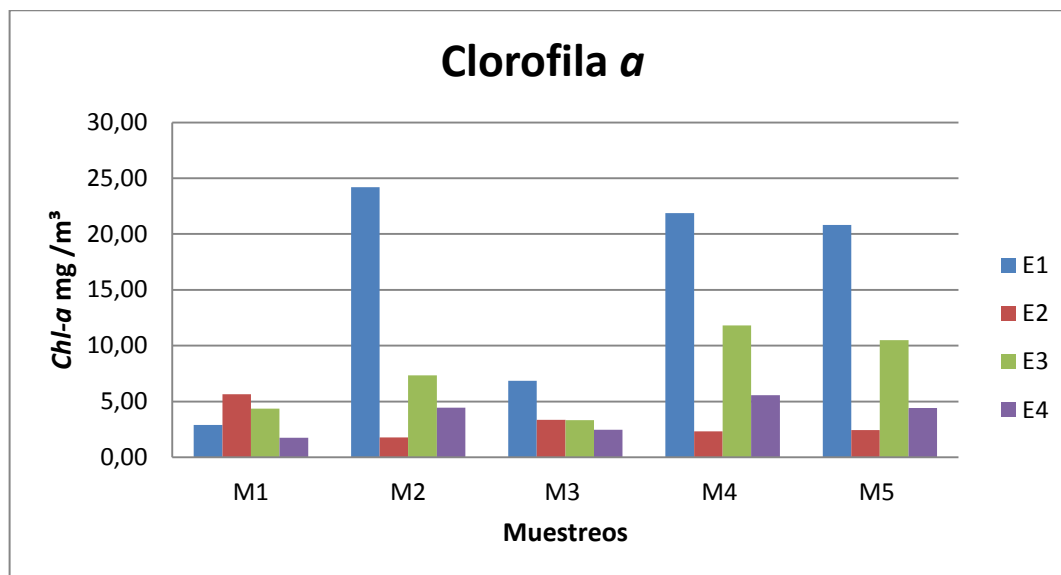
Fuente: Los autores.

Analizando la distribución de PPN entre estaciones que se evidencia en la gráfica 12 se puede observar que para M5 y M3 el comportamiento es uniforme para toda la laguna, mientras que M2 y M4 presentan una variedad entre los datos de las estaciones y en consecuencia, en las condiciones que favorecen la fotosíntesis para cada punto de muestreo. En el M1 se evidencia que en la estación 3 el valor de PPN es muy bajo comparado con las otras estaciones, dato que pudo verse afectado por fallas en la toma de la muestra o en la medición, lo cual se refleja en el comportamiento uniforme de las estaciones restantes.

6.1.1 Clorofila a.

La clorofila a presenta una media de $7,4 \text{ mg m}^{-3}$ con valores que oscilan entre $1,73$ y $24,19 \text{ mg m}^{-3}$, con una desviación estándar de $6,98 \text{ mg m}^{-3}$. Los niveles de clorofila a en la laguna tienen comportamientos semejantes y que no se ven afectados por las épocas de lluvia o sequía en las que se realizaron los muestreos pero si presenta una diferencia importante en la estación 1 donde los niveles alcanzan valores máximos entre 20 y 25 mg m^{-3} esto posiblemente se deba a que en este punto la abundancia de fitoplancton es mayor que en las otras zonas de la laguna (gráfica 13) [17].

Ilustración 13 Gráfica de concentración de clorofila a para laguna del Arnical.



Fuente: Los autores.

El comportamiento de la clorofila a generalmente se ve afectado por las épocas climáticas, pero en este caso se observa una distribución homogénea debido a que la laguna por ser de alta montaña maneja baja cantidad de materia orgánica y nutrientes lo que limita en gran medida el crecimiento fitoplanctónico, esto se ve evidenciado en las estaciones M2, M3 y M4 donde los valores de biomasa son bajos; otra razón de esto radica en la importancia de la radiación solar y la temperatura del agua sobre el desarrollo de poblaciones fitoplanctónicas que en ecosistemas de páramo por su altitud y alta nubosidad produce limitaciones en el metabolismo de la laguna. En la estación E1 los altos valores de biomasa (clorofila a) se deben a la morfología de la laguna en este punto ya que se evidencia una alta concentración de fitoplancton en la zona litoral [18].

Con el fin de determinar el estado trófico de la laguna del Arnical, por medio de la metodología desarrollada por la OCDE² y el TSI³, se infiere a partir de la ilustración 13 que de acuerdo al valor medio de clorofila a obtenido para este sistema (7,4 mg m⁻³) se cataloga como mesotrófico. Así mismo, aplicando la ecuación del TSI para conocer el estado trófico de cuerpos de agua, se obtiene un valor de 46.44 lo cual clasifica la laguna dentro de mesotrófica [39] [38].

$$TSI_{Chl-a} = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln 7,4}{\ln 2,5} \right) = 46,44$$

² OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

³ TSI: Índice de Estado Trófico

Es importante señalar que se calculó el Índice de Estado Trófico para cada muestreo pues es importante identificar cambios de estado en la laguna, sin embargo, para todas las fechas de muestreo se catalogó el sistema como mesotrófico.

Se realizó el test de normalidad de Shapiro-Wilk, el cual es utilizado cuando se tienen menos de 50 datos, con el fin de identificar si los análisis de correlación se podían realizar con métodos paramétricos (correlación de Pearson) que identificaran relaciones lineales entre las variables o por el contrario, se debía realizar un análisis no paramétrico de las correlaciones entre PPN y clorofila *a* debido a la a que todos los datos no tienen una distribución normal. A partir de éste estadístico, se identificó que para todos los muestreos, las variables no se comportan con normalidad, razón por la cual se decidió analizar la relación de estas variables por medio del coeficiente de Spearman, el cual no asume una distribución normal en los datos.

De acuerdo al estadístico de correlación de Spearman, que relaciona la variables entre sí, se encontró que la biomasa fitoplanctónica evaluada con la concentración de clorofila *a* y la productividad primaria neta no se relacionan significativamente entre ellas, es decir, no existe ninguna dependencia entre éstas variables para la laguna del Arnical. Para resumir, las variaciones en la PPN no tendrán ninguna influencia en las concentraciones de clorofila *a* de la laguna del Arnical.

Tabla 4 Correlación de Spearman entre PPN y clorofila *a* para la laguna del Arnical.

			PPN	Clorofila <i>a</i>
Rho de Spearman	PPN	Coeficiente de correlación	1.000	-.086
		Sig. (bilateral)	.	.719
		N	20	20
	Clorofila <i>a</i>	Coeficiente de correlación	-.086	1.000
		Sig. (bilateral)	.719	.
		N	20	20

Fuente: los autores.

6.2 LAGUNA EL MEDIO

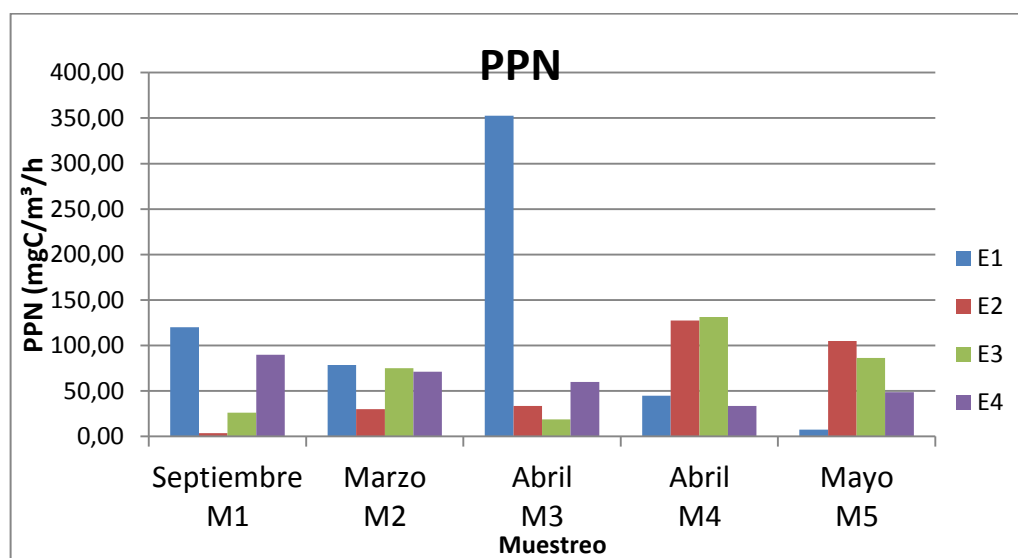
La productividad primaria neta en la laguna El Medio presentó valores entre 3.75 y 352.5 mg C m⁻³ h⁻¹, con una media de 77.25 mg C m⁻³ h⁻¹ y una desviación estándar de 75.6 mg C m⁻³ h⁻¹, condición que indica gran variabilidad entre los datos, debido no solo a la influencia de la precipitación y los horarios de muestreo sino también a la morfología y la zona de borde de la laguna, pues su forma permite que existan zonas en las cuales se observa acumulación de detritos que aumentan las fuentes de materia orgánica en el agua. Es importante destacar que la estructura de la dinámica trófica de estos sistemas acuáticos depende en gran

medida de la estructura de la dinámica detrítica; en general, la productividad primaria es menor en estos ecosistemas y suele ser variable, razón por la cual el detritus tiene gran influencia al proporcionar estabilidad metabólica al sistema [18].

Como se mencionó anteriormente, la productividad se vio fuertemente influenciada por las condiciones climáticas de la zona; en este caso, conviene resaltar que en todos los muestreos que se realizaron para esta laguna, la nubosidad fue un factor importante a la hora de realizar las mediciones de ésta variable cuya eficiencia se ve estrechamente influenciada por la radiación solar. En consecuencia y como se puede observar en la gráfica 14 los valores de productividad son bajos en comparación con las otras dos lagunas y no se evidencian fuertes cambios para las diferentes épocas climáticas.

En particular, se puede observar un pico de productividad en la estación 1 para el muestreo realizado en abril (M3), fecha en la cual las otras estaciones obtuvieron bajos valores en comparación a E1; teniendo en cuenta que la estación 1 es la entrada a la laguna, se presentó una mayor influencia de los vientos, incrementado el movimiento de las aguas y así su oxigenación, esto en comparación con las otras estaciones; carácter que está fuertemente relacionado con el alto valor de productividad que se obtuvo.

Ilustración 14 Gráfica de PPN para laguna El Medio.



Fuente: Los autores.

Como se evidencia en la gráfica 14 y teniendo en cuenta el valor de la desviación estándar, se puede apreciar que para el muestreo realizado en marzo (M2) se apreció más uniformidad entre estaciones que con respecto a los otros muestreos; hecho que se puede ver influenciado por las horas a las cuales se realizó este

muestreo, todas cercanas al medio día, momento en el cual por la radiación solar, la productividad es más eficiente con respecto a otros momentos en el día.

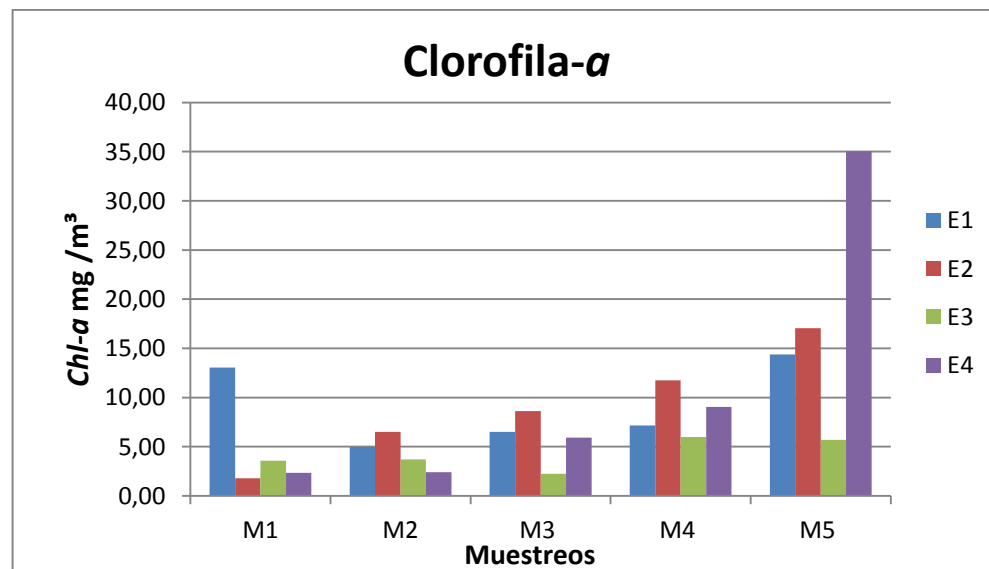
Con respecto a los valores mínimos que se encuentran en el primer y último muestreo, se infiere que en esas zonas y fechas específicamente, se percibieron valores altos de respiración y bajos valores de producción lo cual afecto directamente la productividad primaria neta para estas estaciones [19].

6.2.1 Clorofila a.

Los valores de clorofila a oscilan entre 1.78 y 35.04 mg m⁻³ con una media de 8.39 mg m⁻³ y una desviación de 7.58 mg m⁻³. A partir de la gráfica 15 se puede observar como por muestreo se van incrementando las concentraciones de clorofila a en toda la laguna. El comportamiento de las concentraciones de clorofila a durante el estudio fue aumentando para cada muestreo, evidenciándose un crecimiento considerable para el último muestreo (M5) realizado en época de altas precipitaciones, lo cual nos lleva a relacionar estrechamente las épocas climáticas con el incremento de biomasa fitoplanctónica en el agua.

La variabilidad que se percibe entre puntos de muestreo y se verifica al analizar la desviación estándar para cada punto de muestreo, refleja que para los muestreos en épocas de bajas precipitaciones, la variabilidad existente entre estaciones es mínima; contrario a esto, se observa gran variabilidad de datos entre estaciones para los muestreos realizados en meses con altas precipitaciones.

Ilustración 15 Gráfica de concentración de clorofila a para la laguna El Medio.



Fuente: Los autores.

Con respecto al estado trófico de la laguna se utilizaron las metodologías planteadas al inicio de este capítulo; con respecto a la clasificación desarrollada

por la OCDE, la laguna El Medio se cataloga como mesotrófica ya que presenta un valor medio de la concentración de clorofila *a* de 7.58 mg m⁻³. Ahora bien, teniendo en cuenta el TSI, se clasifica la laguna como un sistema mesotrófico ya que el valor de este índice fue de 46.7 como se evidencia a continuación en la ecuación:

$$TSI_{Chl-a} = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln 7,58}{\ln 2,5} \right) = 46,7$$

Es importante, señalar que se calculó el Índice de Estado Trófico para cada muestreo con el fin de identificar posibles cambios de estado en la laguna, sin embargo, para todas las fechas de muestreo se catalogó el sistema como mesotrófico.

Por medio de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, se identificó que para las variables PPN y clorofila *a* los datos no se ajustan a una distribución normal, en consecuencia, se realizó un análisis no paramétrico para identificar la correlación entre estas variables con el método de Spearman.

Tabla 5 Correlación de Spearman entre PPN y clorofila *a* para la laguna El Medio.

			PPN	Clorofila <i>a</i>
Rho de Spearman	PPN	Coefficiente de correlación	1.000	.204
		Sig. (bilateral)	.	.389
		N	20	20
	Clorofila <i>a</i>	Coefficiente de correlación	.204	1.000
		Sig. (bilateral)	.389	.
		N	20	20

Fuente: los autores.

Se analizó la correlación entre la PPN y clorofila *a* con el fin de establecer si existe dependencia entre estas variables; el coeficiente de correlación de Spearman es de 0.204 lo que indica que para ésta laguna las variables de PPN y clorofila *a* mantienen una relación positiva no lineal, sin embargo, ésta no es significativa ya que el valor del coeficiente es bajo.

6.3 LAGUNA CHINGAZA

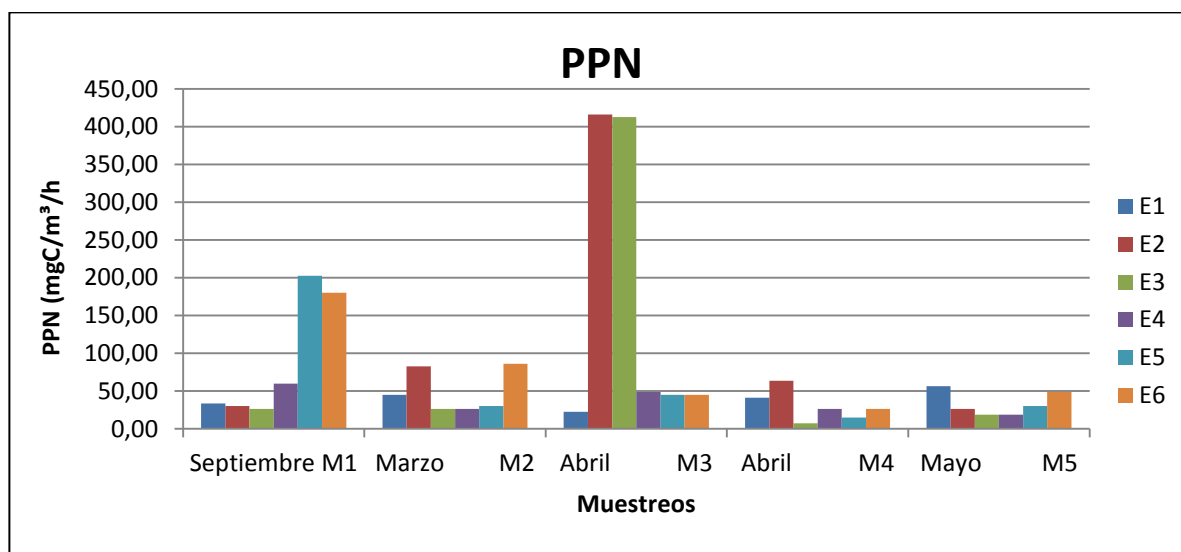
La productividad primaria neta para la laguna de Chingaza presentó valores entre 7.5 y 416.25 mg C m⁻³ h⁻¹, con una media de 72.25 mg C m⁻³ h⁻¹ y una desviación estándar de 102.20 mg C m⁻³ h⁻¹; analizando éste estadístico, se evidencia una fuerte variabilidad de los datos, incluso comparado con las otras lagunas, sin embargo, al examinar la gráfica 16 podemos observar que dicha variación se debe a dos valores de productividad en M3 que alcanzan picos superiores a 400 mg C m⁻³ h⁻¹. Como se mencionó en la metodología, debido a la gran extensión de esta

laguna, se debieron tomar 6 estaciones de muestreo donde la estación 2 es la entrada de agua a la laguna y la estación 6 es la salida.

Los muestreos en los cuales se observa una menor variación en los datos de PPN son M4 y M5, para los cuales se evidencian bajos valores de productividad con respecto a los otros muestreos. Teniendo en cuenta las diferentes épocas climáticas, se deduce que para los meses con altas precipitaciones, la PPN para la laguna de Chingaza es menor que en época de bajas precipitaciones. Ahora bien, con respecto a la hora de los muestreos y su influencia en la eficiencia de la productividad para la laguna, se evidenció que los picos de productividad fueron en los muestreados entre las 8 y las 9:30 a.m., momento del día en el cual la radiación no es tan fuerte como al medio día; esta situación puede deberse a la presencia de nubosidad en los momentos del día en los cuales la radiación solar debería ser más intensa, razón por la cual la eficiencia de la fotosíntesis se ve disminuida por la reducción de la luz solar. Hay que mencionar además, que los picos que se presentan se ven fuertemente pronunciados con respecto a los otros datos de PPN, hecho que también se ve atribuido a la fuerte aireación que se presenta en la entrada de agua a la laguna E2 y E3 que se encuentra en la misma línea de la corriente de agua.

Ahora bien, con respecto los datos más bajos de PPN, los cuales se presentan en época seca, se identificó que la productividad primaria bruta (datos en Anexo 1) se encuentra dentro de los valores promedios en comparación con los otros puntos ya que no se evidencian gran desviación entre los datos de esta variable, sin embargo, la tasa de respiración para estas estaciones de muestreo es bastante alta, hecho por el cual la PPN llega a valores tan bajos.

Ilustración 16 Gráfico de PPN para laguna Chingaza.



Fuente: Los autores.

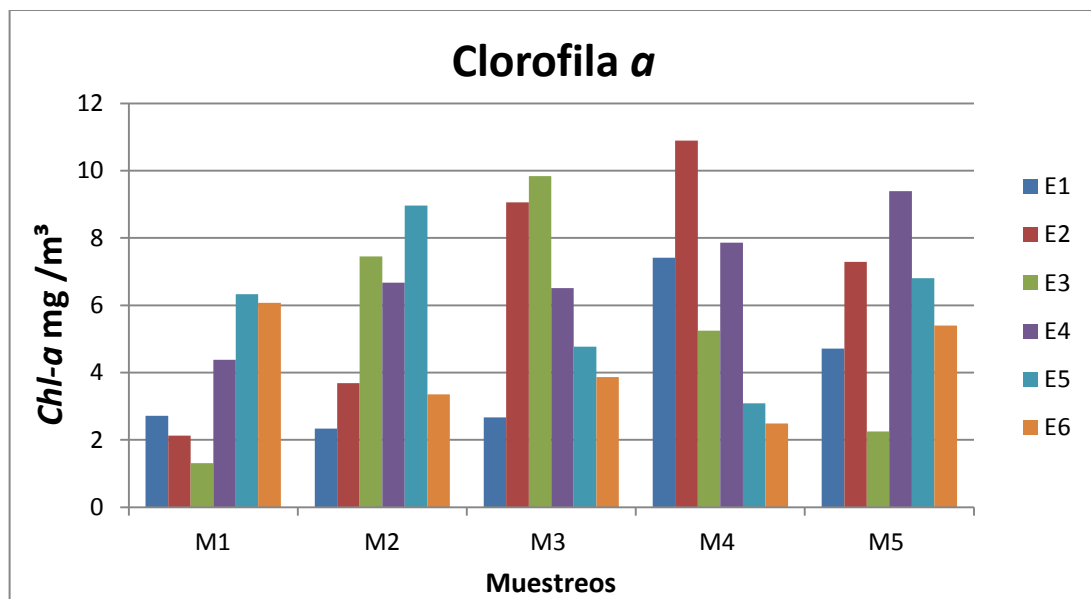
Otro rasgo que se observa en la PPN para la laguna de Chingaza es la baja variabilidad que se observa para el M2, M4 y M5 en la gráfica 16, es decir, se observa homogeneidad en el comportamiento entre las estaciones de muestreo para estas fechas. Simultáneamente al analizar los datos de los muestreos restantes se puede identificar que sus datos presentarían baja variabilidad si los picos en la productividad no se hubieran presentado.

6.3.1 Clorofila a.

Para la laguna de Chingaza, la clorofila a tiene una media de 5.5 mg m^{-3} con una desviación estándar de 2.64 mg m^{-3} , se observan valores entre 1.31 y 10.9 mg m^{-3} . Como se observa en la ilustración 17, los valores medios más altos de concentraciones de clorofila a se ven representados en época de bajas precipitaciones, momento en el cual la radiación solar es más fuerte. En general, la variabilidad de los datos con respecto a su media para cada fecha de muestreo y entre ellas no reflejan gran diferencia que evidencie diferencias en su comportamiento asociadas a las diferentes épocas climáticas bajo las cuales se realizaron los muestreos.

Los valores más altos de clorofila a se obtuvieron en el mes de abril y los más bajos en el mes de septiembre, entre fechas de bajas y altas precipitaciones respectivamente; en vista de esto, se relaciona el aumento y descenso de la biomasa fitoplanctónica con las diferentes épocas climáticas, con una relación inversamente proporcional entre precipitaciones y concentración de clorofila a.

Ilustración 17 Gráfico de la concentración de clorofila a para laguna Chingaza.



Fuente: Los autores.

En cuanto a la determinación del estado trófico de la laguna y aplicando las metodologías mencionadas al inicio de este capítulo, se clasifica la laguna de Chingaza como un sistema mesotrófico a partir de la metodología de clasificación del grado de eutrofia desarrollada por la OCDE. Ahora bien, el Índice de Estado Trófico se calcula a continuación:

$$TSI_{chl-a} = 10 * \left(2,46 + \frac{\ln 5,5}{\ln 2,5} \right) = 43,2$$

A partir del resultado de este índice se cataloga la laguna de Chingaza con mesotrófica. Debido a la importancia de identificar cambios climáticos en el estado trófico de la laguna, se calculó el TSI para cada muestreo realizado de la laguna, sin embargo, los resultados siempre indicaron que el sistema es mesotrófico por lo que no se identifican alteraciones en el sistema para la época de estudio.

El análisis de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk arrojó coeficientes que evidencian que para los muestreos M1, M2 y M3 de la variable PPN, los datos no siguen una distribución normal, razón por la cual para analizar las correlaciones entre ésta variable y la clorofila *a*, se utiliza la prueba no paramétrica de Spearman ya que ésta no asume normalidad en los datos.

Con respecto al análisis de la dependencia entre las variables PPN y clorofila *a*, se obtiene un coeficiente de 0.231 lo cual indica que existe una dependencia débil entre estas variables pero no es significativa debido al bajo valor de la correlación.

Tabla 6 Correlación de Spearman entre PPN y clorofila *a* para la laguna Chingaza.

			PPN	Clorofila <i>a</i>
Rho de Spearman	PPN	Coefficiente de correlación	1.000	.231
		Sig. (bilateral)	.	.220
		N	30	30
	Clorofila <i>a</i>	Coefficiente de correlación	.231	1.000
		Sig. (bilateral)	.220	.
		N	30	30

Fuente: los autores.

6.4 COMPARACIÓN DE LA PPN ENTRE LAS TRES LAGUNAS

La comparación del comportamiento con respecto a la productividad primaria entre las tres lagunas es importante ya que estos sistemas hacen parte de la cuenca del río frío, la cual se localiza en la zona Ramsar del PNN Chingaza. Un rasgo que se presentó en todo el sistema fue la influencia de la variación climática en la biomasa del fitoplancton, ya que se identificaron concentraciones de clorofila *a* muy altas en estaciones de muestreo específicas y que disminuían rápidamente entre un muestreo y otro, a este tipo de cambios se les denomina “pulsos” [17].

Durante las épocas de altas precipitaciones, se identificaron bajas temperaturas en el agua y aumento de la nubosidad, hechos que se vieron reflejados en bajas tasas de fotosíntesis; condición opuesta se presentó en épocas de bajas precipitaciones donde la temperatura y las condiciones de luz o menor nubosidad (anotaciones realizadas en el momento del muestreo dentro de un formato de observaciones) fueron favorables para el crecimiento fitoplanctónico y la eficiencia fotosintética.

Se identificaron pulsos traducidos en altas densidades de biomasa fitoplanctónica medida a partir de la clorofila *a* en las tres lagunas para épocas con bajas precipitaciones, lo que responde a la influencia de la variabilidad climática en la concentración de clorofila *a*.

Con el fin de identificar y evidenciar la influencia de las épocas climáticas en la productividad primaria de las lagunas, se analizaron por separado los datos para los muestreos que se realizaron en época de altas precipitaciones y en bajas precipitaciones. Las tres lagunas muestran un comportamiento similar con respecto a la clorofila *a* y productividad en el cual se observa como el comportamiento climático influye en la eficiencia de la fotosíntesis fitoplanctónica.

Analizando la media para las épocas de bajas precipitaciones, se observan altos niveles de PPN y clorofila *a* con respecto a los muestreos que se realizaron en época de altas precipitaciones. Para la laguna El Medio se observó un comportamiento contrario que el anteriormente mencionado para la concentración de clorofila *a*, pero analizando la desviación estándar de la misma variable para la época 1, se identifica gran variabilidad en los datos debido a un pico de clorofila *a* que aumenta considerablemente la media de dicha concentración.

Tabla 7 Estadísticos descriptivos de productividad para las tres lagunas.

Laguna	Variable	Época de lluvias		Epoca seca.	
		Media	Desviación	Media	Desviación
Arnical	PPN(mg C m ⁻³ h ⁻¹)	57.6563	37.97578	89.3750	55.36424
	Chl a (mg m ⁻³)	6.6013	6.35645	7.9417	7.59994
El Medio	PPN(mg C m ⁻³ h ⁻¹)	60.9375	45.34466	88.1250	90.75676
	Chl a (mg m ⁻³)	11.6125	11.14923	6.2367	2.76314
Chingaza	PPN(mg C m ⁻³ h ⁻¹)	60.9375	62.52755	81.4583	122.92711
	Chl a (mg m ⁻³)	4.8985	2.44756	5.8991	2.75578

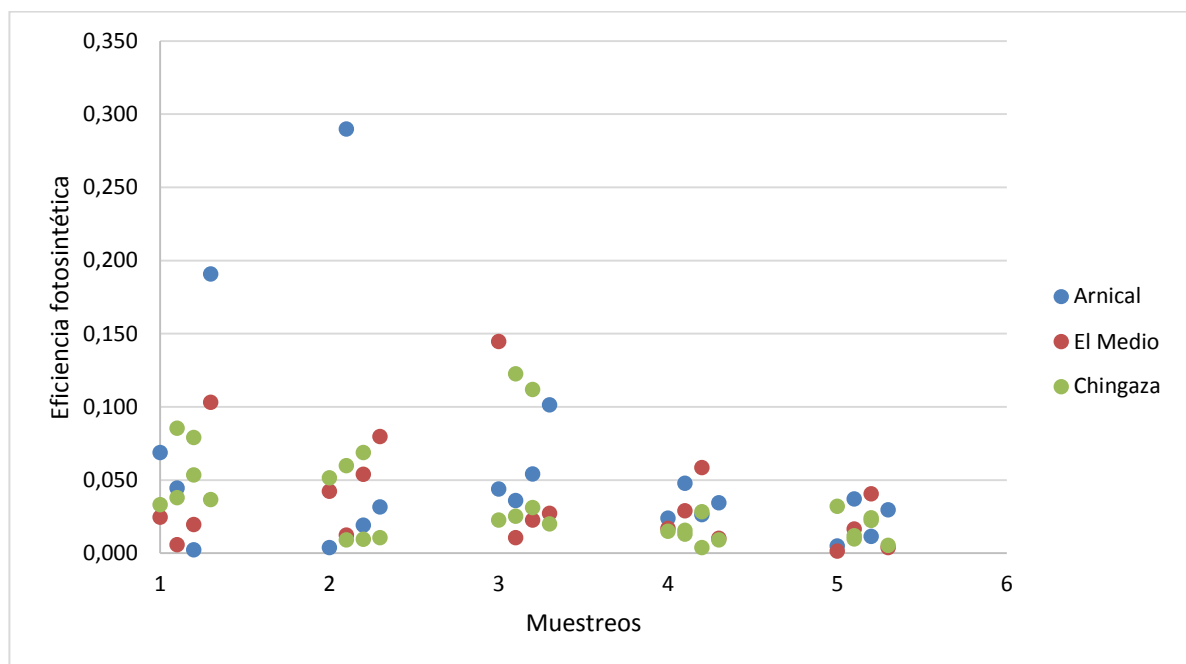
Fuente: Los autores.

Se corrió un análisis de correlación por medio del método de Spearman debido a que los datos de PPN no tienen una distribución normal, razón por la cual se realizó una prueba no paramétrica con el fin de identificar dependencia entre las variables PPN y la clorofila *a* entre las tres lagunas para las dos épocas climáticas en las cuales se realizó el muestreo. A partir de esta metodología donde se separaron las variables por época de muestreo, se identificó una correlación de

0.755 para laguna del Arnical entre las variables clorofila *a* y PPN para época de bajas precipitaciones, lo que permite identificar una fuerte dependencia entre estas variables.

Se realizó el cálculo de la eficiencia fotosintética con el fin de analizar la relación existente entre la PPN y la clorofila *a* e identificar por cada miligramo de clorofila *a* cuanto carbono se fija en las lagunas de estudio. Como se evidencia en la ilustración 18, se realizó el cálculo para cada muestreo y cada laguna, distribuyendo los puntos sobre el eje x dependiendo de la hora en que fue tomada la muestra, teniendo en cuenta que para todas las lagunas, los muestreos se realizaron a la misma hora.

Ilustración 18 Eficiencia fotosintética en los tres sistemas lagunares.



Fuente: los autores.

Como se mencionó anteriormente, se realizaron dos muestreos en época de lluvia (M1 y M5) y tres en época seca (M2, M3 y M4); ahora bien, en la gráfica se identifica que para M1, muestreo realizado en septiembre del 2014, la eficiencia fotosintética en las tres lagunas es mayor que para M5, muestreo realizado en mayo del 2015; a pesar de que ambos muestreos se realizaron en épocas de lluvia, se debe tener en cuenta el efecto de la escorrentía para los dos momentos, pues en M1, la época de lluvias está por finalizar y en consecuencia, las entradas de materia orgánica alóctona a los sistemas es mayor, razón por la cual la eficiencia fotosintética es mayor.

A partir del cálculo de eficiencia fotosintética, en el cual se tuvieron en cuenta las horas de muestreo, se identificó como la eficiencia aumenta a medida en que pasan las horas en el día, momentos en el cual la radiación solar se hace mayor. De igual forma, se identificó que es mayor la eficiencia en la laguna del Arnical y que la laguna Chingaza junto con la laguna El Medio, mantienen valores de eficiencia muy cercanos entre sí.

En lo que respecta a la fijación de carbono de parte de los ecosistemas de estudio, se identificó que su potencial de producción de carbono es de $335.891,3 \text{ mg C m}^{-3} \text{ año}^{-1}$ para la laguna del Arnical, $338.355 \text{ mg C m}^{-3} \text{ año}^{-1}$ para la laguna El Medio y $320.835 \text{ mg C m}^{-3} \text{ año}^{-1}$ para la laguna de Chingaza; en consecuencia, la conservación de estos ecosistemas se hace importante a la hora de fijar y almacenar carbono, función amortiguadora frente al cambio climático.

Ahora bien, en cuanto al metabolismo de las lagunas, se evidenció en las mediciones de oxígeno disuelto que las concentraciones del mismo fueron bajas; en casos donde la fotosíntesis domina las concentraciones de oxígeno, se excede la saturación del mismo, sin embargo, en este caso donde es la respiración de las comunidades en las tres lagunas lo que domina, se presentan déficits de oxígeno pues se consume más de lo que se produce.

7. INFLUENCIA ALTITUDINAL EN LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA

La altitud es una variable que influye en muchos de los componentes que tienen los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres. En vista de esto, se planteó como una de las finalidades de este estudio, determinar cuál es la influencia de la altitud en el aumento o disminución de la productividad primaria por medio de las variables PPN y clorofila *a*.

Con el fin de identificar la incidencia que tiene la altitud sobre la productividad de los ecosistemas de estudio, se llevó a cabo en el software SPSS un análisis de las correlaciones entre las variables PPN y clorofila *a* con la altitud con el fin de determinar dependencia o independencia entre estas variables. Los resultados arrojados por este software se relacionan en la tabla 8.

Tabla 8 Correlaciones entre la PPN y la clorofila *a* con la altitud de las lagunas.

		PPN	Altura	Clorofila <i>a</i>
PPN	Correlación de Pearson	1	.023	.075
	Sig. (bilateral)		.850	.538
	N	70	70	70
Altura	Correlación de Pearson	.023	1	.205
	Sig. (bilateral)	.850		.089
	N	70	70	70
Clorofila <i>a</i>	Correlación de Pearson	.075	.205	1
	Sig. (bilateral)	.538	.089	
	N	70	70	70

Fuente: los autores.

En este caso, se tomaron los valores de clorofila *a* y PPN para cada punto de muestreo y se asoció con la altura del mismo, independientemente de la laguna; sin embargo, con el fin de identificar relaciones entre cada laguna con su respectiva altitud y productividad, también se realizó dicho análisis de forma individual, obteniendo coeficientes de correlación por debajo de 0.10, mostrando que no existe ninguna incidencia entre la altura y la productividad de las lagunas.

Como se observa en la tabla 8, la correlación entre las variables PPN y clorofila *a* con respecto a la altura a la cual se encuentran las lagunas no es significativa, es decir, no existe dependencia lineal entre estas variables por lo que se infirió que si se hubiesen presentado correlaciones dependerían de la estructura de la comunidad fitoplanctónica que sería variable en cada una de las lagunas.

Tabla 9 Coeficientes de correlación de Spearman.

			PPN	Clorofila a	Altura
Rho de Spearman	PPN	Coeficiente de correlación	1.000	.159	.205
		Sig. (bilateral)	.	.189	.088
		N	70	70	70
	Clorofila a	Coeficiente de correlación	.159	1.000	.013
		Sig. (bilateral)	.189	.	.917
		N	70	70	70
	Altura	Coeficiente de correlación	.205	.013	1.000
		Sig. (bilateral)	.088	.917	.
		N	70	70	70

Fuente: los autores.

También se realizó un análisis de correlación de Spearman (tabla 9), el cual identifica correlaciones no paramétricas, sin embargo, aunque se ve una pequeña relación con respecto a la variable PPN, ésta no es significativa. En consecuencia, se rechaza la hipótesis de la existencia de alguna dependencia altitudinal para la variabilidad de la productividad primaria en la zona de estudio.

8. RELACIÓN DINÁMICA ENTRE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA CON RESPECTO A LA TASA FOTOSINTÉTICA ENTRE LAS TRES LAGUNAS

Con el fin de entender la dinámica de los parámetros fisicoquímicos con respecto a la tasa fotosintética se aplica una correlación de Spearman para determinar la relación entre las variables medidas en campo y los resultados de clorofila *a* y productividad primaria de las lagunas; posteriormente se realiza el análisis de componentes principales que permite reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos, hallar las causas de la variedad y ordenarlas por importancia, permitiendo analizar la influencia de los parámetros fisicoquímicos y la productividad primaria en el ecosistema para cada una de las lagunas. Para poder aplicar este modelo, en primera instancia se presenta un análisis comparativo del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en cada una de las lagunas.

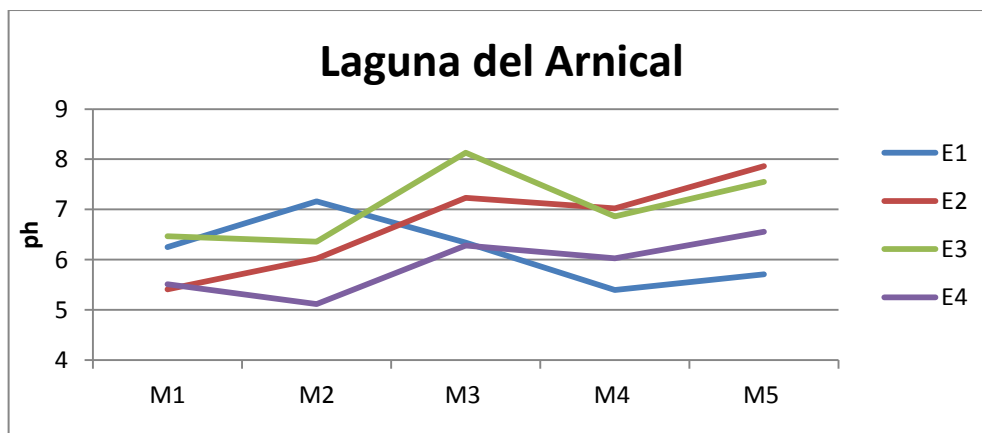
8.1 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

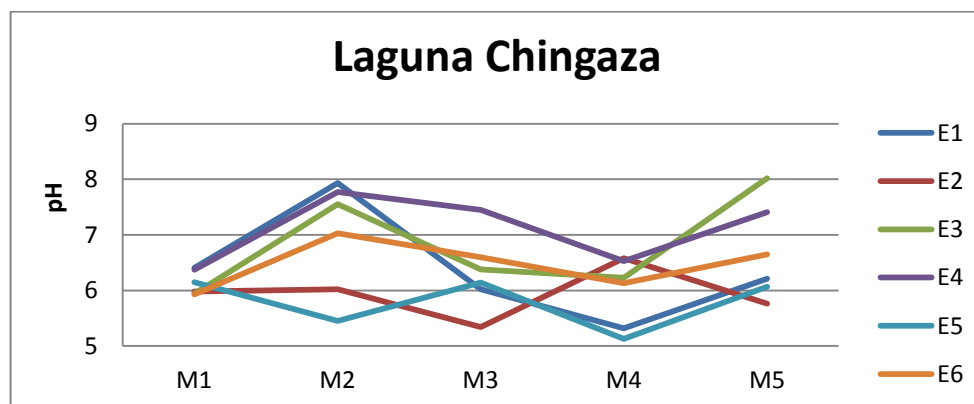
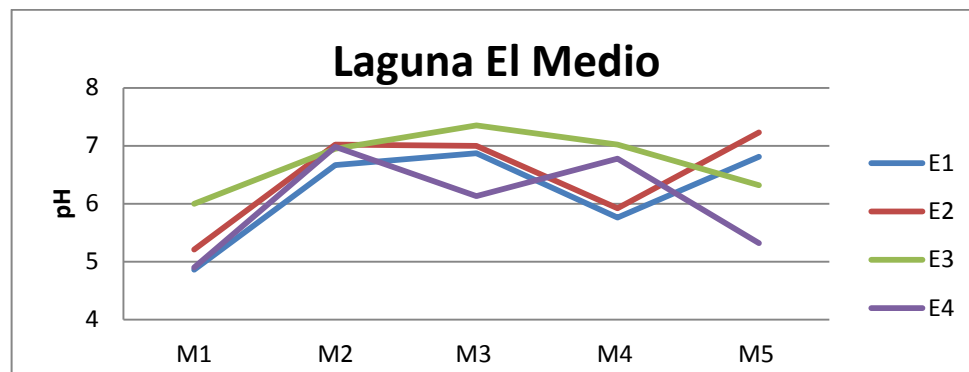
Por medio de la medición de los parámetros fisicoquímicos de las tres lagunas se pudieron determinar las condiciones de estos cuerpos de agua y describir las características generales en cuanto a la calidad del agua; para cada laguna se obtuvieron datos de pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y potencial redox cuyos valores se relacionan en el anexo A, el análisis se relaciona a continuación:

8.1.1 pH.

Es uno de los parámetros más utilizados para el análisis de calidad en cuerpos de agua y se mide el grado de alcalinidad o acidez, cuando se quiere determinar la especiación química y solubilidad de diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas en una laguna. Para el análisis de este estudio se obtuvieron los siguientes resultados [40]:

Ilustración 19. Gráfica de pH para las tres lagunas por muestreo.





Fuente: Los autores.

El pH en las tres lagunas presenta un comportamiento similar a lo largo de los 5 muestreos con valores entre 5 y 8.14, los cuales determinan un nivel entre levemente ácido y neutro para el sistema de las tres lagunas estudiadas. Estos niveles coinciden con las condiciones geológicas de la zona donde se establecen para este páramo suelos ácidos pobres en sílice, ricos en aluminio, con alta capacidad de absorción de agua, predominio de arcillas y sustancias húmicas muy ácidas y poco evolucionadas, convirtiéndose la composición de los suelos en uno de los factores más determinantes en el pH de cada una de las lagunas [12].

No se evidencia una variación significativa en los valores de pH para las tres lagunas y los diferentes muestreos realizados a excepción de la laguna de El Medio la cual presenta en su primer muestreo valores bajos respecto a las otras estaciones con valores de 4.7 a 6 esto posiblemente debido a cambios en las condiciones climáticas como la temperatura que afecta la constante de disociación del agua y por ende presenta cambios en las concentraciones de los iones de hidronio [40].

El nivel de pH en las lagunas del Arnical, El Medio y Chingaza si corresponde con los niveles establecidos y determinados en ecosistemas de páramo para lagunas de alta montaña cuyos valores oscilan entre 5 y 7 aproximadamente como se

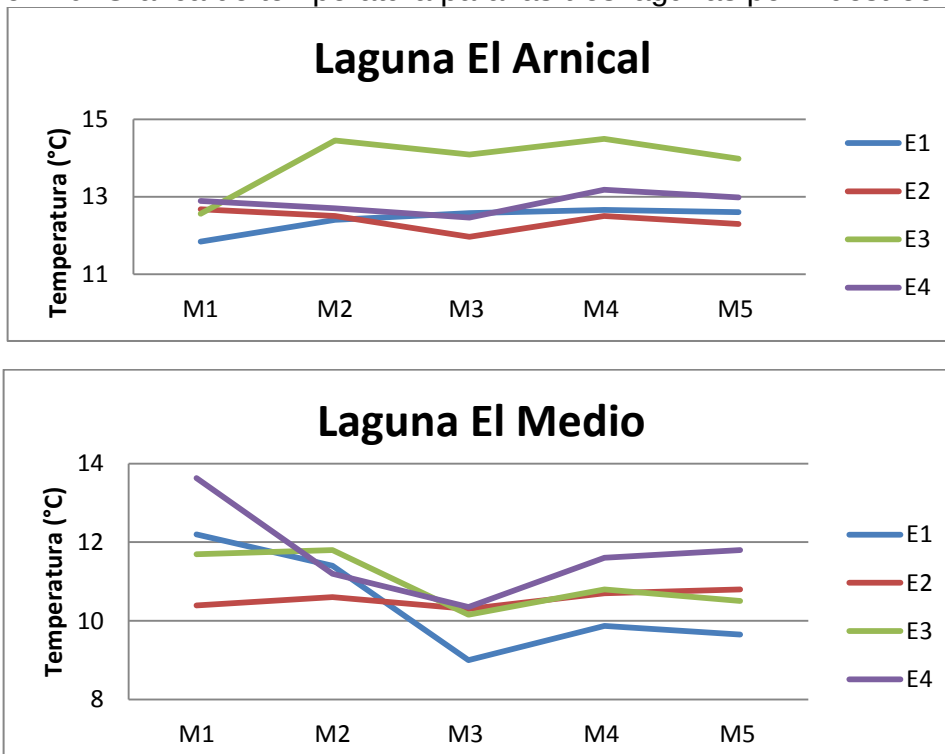
evidencia en estudios anteriores realizados a cuerpos de agua en el PNN Chingaza [13] [41].

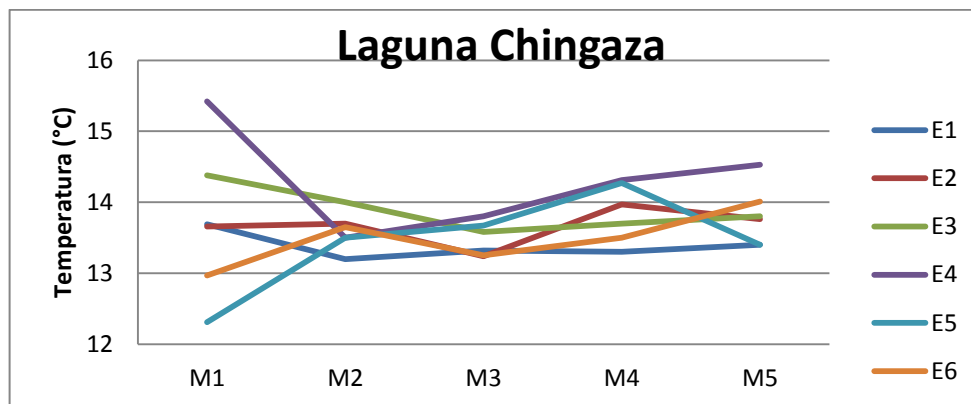
Los resultados presentan además el comportamiento de cada estación de muestreo y permiten establecer la variabilidad de los datos dentro de cada uno de los cuerpos de agua, es decir, si sus niveles de pH son o no similares en cada uno de los puntos de muestreo; para los valores obtenidos se puede determinar que las tres lagunas presentan diferencias de un punto de muestreo a otro especialmente las lagunas de Chingaza y Arnical con variaciones máximas por estación de 2.5 y 2.3 unidades de pH respectivamente, esto puede darse debido a la presencia de turberas y abundancia de ácidos en los suelos de algunas de las estaciones de muestreo con respecto a las otras [13] [31].

8.1.2 Temperatura.

La temperatura representa uno de los factores más importantes en el desarrollo del metabolismo de los diferentes ecosistemas debido a su influencia en los procesos biológicos esenciales como reproducción y crecimiento de todos los organismos vivos, de igual manera afecta representativamente otros factores como pH, densidad, solubilidad de los gases y viscosidad del sustrato [42]. Por lo anterior es importante su medición en este estudio en el cual se obtuvieron los siguientes resultados para las lagunas Arnical, El medio y Chingaza:

Ilustración 20. Gráfica de temperatura para las tres lagunas por muestreo.





Fuente: los autores

La temperatura de las lagunas de Chingaza, El Medio y Arnical presenta valores entre 9°C y 15.4°C con variaciones entre ellas; de acuerdo a las gráficas se evidencia que los valores de temperatura más altos se presentan en la laguna de Chingaza con picos de 15.4°C y los más bajos presentados en El Medio con temperaturas de 9°C a 13.5°C, mientras la laguna del Arnical mantuvo temperaturas entre 11.8°C y 14.4°C; esto debido a la diferencia altitudinal entre cada una de las lagunas ya que Chingaza, Arnical y El Medio se encuentran ubicadas a 3200, 3500 y 3700 msnm respectivamente lo que determina la disminución de temperatura en estos cuerpos de agua [31].

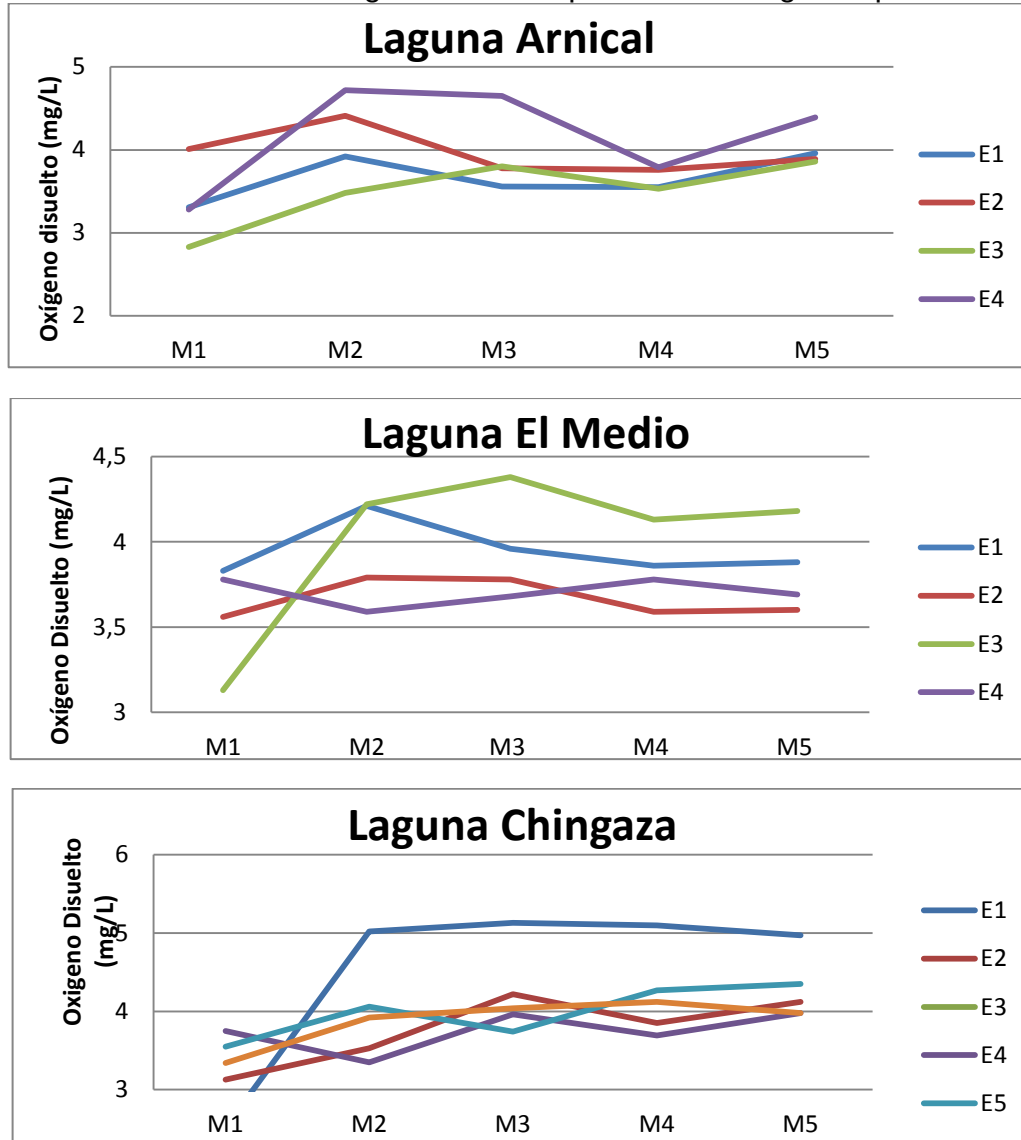
En las condiciones de temperatura entre estaciones de muestreo se evidenció en la laguna del Arnical un comportamiento con variaciones altas en E3 con respecto a las demás estaciones teniendo para todos los muestreos los niveles más altos de temperatura con valores mayores a 14°C; por otra parte, la laguna de Chingaza se presentó una variación alta en M1 ya que la temperatura obtuvo valores de 12.2 °C y 15.4°C con intervalos grandes mientras que en los siguientes 4 muestreos las estaciones se comportaron de manera homogénea en la laguna con valores de 13.5°C a 14.3°C.

8.1.3 Oxígeno disuelto.

Este componente es de vital importancia en los ecosistemas para el desarrollo y regulación de procesos de respiración, fotosíntesis, oxido-reducción y descomposición de materia orgánica, además, los niveles de concentración pueden determinar el crecimiento y desarrollo de los organismos que se encuentran en un cuerpo de agua por su tolerancia o no a los diferentes concentraciones; para el presente estudio fue esencial su medición debido a su estrecha relación con la productividad primaria y el desarrollo fitoplanctónico [43].

Se obtuvieron los siguientes datos de oxígeno disuelto para las tres lagunas:

Ilustración 21. Gráficas de Oxígeno Disuelto para las tres lagunas por muestreo.



Fuente: Los autores.

Las lagunas del Arnical, El Medio y Chingaza presentaron resultados con valores mínimos de 2.95 mg/L y máximos 5.2 mg/L, los niveles mínimos se obtuvieron en el primer muestreo M1 que se realizó en época de alta precipitaciones, a pesar que el oxígeno es notablemente bajo durante los 5 muestreos. El factor que afectó considerablemente M1 fueron las condiciones de lluvia constantes durante esta época lo que afectó el crecimiento fitoplanctónico, y la disminución de los nutrientes que limitaron la producción de oxígeno como se evidencia en las tres gráficas.

Para las tres lagunas se presentó un comportamiento similar con niveles bajos de oxígeno (3.1 mg/L a 4 mg/L) para el primer muestreo y un aumento durante los 4 muestreos restantes, sin embargo para la laguna de Chingaza se presentó una variación significativa para los niveles de la estación 1 donde aumenta significativamente la concentración de oxígeno disuelto de M1 (3.2 mg/L), con respecto a M2 (5 mg/L) donde se vuelve casi constante para los siguientes muestreos.

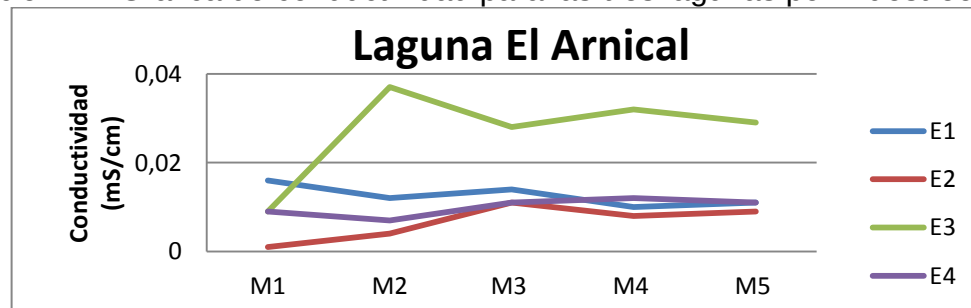
De acuerdo a los valores obtenidos por estación de muestreo se puede establecer que los picos más altos en las lagunas se dan en las estaciones de entrada y salida con valores máximos entre 3.7 mg/L y 5.26 mg/L, esto debido al cambio de velocidad y aireación que recibe el cuerpo de agua siendo el viento un factor determinante en la producción de oxígeno, sin embargo, los valores siguen siendo bajos con respecto al promedio de oxígeno disuelto para lagunas de alta montaña y de páramo donde se registran valores entre 6 y 8 mg/L [23].

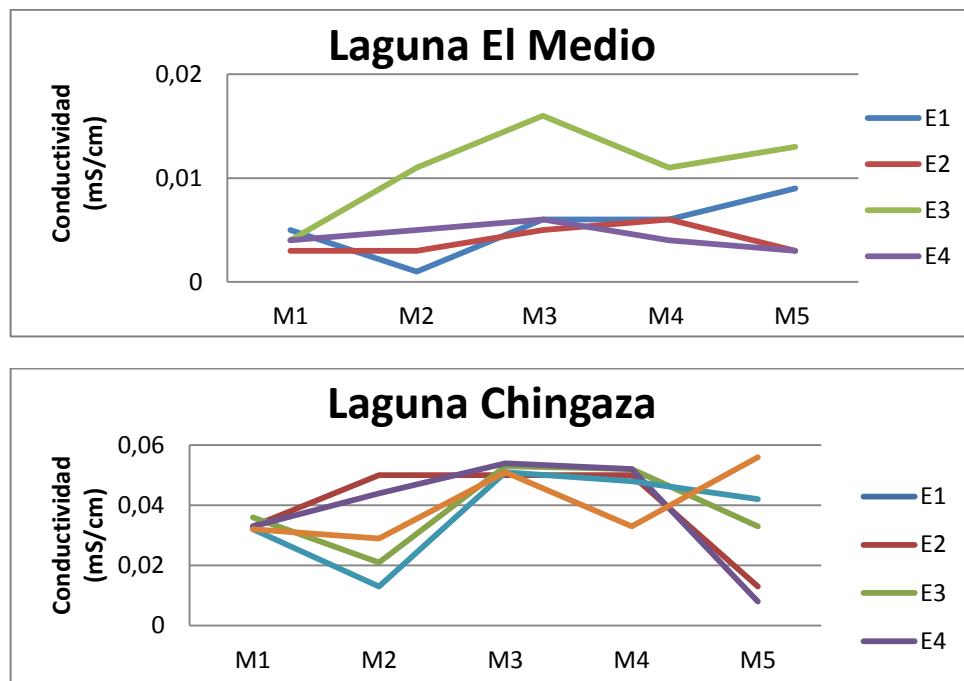
El comportamiento del oxígeno disuelto en general para el sistema de las tres lagunas presenta valores bajos e irregulares para sistemas naturales de alta montaña sin intervención, esto debido posiblemente a la cantidad de material disuelto proveniente de la vegetación asociada que se encontraba en la zona litoral donde se realizaron los respectivos muestreos [43] [44].

8.1.4 Conductividad.

La conductividad mide la capacidad que tiene una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica, esta capacidad va estar determinada por su concentración, movilidad, presencia de iones y temperatura ambiente [45]. Los niveles de conductividad para las tres lagunas fueron bajos, arrojando valores entre 0.001 mS/cm y 0.057 mS/cm, la laguna que presentó la conductividad más baja fue la laguna El Medio en un rango de 0.001 mS/cm y 0.02 mS/cm, con un comportamiento homogéneo durante los 5 muestreos excepto la estación de muestreo 3 que presenta valores de 0.004 mS/cm a 0.017 mS/cm mientras las demás estaciones presentan una variación 0.003 mS/cm a 0.0065 mS/cm [45].

Ilustración 22. Gráfica de conductividad para las tres lagunas por muestreo.





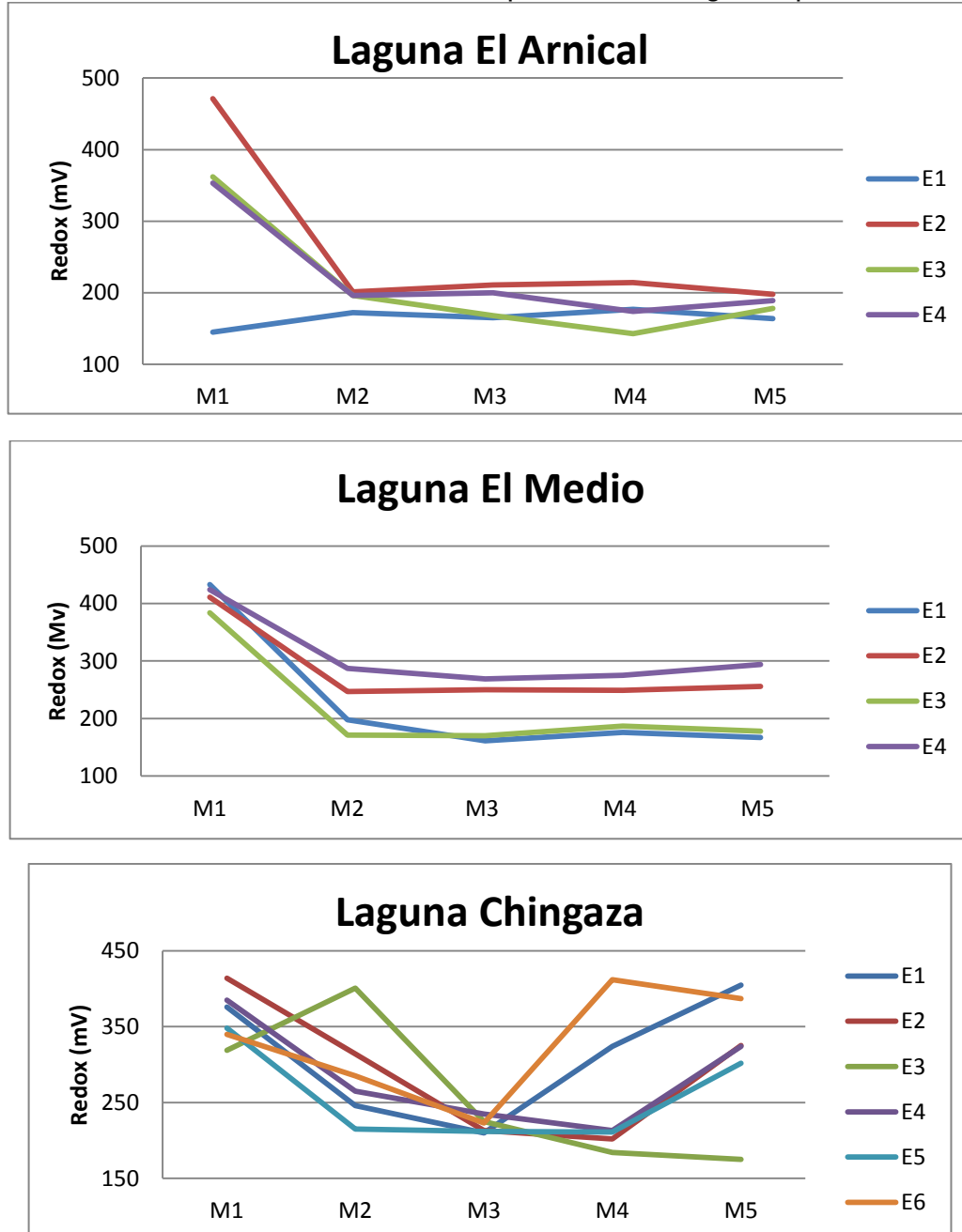
Fuente: Los Autores.

Los valores de conductividad más altos se presentaron en la laguna de Chingaza con picos de 0.059 mS/cm que a pesar de ser valores bajos son significativamente más altos que los registrados para las dos lagunas restantes. Todos los resultados obtenidos se encuentran por debajo de los valores de conductividad establecidos para lagunas de alta montaña y es debido a la pureza de las aguas y que no se ven afectadas por actividades antropogénicas y la influencia de factores como temperatura, presencia de iones y composición química de los suelos y cuerpos de agua [23].

8.1.5 Potencial redox

El potencial redox es un parámetro importante para determinar las condiciones de un cuerpo de agua ya que regula los cambios en la nutrición y fisiología de las especies dulceacuícolas, afectando su distribución, actividad metabólica y su función en los diferentes ecosistemas. Para el presente estudio se obtuvieron los siguientes resultados:

Ilustración 23. Gráfica de Potencial Redox para las tres lagunas por muestreo.



Fuente: Los autores.

Las tres lagunas presentaron valores del potencial redox con valores entre 148 mV y 470 mV, sin embargo este parámetro se conforma de manera irregular en la laguna de Chingaza donde las variaciones del potencial varían de un muestreo al otro, como se observa en la gráfica 22, para las dos lagunas restantes el comportamiento es similar entre si debido a que presentan en su primer muestreo

valores entre 400 y 500 mV y luego presentan una disminución considerable ubicando los 4 muestreos siguientes de 148 mV a 275 mV.

Cuando en un cuerpo de agua baja el potencial redox, se observa una disminución en la concentración de oxígeno disuelto, reducción de iones y moléculas importantes para la nutrición de microorganismos, por esto se puede establecer que los niveles del potencial redox en las tres lagunas se ven afectados por las bajas concentraciones que se presentaron de oxígeno disuelto para las mismas [34].

8.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

A continuación se exponen los resultados del Análisis de Componentes Principales, metodología que se realizó para cada laguna con el fin de analizarlas como sistemas individuales y finalmente, se realizó a nivel integral con el fin de identificar la relación entre las variables que se midieron y las tres lagunas.

8.2.1 Laguna del Arnical.

Se realizó el Análisis de Componentes Principales para la laguna del Arnical teniendo en cuenta las siguientes variables: respiración, PPN, PPB, clorofila *a*, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, pH, temperatura, potencial redox y conductividad. Como se puede observar en la tabla 10, la cual representa las comunalidades arrojadas como resultado del análisis, se evidencia que la conductividad, la respiración y la PPB se ven fuertemente explicadas por el modelo con valores cercanos a 1, es decir, éstas variables explican con mayor proporción la varianza según su participación en los componentes resultantes en el análisis.

Tabla 10 Comunalidades del ACP para laguna del Arnical.

Variables	Inicial	Extracción
Respiración	1.000	.892
PPB	1.000	.895
PPN	1.000	.728
Clorofila <i>a</i>	1.000	.579
DO	1.000	.665
% de Saturación	1.000	.695
pH	1.000	.735
Temperatura	1.000	.880
Redox	1.000	.732
Conductividad	1.000	.926

Fuente: los autores.

En la tabla 11 se evidencia la varianza total explicada para el análisis, considerando esta tabla se decidió que el modelo es explicado en un porcentaje del 77% por cuatro componentes, o según el *criterio de Kaiser*, el cual determina

que hay que conservar los componentes principales cuyos valores propios son mayores que 1 [46].

Tabla 11 Varianza explicada para el ACP de laguna del Arnical.

Componente	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	% acumulado
1	2.912	29.120	29.120
2	2.251	22.505	51.625
3	1.504	15.038	66.663
4	1.061	10.605	77.268
5	.928	9.278	86.545
6	.537	5.367	91.912
7	.401	4.009	95.921
8	.350	3.497	99.419
9	.058	.581	100.000
10	-4.220E-17	-4.220E-16	100.000

Fuente: los autores.

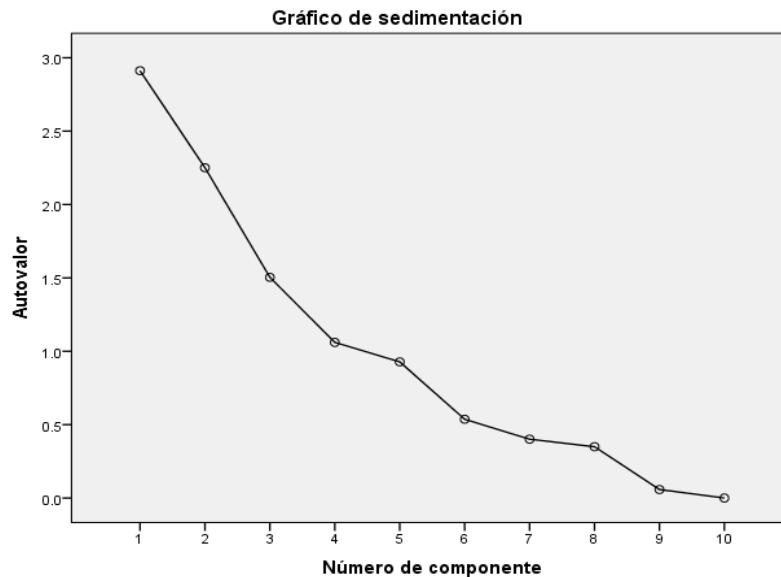
En la ilustración 23 se presenta el gráfico de sedimentación de los componentes el cual se utiliza como contraste gráfico para conocer el número de componentes que debe utilizarse. Según este gráfico se debe retener todos los componentes que se sitúen con mayores pendientes, lo que en el gráfico se ve representado hasta el cuarto componente.

Tabla 12 Matriz de componentes para la laguna del Arnical.

Variables	Componente			
	1	2	3	4
Respiración	.720	.351	.429	.258
PPB	.828	.456	.040	.009
PPN	.284	.232	.648	.417
Clorofila a	.045	.460	.036	.603
DO	.650	.321	.355	.117
% de Saturación	.031	.739	.350	.157
pH	.546	.051	.647	.126
Temperatura	.531	.635	.184	.401
Redox	.236	.524	.440	.456
Conductividad	.752	.569	.051	.182

Fuente: los autores.

Ilustración 24 Gráfico de sedimentación para el ACP de laguna del Arnical.



Fuente: los autores.

En la tabla 12 se representa la matriz de componentes, en ésta se evidencia la carga de cada variable para los cuatro factores donde los componentes con valores más elevados indican una relación más estrecha con las variables, estos valores se encuentran sombreados con el fin de identificar que variables son explicadas por cada componente. El primer componente explica las variables respiración, PPB, oxígeno disuelto y conductividad; el segundo componente representa la variable de porcentaje de saturación de oxígeno, temperatura y potencial redox; el tercer componente representa las variables PPN y pH y el último componente relaciona la variable clorofila *a*.

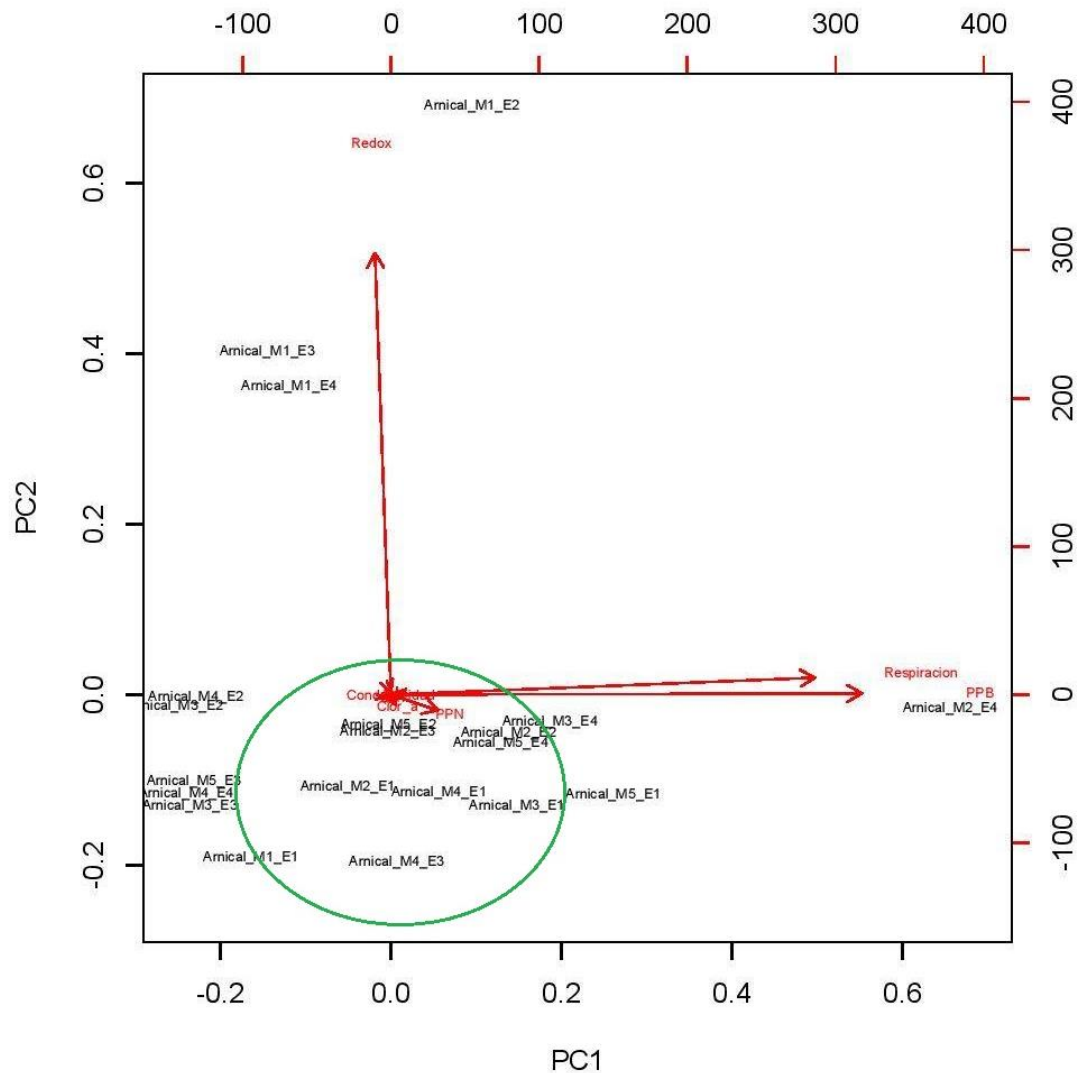
En el gráfico Biplot (ilustración 24) se puede analizar tanto el peso de las variables dentro del modelo como los muestreos dentro de esta combinación, es decir, en el Biplot se gráficán tanto las mediciones realizadas para cada muestreo y estación como las variables de análisis. Para la laguna del Arnical se identifica que las variables que mejor explican el comportamiento de la laguna son la respiración, la PPB y el potencial redox, lo que en la gráfica se evidencia por la longitud de sus vectores, las cuales son considerablemente mayores con respecto a las otras variables.

También se puede observar la fuerte relación que existe entre la respiración y la PPB, donde se evidencia que el aumento de una de estas variables influye en el aumento de la otra. Así mismo, se identifica que el potencial redox es perpendicular con respecto a la respiración y la PPB, lo que indica que son parámetros que se encuentran en componentes diferentes y explican el mayor porcentaje de la variabilidad total de la laguna del Arnical con respecto a las

variables medidas. Es importante mencionar que las dos variables que se identifican en la dimensión de PC1 (PPB y respiración) son de mayor importancia que el potencial redox, el cual se identifica en la dimensión PC2, pues este componente es de menor importancia con respecto al que se gráfica horizontalmente.

Para ésta laguna se evidencia como el potencial redox marca fuertemente el comportamiento del sistema con respecto a las demás variables junto con la respiración y la PPB, sin embargo, no se puede afirmar que éstas variables marquen el comportamiento metabólico de esta laguna pues es pequeña la variación explicada por los dos primeros componentes.

Ilustración 25 Gráfico Biplot para laguna del Arnical.



Fuente: los autores.

En general se identifica una distribución de los datos donde las variables mejor explicadas son la respiración y la PPB, sin embargo, se observa que para el M1, el componente que marca la variabilidad es PC2, es decir, la variable del potencial redox; para ésta fecha de muestreo se identificaron los valores mas altos para esta variable lo que indica que se favorecieron las reacciones de oxidación, motivo por el cual para este muestreo puede existir una distribución en el plano diferente que para los otros muestreos. También se evidencia que para la estación de muestreo 4 en M2, los datos se alejan del conjunto, lo que podría estar representado en algún sesgo para esta fecha y estación de la laguna.

8.2.2 Laguna El Medio.

El Análisis de Componentes Principales para la laguna El Medio se realizó teniendo en cuenta las siguientes variables: respiración, PPN, PPB, clorofila a, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, pH, temperatura, potencial redox y conductividad. En la tabla 13 se representan las comunalidades que arrojaron la técnica utilizada y se evidencia que la PPB, clorofila a y PPN tienen altos valores lo que indica que los componentes explican casi totalmente estas variables; también se evidencia un bajo valor en pH, sin embargo, su valor indica que igual esta variable participa, aunque en menor medida, en la explicación de dicha varianza.

Tabla 13 Comunalidades del ACP para laguna El Medio.

Variables	Inicial	Extracción
Respiración	1.000	.738
PPB	1.000	.986
PPN	1.000	.844
Clorofila a	1.000	.866
DO	1.000	.807
% de Saturación	1.000	.725
pH	1.000	.604
Temperatura	1.000	.717
Redox	1.000	.847
Conductividad	1.000	.721

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Fuente: los autores.

La varianza total explicada se ve representada en la tabla 14, a partir de estos valores y el *criterio de Kaiser* se decidió que se van a conservar los primeros cuatro componentes, los cuales explican un 78.5% de la varianza total. A partir de la tabla se puede observar que a partir del componente cuatro, el autovalor comienza a ser inferior a la unidad aunque con un valor alto, sin embargo, el porcentaje de la varianza explicada es lo suficientemente alto para estimar que cuatro es el número de componentes suficientes para explicar la varianza total.

Tabla 14 Varianza explicada para el ACP de la laguna El Medio.

Componente	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	% acumulado
1	3.212	32.122	32.122
2	2.209	22.089	54.211
3	1.370	13.704	67.915
4	1.062	10.625	78.540
5	.714	7.139	85.679
6	.628	6.283	91.962
7	.402	4.021	95.983
8	.273	2.729	98.712
9	.129	1.288	100.000
10	7.458E-17	7.458E-16	100.000

Fuente: los autores.

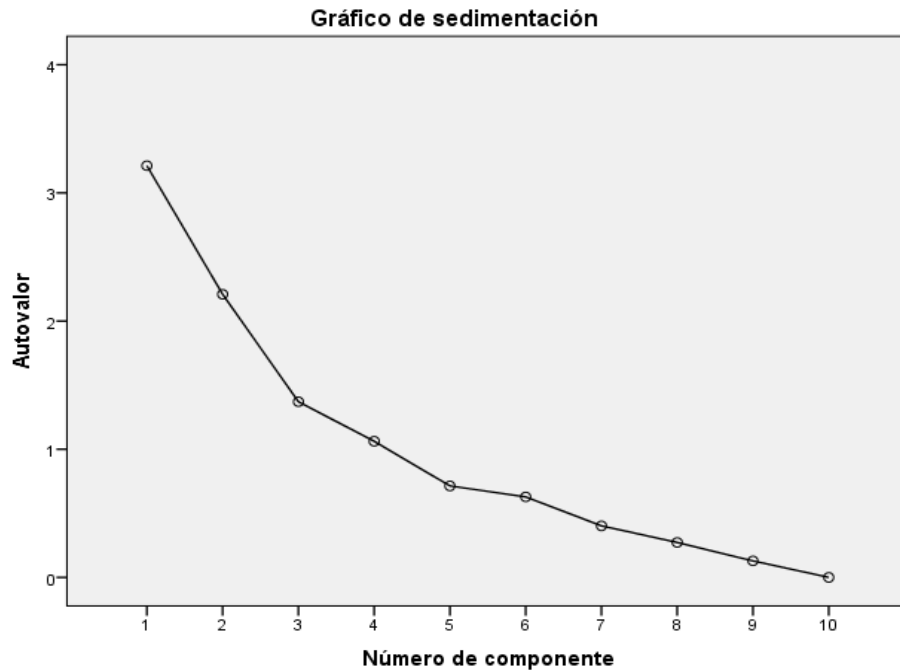
Utilizando el gráfico de sedimentación (ilustración 25) como herramienta gráfica para confirmar el número de componentes utilizados para el análisis, se identifica que la pendiente se reduce considerablemente en el tercer componente, sin embargo, la disminución de esta inclinación es más evidente después del cuarto componente, motivo por el cual se confirmó el uso de los primeros cuatro componentes.

Tabla 15 Matriz de componentes para la laguna El Medio.

Variables	Componente			
	1	2	3	4
Respiración	.303	.717	.166	.323
PPB	.498	.836	.193	.049
PPN	.467	.645	.365	.276
Clorofila a	.238	.110	.264	.853
DO	.620	.418	.478	.138
% de Saturación	.320	.001	.787	.059
pH	.729	.067	.098	.243
Temperatura	.694	.071	.463	.127
Redox	.857	.242	.040	.229
Conductividad	.604	.570	.172	.044

Fuente: los autores.

Ilustración 26 Gráfico de sedimentación para el ACP de laguna El Medio.



Fuente: los autores.

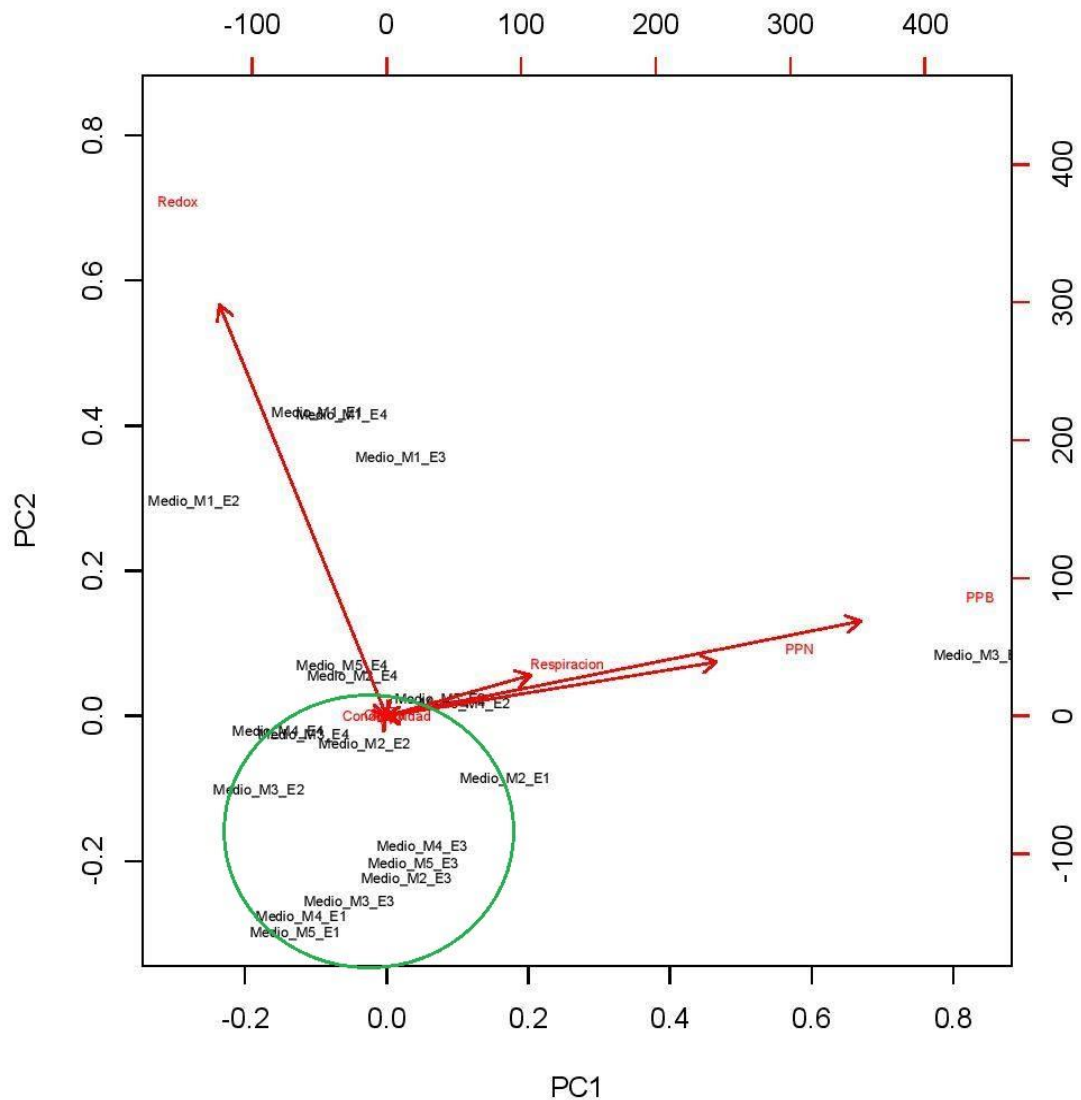
A partir de la matriz de componentes (tabla 15), se evidencia la carga de cada variable dentro de cada uno de estos, donde los que se encuentran sombreados son los valores más altos y en consecuencia, los componentes que explican cada variable. Así que el primer componente explica la concentración de oxígeno disuelto, el pH, la temperatura, el potencial redox y la conductividad, siendo el componente que más variables incluye. El segundo componente explica la respiración, PPB, y PPN; el tercero la saturación de oxígeno y el cuarto hace referencia a la concentración de clorofila *a*.

En el gráfico Biplot (ilustración 26) se identifican los vectores con mayor longitud, los cuales hacen referencia a las variables PPN, PPB, potencial redox y en menor medida, respiración, lo que evidencia que la carga de estas variables es mayor con respecto a las demás, dentro del modelo. Debido a que CP1 es el componente que explica en un mayor porcentaje la varianza total, los vectores que se distribuyen horizontalmente tienen mayor importancia dentro del modelo. Al analizar el punto (0,0) del gráfico se identifica que los vectores asociados a las otras variables medidas tienen una mínima longitud, lo que evidencia que en los primeros dos componentes cuyos porcentajes de explicación de la varianza son mayores, estas variables no tienen mayor participación.

A nivel general, se identifica que la nube de dispersión de los datos se encuentra en el tercer cuadrante del plano con la excepción de M1 y M3-E1, lo que significa

que la mayoría de los datos se diferencian entre ellos por los cambios medidos en el potencial redox y en menor medida (por su distribución horizontal) por la productividad.

Ilustración 27 Gráfico Biplot de la laguna El Medio.



Fuente: los autores.

En cuanto a la distribución vertical de los datos, se puede observar que E3 y E1 poseen un comportamiento diferente con respecto a las otras dos estaciones de muestreo, esta diferencia se ve marcada por el potencial redox pues separa verticalmente estos puntos; así mismo, estas primeras estaciones evidencian

valores mayores de productividad con respecto a las otras, hecho que se ve gráficamente ilustrado por su distribución horizontal hacia la derecha. Se observa que M3 para la estación uno tuvo observaciones diferentes en relación a las variables medidas con respecto a los demás muestreos y estaciones. De igual manera se identifica que M1 en cuanto a todas sus estaciones, fue influenciado en cuanto al comportamiento de la laguna por el potencial redox.

8.2.3 Laguna Chingaza.

Las comunalidades (tabla 16) arrojadas evidencian bajos valores de extracción a nivel general en comparación con las otras dos lagunas; sin embargo, se obtienen altos valores para la PPB, PPN, y concentración de oxígeno disuelto. Contrario a esto, el coeficiente para pH es muy bajo, lo que evidencia que el aporte de esta variable a la varianza total explicada es pequeño en comparación a las demás variables.

Tabla 16 Comunalidades del ACP para la laguna Chingaza.

Variables	Inicial	Extracción
Respiración	1.000	.653
PPB	1.000	.922
PPN	1.000	.856
Clorofila a	1.000	.788
DO	1.000	.859
% de Saturación	1.000	.760
pH	1.000	.351
Temperatura	1.000	.675
Redox	1.000	.553
Conductividad	1.000	.824

Fuente: los autores.

A partir de la varianza total explicada (tabla 17) se identifica que los primeros cuatro componentes explican la varianza del modelo con un porcentaje del 72.4%, además se seleccionan por sus autovalores (según el *criterio de Kaiser*), que son mayores a la unidad.

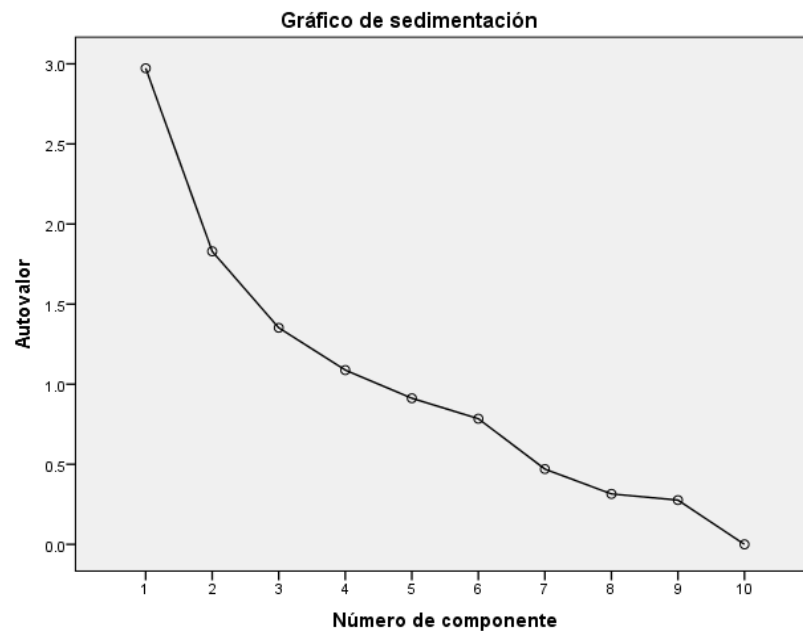
Teniendo en cuenta el gráfico de sedimentación (ilustración 27) como un mecanismo gráfico para identificar la cantidad de componentes que explican la varianza total en un porcentaje significativo, se identifica que el descenso disminuye a partir del cuarto componente, es decir, la pendiente se hace menos pronunciada a partir de ese punto.

Tabla 17 Varianza explicada para el ACP de laguna Chingaza.

Componente	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	% acumulado
1	2.973	29.726	29.726
2	1.829	18.294	48.019
3	1.352	13.521	61.540
4	1.088	10.881	72.421
5	.912	9.122	81.543
6	.785	7.846	89.389
7	.470	4.700	94.089
8	.315	3.148	97.236
9	.276	2.764	100.000
10	-6.821E-17	-6.821E-16	100.000

Fuente: los autores.

Ilustración 28 Gráfico de sedimentación para laguna Chingaza.



Fuente: los autores.

Con el fin de identificar que componentes explican las variables de estudio, se analizó la matriz de componentes y se sombrearon los coeficientes más altos para cada variable, los cuales representan el componente que mejor explica los datos, es decir, los factores con valores más elevados indican una relación más estrecha

con las variables. El primer componente contiene la mayor cantidad de variables: respiración, PPB, PPN y potencial redox. El segundo componente comprende el porcentaje de saturación de oxígeno y pH, el tercero abarca la concentración de oxígeno disuelto en la laguna y la conductividad de la misma; por último, el cuarto componente incluye la concentración de clorofila a y la temperatura. Como se evidenció con la matriz de comunalidades y se puede observar en la matriz de componentes, la variable pH no tiene una buena exposición en ningún componente y por ende no existe una relación significativa con alguno de ellos.

Tabla 18 Matriz de componentes para laguna Chingaza.

Variables	Componente			
	1	2	3	4
Respiración	.759	.217	.130	.113
PPB	.928	.238	.036	.047
PPN	.750	.499	.148	.150
Clorofila a	.453	.163	.167	.727
DO	.313	.417	.727	.243
% de Saturación	.264	.767	.256	.190
pH	.120	.446	.343	.142
Temperatura	.397	.389	.151	.586
Redox	.506	.464	.283	.044
Conductividad	.413	.350	.685	.248

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Fuente: los autores.

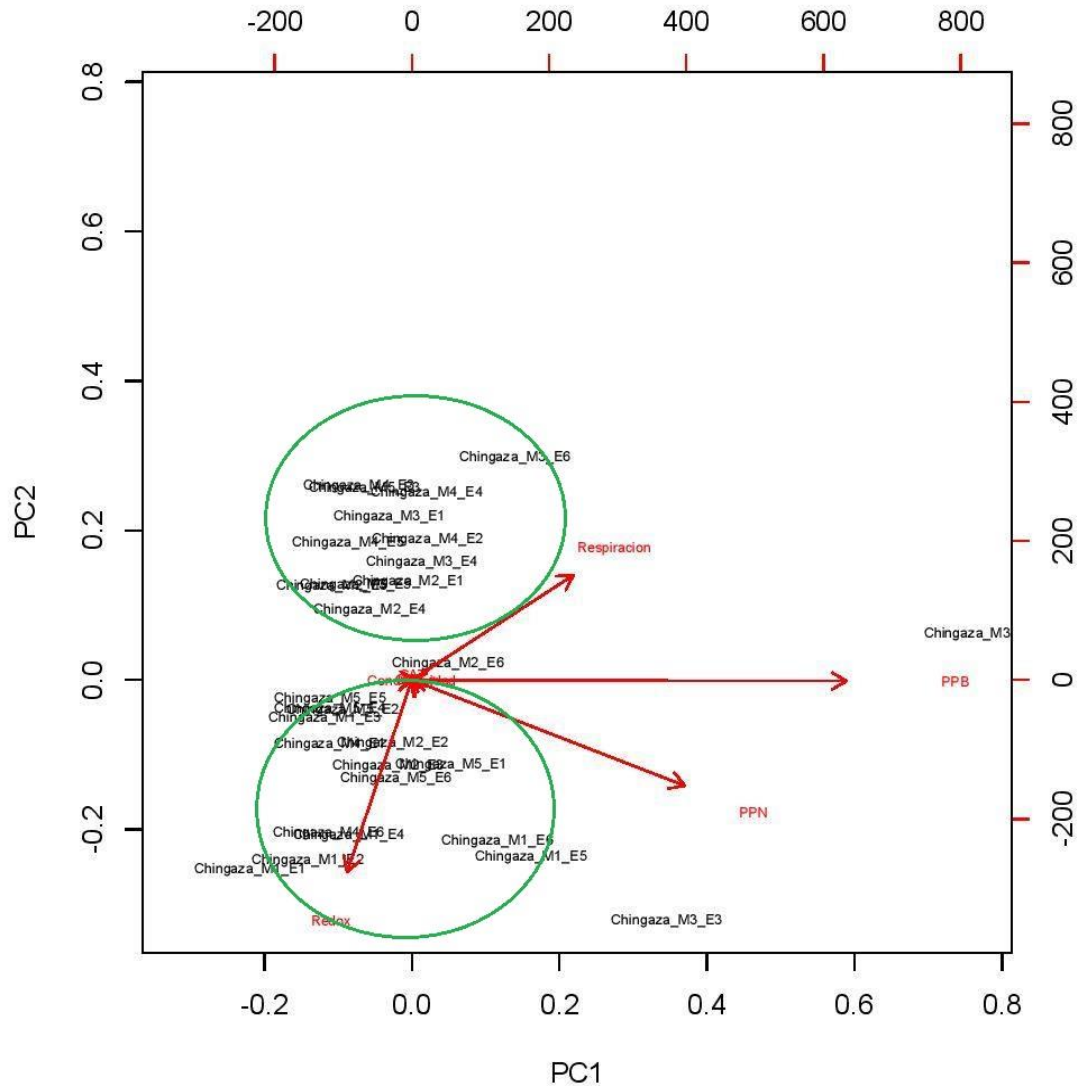
En el gráfico Biplot (ilustración 28) se observan las variables que dominan en el modelo por la longitud de sus vectores los cuales hacen referencia al potencial redox, respiración, PPN y PPB, en consecuencia, la carga de estas variables es mayor con respecto a las demás para la laguna Chingaza. Teniendo en cuenta que CP1 es el componente con mayor porcentaje de explicación sobre la varianza, se evidencia la importancia de la PPB sobre todo el sistema; en cuanto a longitud, el vector que le sigue es la PPN tomando dirección hacia el cuarto cuadrante del gráfico.

En cuanto a la nube de dispersión de los datos, se identifican dos grupos que se separan por los vectores de respiración y potencial redox, es decir, PC2 marca la diferencia de estos dos conjuntos. En el primer grupo se observan de forma dominante los valores de M2 y M4, así como en el segundo se identifican M1 y M5, donde este último se dispersa sobre el vector de potencial redox.

Para los datos de las estaciones de M3, se evidencia gran dispersión a nivel general de gráfico donde los vectores de respiración, PPN y PPB separan a nivel espacial éstas estaciones; sin embargo, los otros muestreos mantienen unión entre sus estaciones.

Ahora bien, al analizar el punto (0,0) del gráfico se identifica que los vectores asociados a las variables restantes mantienen una longitud mínima, lo que se evidencia en el gráfico por la cantidad de información (color rojo) que se observa en el punto central.

Ilustración 29 Gráfico Biplot para laguna Chingaza.



Fuente: los autores.

8.2.4 Análisis integral.

Para el análisis de componentes principales para el sistema de las tres lagunas se tuvieron en cuenta todas las variables fisicoquímicas, la productividad primaria

bruta, neta y los resultados de clorofila *a*, según se muestra en la tabla 19 de comunalidades, se estableció que las variables Productividad primaria bruta, productividad primaria neta y temperatura son significativamente explicadas por el modelo porque sus valores están más cercanos a 1, lo que indica que explican en mayor proporción la varianza según la incidencia de estos en los componentes que resultan en el análisis; se puede establecer además que los valores de extracción de las comunalidades para las diferentes variables son altos con valores mayores a 0.5 infiriendo que todas son estas son en ciertos porcentajes explicados por el modelo en los componentes del análisis.

Tabla 19 Comunalidades del ACP integral.

Variables	Inicial	Extracción
Respiración	1.000	.687
PPB	1.000	.987
PPN	1.000	.832
Clorofila <i>a</i>	1.000	.825
DO	1.000	.717
% de Saturación	1.000	.718
pH	1.000	.762
Temperatura	1.000	.856
Redox	1.000	.736
Conductividad	1.000	.810

Fuente: los autores.

En la tabla 20 se evidencia la varianza total explicada para el análisis de componentes integral para las tres lagunas, se puede concluir con esta tabla que el modelo es explicado en un 79.3 % por cinco componentes como se observa en la columna del % acumulado del modelo, considerando que se deben conservar los componentes cuyos valores sean mayor a la unidad según el *criterio de Kaiser* [46].

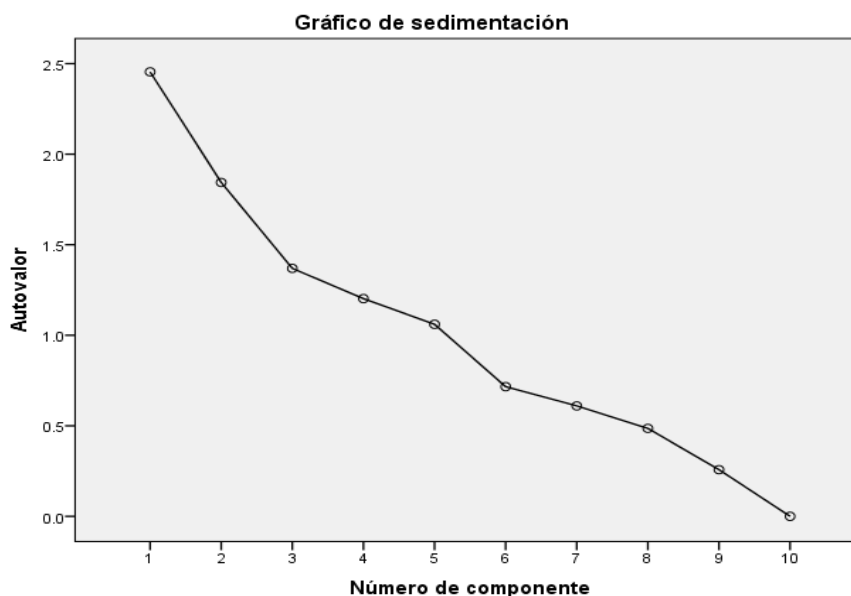
Los componentes resultantes del análisis pueden ser tantos como variables se introduzcan al modelo pero para observar el comportamiento de estos componentes y determinar cuales son necesarios para explicar significativamente el modelo se analiza el gráfico de sedimentación como el que se muestra en la ilustración 29, en donde se escogen los componentes con mayores pendientes en este caso el gráfico presenta variaciones grandes hasta el quinto componente donde empiezan a disminuir las pendientes.

Tabla 20 Varianza explicada para el ACP integral.

Componente	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	% acumulado
1	2.454	24.544	24.544
2	1.844	18.439	42.983
3	1.369	13.693	56.677
4	1.202	12.024	68.701
5	1.061	10.606	79.307
6	.716	7.160	86.467
7	.610	6.099	92.566
8	.486	4.856	97.423
9	.258	2.577	100.000
10	-3.876E-17	-3.876E-16	100.000

Fuente: los autores.

Ilustración 30 Gráfico de sedimentación para las tres lagunas.



Fuente: los autores.

Como se pudo observar en los ACP independientes para las tres lagunas se realizó el análisis con respecto a la matriz de componentes evaluando la carga de cada variable para los distintos componentes cuyos valores más altos indicaron relación más estrecha con las variables; para este caso del análisis general del sistema de las tres lagunas, los valores de los componentes para cada variable no son fáciles de interpretar, razón por la cual se utilizó la matriz de componentes rotados significativos, ésta matriz toma los valores más altos para cada variable y

los aproxima a la unidad, así como los valores sobrantes los aproxima a cero, de esta manera se facilita la interpretación de los factores. [46]. En la tabla 21 se evidencian las variables que son explicadas por cada componente y comprenden los valores más altos, el primer componente explica significativamente a las variables PPB Y PPN; el segundo componente la temperatura y la conductividad; el tercer componente determina la respiración, oxígeno disuelto y porcentaje de saturación; el cuarto interpreta el pH y el potencial redox; finalmente el ultimo componente explica la variable clorofila a.

Tabla 21 Matriz de componentes rotados de las tres lagunas.

Variables	Componente				
	1	2	3	4	5
Respiración	.573	.092	.586	.068	.054
PPB	.962	.035	.244	.012	.040
PPN	.890	.030	.163	.042	.105
Clorofila a	.099	.149	.091	.021	.885
DO	.040	.046	.834	.056	.123
% de Saturación	.072	.434	.591	.028	.418
pH	.129	.102	.096	.833	.178
Temperatura	.137	.900	.048	.159	.024
Redox	.153	.090	.251	.742	.303
Conductividad	.127	.843	.066	.228	.163

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.

a. La rotación ha convergido en 6 iteraciones.

Fuente: los autores.

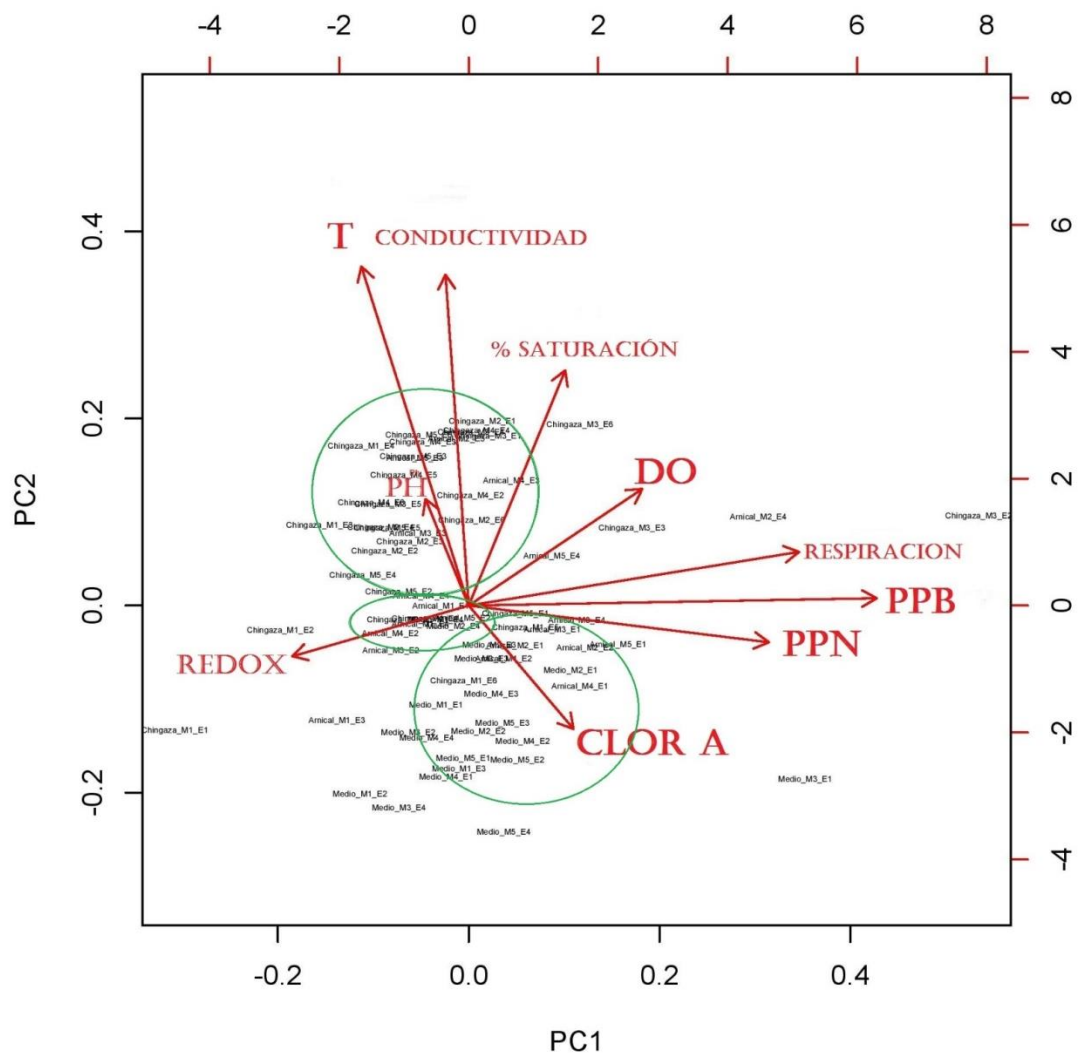
En el gráfico Biplot de la ilustración 30, se identificó con facilidad las 10 variables estudiadas a diferencia de los gráficos individuales para cada laguna. A nivel del PC1, componente que explica con mayor porcentaje la varianza, se identificaron las variables de productividad y respiración con mayor dominancia con respecto a las demás. De igual manera, a nivel vertical en CP2 se identificó que la temperatura y conductividad como vectores son sobresalientes entre las demás variables.

Se identificó a partir de la dirección de los vectores que algunas variables son contrarias, es decir, la correlación entre éstas variables es inversa; por ejemplo, la temperatura junto con la conductividad manejan una dirección positiva y contraria con respecto a la concentración de clorofila a, ésta última variable está representada con un vector de menor longitud con respecto a las otras dos variables, lo que indica menor carga de la misma sobre el modelo general; situación similar se evidencia entre la respiración y la concentración de oxígeno disuelto cuyas direcciones están dirigidas al primer cuadrante, es decir, son

vectores positivos, en comparación con el potencial redox que se encuentra en el tercer cuadrante.

En cuanto a las lagunas se observa que se diferencian por la temperatura en mayor medida (la longitud del vector de esta variable es mayor), así como la conductividad, el pH y la clorofila a. Sin embargo, el factor que está influyendo en la separación de esta nube de datos es la altitud; la laguna Chingaza está en comparación con las otras lagunas en una posición inferior a nivel altitudinal y en el nivel superior se encuentra la laguna El Medio, quedando en la mitad la laguna del Arnical.

Ilustración 31 Gráfico Biplot para las tres lagunas.



Fuente: los autores.

A nivel gráfico en la ilustración 30 se observa como en los cuadrantes inferiores se ubican los datos referentes a la laguna El Medio y en el nivel superior se encuentran los de la laguna de Chingaza, quedando en la mitad la información que hace referencia a la laguna del Arnical. En consecuencia, se identifica que estos sistemas se diferencian a nivel altitud por las variables que se identifican en PC2 a nivel vertical en sus diferentes magnitudes, es decir, temperatura, conductividad, pH y clorofila *a*. También se identifican puntos alejados del conjunto de datos a nivel horizontal, es decir, sus diferencias están dadas por las variables de productividad y la respiración, así como en menor medida la clorofila *a* y la concentración de oxígeno disuelto en el agua.

En cuanto a la laguna del Arnical se identifica que sus valores se encuentran dispersos alrededor del punto (0,0) de la gráfica, por lo que se evidencia que la interacción de los datos de esta laguna dentro del ACP es menor con respecto a las otras dos lagunas.

Finalmente se infirió que la laguna Chingaza maneja una proyección hacia arriba, por lo que sus datos explican potencialmente la varianza con las variables temperatura, conductividad y en menor medida el pH. Igualmente se observa la proyección de la laguna El Medio hacia el cuarto cuadrante donde se encuentra situado el vector de clorofila *a*, por lo que se identifica la importancia de la biomasa fitoplanctónica medida por esta variable dentro de ésta laguna. Es importante resaltar que las tres lagunas muestran una proyección hacia el vector de potencial redox, el cual es contrario al de saturación de oxígeno y concentración de oxígeno disuelto, en consecuencia, se identifica la correlación negativa entre este grupo de variables.

9. SERVICIOS AMBIENTALES

El estudio de los páramos se ha concentrado potencialmente en la investigación y análisis en pro de la conservación y preservación de su biodiversidad, funciones ecológicas y atractivo paisajístico. A partir de la tendencia que se ha desarrollado por integrar la conservación de los páramos con el desarrollo sostenible y la sociedad, se ha incrementado el interés por la capacidad de estos ecosistemas para proporcionar servicios ambientales y la potencialidad de gestionar dichos servicios como un instrumento que conecta su conservación con el desarrollo [47].

Los servicios ambientales se entienden como los beneficios tangibles e intangibles que prestan los ecosistemas a la sociedad, teniendo en cuenta su clasificación en categorías (servicios de aprovisionamiento, regulación, apoyo y culturales - recreativos) [48] según su funcionalidad, se buscó realizar la identificación de dichos servicios presentes en las lagunas a partir de la metodología planteada por Ramsar en el año 2007 en el documento “Valoración de humedales: Lineamientos para valorar los beneficios derivados de los servicios de los ecosistemas de humedales”.

La importancia de identificar los servicios ambientales que prestan las lagunas estudiadas, las cuales como ya se mencionó hacen parte de la zona Ramsar del PNN Chingaza, se ve recalcada en el texto de la convención que se adoptó en 1971 donde se reconoce “que los humedales constituyen un recurso de gran valor económico, cultural, científico y recreativo, cuya pérdida sería irreparable” [1] [49]. Así mismo, determinar los servicios ambientales de este ecosistema es una herramienta indispensable para las decisiones de conservación que deban tomarse y para la búsqueda de mecanismos de financiación destinados a la conservación [50].

Los humedales realizan determinadas funciones gracias a sus componentes físicos, químicos y biológicos, estas funciones se definen como “la capacidad de los procesos y componentes naturales para proporcionar bienes y servicios que satisfagan las necesidades humanas, directa o indirectamente” [51]. Estas funciones se clasifican en cuatro categorías con el fin de facilitar la identificación de los servicios ambientales que prestan los ecosistemas: aprovisionamiento, regulación, de apoyo, culturales y recreativas [49].

A continuación se mencionen los servicios ambientales identificados en la zona de estudio.

9.1 SERVICIOS DE APROVISIONAMIENTO

El sistema lacustre Chingaza es una de las reservas de agua más grandes del país, la cual abastece de este recurso a la ciudad de Bogotá y municipios como Fómeque, La Calera, Choachí, Guasca, Gachalá, Junín, Medina, San Juanito, El Calvario, Restrepo y Cumaral. Elementos como la vegetación, el suelo y el

subsuelo, permiten el desarrollo de un gran potencial para prestar servicios ambientales que se relacionan con la interceptación y almacenamiento del agua para el consumo [48]. La empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá recibe de Chingaza $14 \text{ m}^3/\text{s}$ lo que permite abastecer de agua potable a cerca del 80% del distrito capital [13]. Este servicio es considerado como uno de los más importantes que presta el parque por su gran capacidad de abastecimiento, razón por la cual su conservación es de vital importancia con el fin de evitar problemas de escases o disminución en la calidad del agua por la afectación de actividades antropogénicas [6].

La fotosíntesis y la absorción de nutrientes a cargo de los organismos autótrofos convierte la energía, CO_2 , agua y nutrientes en una amplia variedad de estructuras de hidratos de carbono que posteriormente son utilizados por productores secundarios para aumentar la biomasa presente en el medio. Esta variedad de hidratos de carbono provisiona los ecosistemas y a las personas de servicios para el consumo que va desde alimentos hasta recursos energéticos [52]. En consecuencia, por medio de la radiación solar, principal fuente de energía para estos ecosistemas, una fracción de ésta energía es fijada por medio de la fotosíntesis, proceso que representa la fuente de alimentos más importante para la red trófica [53].

9.2 SERVICIOS DE REGULACIÓN

Las lagunas estudiadas pertenecen a los regímenes hidrológicos que se conservan en el PNN Chingaza los cuales mantienen su influencia en los sistemas naturales por la regulación del agua ya que preservan las condiciones normales de la subcuenca del río frío; en el proceso de regulación hidrológica se mantiene el riego natural y drenaje, la regulación del caudal y el transporte del agua en la cuenca del río Frio [52]. Este servicio es importante para que se mantenga la distribución del agua a lo largo de la superficie de la subcuenca [49]. Se debe resaltar la significancia de este servicio debido a la necesidad de preservar los regímenes de caudales con el fin de evitar escases del recurso hídrico en épocas de estiaje [54].

Otro de los servicios de regulación que presta la zona de estudio gira en torno a la mitigación de riesgos naturales, desempeñando funciones como el control de inundaciones pues por la forma cómo funciona el páramo almacenando y liberando progresivamente el agua, se reduce el riesgo de ocurrencia de este evento [55]. Se identificó que sobretodo la laguna del Arnical está rodeada de pastizales húmedos que actúan como esponjas absorbiendo el agua de la lluvia con el fin de que se filtre más lentamente en el suelo; gracias a esto, la velocidad y el volumen de escorrentía que entra a la subcuenca se ve disminuido con lo que se evitan crecientes aguas abajo que puedan aumentar la posibilidad de que se desarrollen inundaciones.

El ciclo de nutrientes tiene una relación directa con la fijación del carbono, debido a esto, es uno de los servicios de apoyo más importante, pues ayuda a garantizar el desarrollo adecuado y eficiente de los ciclos biogeoquímicos, además de contribuir con la regulación [47]. Debido a las bajas temperaturas que se presentan en la zona de estudio, se generan bajas tasas de mineralización y reciclaje de nutrientes lo que favorece la continuidad de la absorción del CO₂ presente en la atmósfera; la alta capacidad de estos suelos para retener el agua contribuye con el desarrollo de condiciones anaerobias que permiten la fijación del carbono en el suelo [50].

9.3 SERVICIOS DE APOYO

Uno de los servicios de apoyo más importantes y que especialmente se desarrolla en la zona de estudio es el de hábitat para la biodiversidad. Las lagunas de estudio no solo sirven como hábitat temporal o permanente para algunas especies de aves tanto migratorias como residentes, sino que también involucra una gran diversidad de insectos, microflora, fauna flotante que son de gran importancia dentro de la dinámica ecológica de estos cuerpos de agua [13]. Es de gran importancia que los ecosistemas proporcionen hábitat de reproducción, alimentación o descanso a las especies con el fin de mantener el equilibrio ecológico y proceso evolutivo además de contribuir con soporte para las cadenas tróficas [52].

9.4 SERVICIOS CULTURALES Y RECREATIVOS

La zona de estudio cuenta con atractivos turísticos como paisajes, páramos, valles, montañas, zonas rocosas, lagunas, cascadas, especies de flora y fauna entre otras atracciones estéticas que llaman la atención del visitante. De parte de los trabajadores del parque se tiene una oferta turística donde se presentan planes de ecoturismo de aventura, naturalista o educativo los cuales se explican a continuación [56]:

9.4.1 Ecoturismo de aventura.

Este servicio se ofrece en un sendero que se encuentra entre la laguna de Chingaza y la laguna El Medio, y se brinda la capacidad de practicar montañismo con un guía, sin campismo [56].

9.4.2 Ecoturismo naturalista.

En este servicio se ofrece la contemplación de la naturaleza desde sus diferentes escenarios y reúne toda la riqueza paisajística y de biodiversidad que contiene la zona [56].

9.4.3 Ecoturismo educativo.

En este servicio aplican las salidas de campo y de educación ambiental que se ofertan en paquetes a escuelas, universidades, familias y empresas; tiene motivos distintos a las actividades deliberadamente recreativas y se ofrece por los rasgos de interés científico y educativo que presenta la zona [56].

9.5 PRODUCTIVIDAD PRIMARIA COMO SERVICIO ECOSISTÉMICO

El servicio ecosistémico más importante prestado por los ecosistemas naturales gira en torno a la fijación de la bioenergía, que se concibe como aquella derivada de la biomasa, ya que sin la capacidad de estos ecosistemas para convertir (principalmente) la energía solar en biomasa, no podría haber vida en la tierra [52]. En consecuencia, la productividad primaria como base para la alimentación de las cadenas tróficas es indispensable para mantener con vida todos los niveles de organismos.

Teniendo como base los resultados anteriormente expuestos con respecto a la productividad primaria aportada por las lagunas, la contribución con respecto a la prestación de este servicio ecosistémico, derivado de toda la zona de estudio permite catalogar las tres lagunas como sistemas mesotróficos en los cuales la biomasa fitoplanctónica evaluada por medio de la concentración de clorofila *a* y la productividad primaria neta, se ven influenciadas por las diferentes épocas climáticas que se presentan en el sistema lacustre Chingaza, el cual tiene un comportamiento unimodal.

Los aportes de productividad primaria para la laguna del Arnical, El Medio y Chingaza tienen una media de 73.6, 74.54 y 71.2 mg C m⁻³ h⁻¹ respectivamente, donde la laguna con mayor aporte de captura de carbono por unidad de volumen es la del Arnical.

El entendimiento del comportamiento de la productividad primaria neta es uno de los factores más importantes para el estudio de los ecosistemas ya que es un indicador de la cantidad de carbono y energía que ingresa al ecosistema, además, proporciona la energía necesaria para sustentar los procesos biológicos, incluyendo la dinámica trófica y la descomposición de materia orgánica. Hay que mencionar además, que es la variable que mejor integra las interacciones entre nutrientes, organismos y el ambiente físico, y por esto es un componente crítico para la comprensión de las transformaciones de los ecosistemas tanto por actividad antrópica como por el calentamiento global, además de ser un indicador del potencial de carbono que puede ser almacenado en un ecosistema [53].

10. CONCLUSIONES

La productividad primaria calculada para las tres lagunas lleva a determinar que el sistema más productivo es el de la laguna El Medio, sin embargo, las lagunas Chingaza y Arnical no mostraron valores distantes de productividad con respecto a El Medio. En consecuencia, la actividad fitoplanctónica para los tres sistemas mantiene valores similares a pesar las diferencias entre lagunas (área, altitud, morfología, vegetación, entre otras). Con respecto a otros ecosistemas lagunares que se encuentran bajo diferentes condiciones ambientales, la productividad primaria de las lagunas estudiadas es baja, sin embargo, no existen estándares para comparar ésta variable con ecosistemas de alta montaña.

Con respecto al potencial de los ecosistemas de estudio para la fijación de carbono, se identificó que la capacidad de fijar carbono es de $335.891,3 \text{ mg C m}^{-3} \text{ año}^{-1}$ para la laguna del Arnical, $338.355 \text{ mg C m}^{-3} \text{ año}^{-1}$ para la laguna El Medio y $320.835 \text{ mg C m}^{-3} \text{ año}^{-1}$ para la laguna de Chingaza; en consecuencia, la conservación de estos ecosistemas se hace importante a la hora de fijar y almacenar carbono, función amortiguadora frente al cambio climático.

A partir del Índice de Carlson (TSI) y la metodología desarrollada por la OCDE para identificar el estado trófico de las lagunas, se identificó a partir del valor medio de la concentración clorofila *a* que los tres sistemas lagunas que fueron estudiados se clasifican como mesotróficos, es decir, se encuentran en un nivel intermedio con respecto a la productividad.

Se determinó a partir de un análisis de correlaciones entre las variables PPN y clorofila *a* con respecto a la altitud que para las tres lagunas estudiadas no existe ninguna relación significativa en la cual se pueda vincular la productividad primaria se vea afectada por la altura en la cual se encuentran las lagunas.

Dentro de los servicios ecosistémicos identificados, se reconoce la fotosíntesis como el proceso que representa la fuente de alimento más importante para la red trófica por la fijación de carbono en el ecosistema. Con valores medios de productividad primaria neta de 73.6, 74.54 y 71.2 $\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ para la laguna del Arnical, El Medio y Chingaza respectivamente, se registra este servicio como de gran importancia por su contribución en la biomasa del sistema en su totalidad.

Por medio de un análisis de correlaciones no paramétrico entre las lagunas para las variables de PPN y clorofila *a*, se encontró que la laguna El Medio y la laguna Chingaza presentan fuertes similitudes positivas tanto en épocas de altas precipitaciones como en época seca donde la correlación más fuerte es entre las concentraciones de clorofila *a* para ambas lagunas con un coeficiente de Spearman de 0.810 para época de altas precipitaciones.

En el análisis de componentes principales se observó como a nivel altitudinal influyen las variables temperatura, conductividad, pH y clorofila *a* en la diferenciación de los tres sistemas lagunares; igualmente se identificó que estas lagunas se encuentran fuertemente relacionadas por el potencial redox, ya que ésta variable se identificó tanto en los análisis individuales como el integral por mantener una magnitud y proyección que intervenía en la ubicación de las nubes de datos a nivel gráfico. De igual forma se identificó que en el componente principal, la varianza es fuertemente explicada por la productividad primara bruta y la respiración, donde se ven correlacionadas positivamente.

11. RECOMENDACIONES

Las tres lagunas que fueron estudiadas y cuyos resultados se muestran en este documento hacen parte del sistema lagunar que comprende 20 lagunas en la zona Ramsar del PNN Chingaza, en consecuencia, es importante el estudio de las 17 lagunas restantes debido a la importancia de los estudios de línea base para estos ecosistemas como cimiento que fortalece el desarrollo de estrategias de conservación.

Específicamente, para estudios de productividad primaria en lagunas de alta montaña, se recomienda tener en cuenta factores como la velocidad de los vientos por la alteración que produce al oxigenar las lagunas, factor que se puede confundir con la producción de oxígeno dentro de las mismas. Así mismo, se sugiere tener en cuenta la radiación solar en los momentos en los cuales se estén realizando los muestreos con el fin de poder calcular la incidencia de este factor en la fotosíntesis para estos ecosistemas.

Debido a que se determinó que los sistemas estudiados son mesotróficos, se recomienda realizar muestreos mensuales en la zona litoral, espejo de agua, con el fin de identificar qué factores están contribuyendo con este nivel de productividad pues las lagunas de alta montaña por las condiciones climáticas que presentan, deben ser oligotróficas.

12. GLOSARIO

ABSORBANCIA: representa la relación logarítmica entre la intensidad de luz que incide sobre alguna muestra y la intensidad de esa luz que se trasmite a través de la muestra, usualmente se utiliza para cuantificar ácidos nucleicos y proteínas así como en reacciones colorimétricas [36].

CLOROFILA a: corresponde a un pigmento fotosintético primario que se encuentra en todos los organismos fotosintetizadores que desprenden oxígeno; la clorofila a puede ser asumida como biomasa fitoplanctónica presente en cuerpos de agua [18].

PRODUCTIVIDAD: En ecología refiere a la producción de biomasa por unidad de tiempo es decir la velocidad con la cual el carbono inorgánico se transforma en una forma orgánica mediante la actividad metabólica de los organismos portadores de clorofila [20].

EUTROFIA: se define como el enriquecimiento de las aguas con nutrientes a un ritmo que no se compensa por eliminación o mineralización total; una de sus manifestaciones es la proliferación de algas y macrofitas en función de la carga de nutrientes [57].

ECOSISTEMA: Se refiere a una unidad ecológica compuesta por un biotopo y su biocenosis, que se encuentran implicados en procesos dinámicos de intercambio de energía y de materia, cuyo fin es la evolución a nivel de especies y la sucesión a nivel de todo el sistema [55].

FOTOSÍNTESIS: es el proceso fisicoquímico por el cual las plantas, algas y bacterias fotosintéticas utilizando la energía de la luz solar son capaces de sintetizar compuestos orgánicos [19].

BIOMASA: Corresponde al peso de toda materia viva que habita un área en un tiempo instantáneo dado, la evaluación es esencial en cualquier tipo de análisis de dinámicas de poblaciones [18].

LIMNOLOGÍA: es el estudio de la ecología de las aguas continentales (no marinas), que integra diferentes disciplinas en las que se sustenta para explicar el comportamiento de una masa de agua [58].

EPILIMNION: Corresponde a la capa superficial caliente en cualquier lago estratificado [17].

NUTRIENTES: Sustancias químicas que requieren los diferentes sistemas para el desarrollo de sus funciones vitales.

OLIGOTRÓFICO: hace referencia al nivel de eutrofización en el cual los ambientes presentan escasa disponibilidad de nutrientes que limitan el desarrollo

de actividad biológica; generalmente los lagos y lagunas de alta montañas presentan sistemas oligotróficos.

ZONA FOTICA: corresponde a aquella zona en la que penetra la luz del sol y su profundidad es muy variable en función de la turbidez del agua.

ZONA LITORAL: comprende la zona de transición entre la tierra y el agua de las lagunas, representa los bordes de los cuerpos de agua.

13. BIBLIOGRAFIA

- [1] Secretaría de la Convención de Ramsar, Manual de la Convención de Ramsar, Ramsar: Ramsar Convention, 2006.
- [2] Viceministerio de Ambiente, Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2010.
- [3] C. E. D. Triana, Chingaza: un sistema de agua, Bogotá: Universidad Nacional, 2005.
- [4] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Decreto 233, Bogotá: República de Colombia, 2008.
- [5] Organización de las Naciones Unidas, «Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas,» Organización de las Naciones Unidas, Ramsar, 1971.
- [6] Contraloría General, Evaluación de la implementación de la Política Nacional de Humedales Interiores en Colombia, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2011.
- [7] Consejo Nacional Ambiental, «Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia,» Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá D.C., 2001.
- [8] Secretaria de la convención de Ramsar, Humedales, servicios de los ecosistemas, Ramsar: Ramsar Convention, 2007.
- [9] Ministerio del Medio Ambiente, Páramos: Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de Alta Montaña Colombiana, Bogotá D.C: República de Colombia, 2002.
- [10] Departamento de Biología Vegetal, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, «Caracterización del fitoplancton de las lagunas de alta montaña de sierra nevada (Granada, España) en relación con las características físico-químicas del medio,» *Limnética*, vol. 5, pp. 37-50, 1989.
- [11] C. R. Montaña, «Caracterización de la comunidad de Macrófitas en lagunas del páramo de La Rusia (Boyaca-Colombia),» *Ciencia en desarrollo*, vol. 4, nº 2, pp. 73-82, 2013.
- [12] O. Vargas Rios y P. Pedraza, Parque Nacional Natural Chingaza, Bogota: Gente Nueva, 2004.

- [13] Parques Nacionales Naturales de Colombia, Plan Estrategico y de Manejo Parque Nacional Natural Chingaza, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2005.
- [14] W. Lampert y U. Sommer, Limnoecology, New York: Oxford, 2007.
- [15] W. R. G., Limnología, Barcelona: Omega, 1981.
- [16] A. Fernández, Enfoques integrados para la problemática del agua, Cartagena de Indias: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 2002.
- [17] A. J. Horne y C. Goldman, Limnology, Minneapolis: McGraw-Hill, 1994.
- [18] R. G. Wetzel, Limnología, Madrid: Omega, 1981.
- [19] R. G. Wetzel y G. E. Likens, Limnological Analyses, New York: Springer-Verlag, 1995.
- [20] R. Torres Orozco y J. L. García Calderón, Introducción al manejo de datos limnológicos, México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana, 1995.
- [21] J. Wehr, Freshwater habitats of algae, Elsevier Science, 2003.
- [22] G. A. Cole, Textbook of limnology, St. Louis: The C.V. Mosby Company, 1979.
- [23] G. Andrade, Consideraciones sobre el estado actual y las oportunidades de conservación del Parque Nacional Chingaza, Bogotá D.C.: Fundación Natura, 1989.
- [24] Congreso de Colombia, Ley 357, Bogotá: República de Colombia, 1997.
- [25] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Decreto 3930, Bogotá: República de Colombia, 2010.
- [26] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 2115, Bogotá: República de Colombia, 2007.
- [27] Presidente de la República de Colombia, Decreto 1575, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2007.
- [28] Ministerio del Medio Ambiente, Resolución 0769, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2002.
- [29] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 839,

Bogotá: República de Colombia, 2003.

- [30] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 196, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2006.
- [31] S. Gaviria, «Aspectos limnológicos de las lagunas de Chingaza,» de *Ecología y Conservación de un Ecosistema Altoandino*, Bogotá D.C, Carpanta, 1993.
- [32] R. Donato, Ecología de dos sistemas de páramo, Bogotá D.C: Guadalupe Ltda., 1996.
- [33] A. Ramírez González y G. Viña Vizcaíno, Limnología Colombiana: Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis.], Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 1998.
- [34] A. Masol, «PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: POTENCIAL OXI-REDUCCION,» de *Manual de ecología microbiana*, Bogotá D.C, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, 2006.
- [35] F. Fraga, Profundidad de visión del disco Secchi y su relación con las concentraciones de fitopláncton, Vigo: Instituto de Investigaciones Pesqueras, 1989.
- [36] J. Brower, Field and laboratory method general ecology, Dubuque: McGraw Hill, 1998.
- [37] QUANTA, «Prospectk Quanta E,» OTT MESSTECHNIK , 2002. [En línea]. Available: <http://www.meditecna.com/pdfs/Quanta.pdf>. [Último acceso: mayo 2015].
- [38] H. Fraile, E. Orive y J. Pozo, «Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaíso (Río Tera, Zamora),» *Limnética*, vol. 2, nº 11, pp. 29-37, 1995.
- [39] D. Moreno, J. Quintero y A. López, Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia, Mexico D.F: Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, 2010.
- [40] A. Massol, «PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: PH,» de *MANUAL DE ECOLOGÍA MICROBIANA*, Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, 2006.
- [41] Confederación hidrográfica del Ebro, Establecimiento de condiciones de referencia y redefinición de redes en la cuenca del Ebro (España), España:

Ministerio del Medio Ambiente, 2006.

- [42] A. Massol, «Parámetros fisicoquímicos: Temperatura,» de *Manual de ecología microbiana*, Mayagüez, Universidad de Puerto Rico Recinto Universitario de Mayaguez, 2006.
- [43] A. Massol, «NUTRIENTES Y GASES: OXÍGENO DISUELTO,» de *MANUAL DE ECOLOGÍA MICROBIANA*, Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, 2006.
- [44] Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico John Von Neumann, Caracterización Ecológica y Socio-Cultural del Páramo de Frontono o del Sol, Quibdo, 2012.
- [45] A. Massol, «PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: CONDUCTIVIDAD,» de *MANUAL DE ECOLOGÍA MICROBIANA*, Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, 2006.
- [46] J. J. Bernal García, S. M. Martínez María-Dolores y J. F. Sánchez García, «Modelación de los factores más importantes que caracterizan un sitio en la red,» Universidad de Valencia, Valencia, 2004.
- [47] R. Hofdtede, «Los servicios del ecosistema páramo: una visión desde la evaluación de ecosistemas del milenio,» Abya Yala, Quito, 2008.
- [48] C. Ecovera y Ecoverities, Estrategia nacional para el pago por servicios ambientales, Bogotá: Ecovera, 2007.
- [49] Stuij, Finlayson, Davidson y D. Groot, «Valoración de humedales: Lineamientos para valorar los beneficios derivados de los servicios de los ecosistemas de humedales,» Ramsar, Gland, 2007.
- [50] H. Garcia, L. Calderón, A. Hernández y J. L. López, «Valoración de los bienes y servicios ambientales provistos por el Páramo de Santurbán,» FEDESARROLLO, Bogotá, 2013.
- [51] R. S. De Groot, «Functions of Nature: Evaluation of nature in environmental planning, management and decision making.,» Wolters-Noordhoff, Groningen, 1992.
- [52] R. S. De Groot, M. A. Wilson y R. M. Boumans, «A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services,» *Ecological Economics*, vol. I, nº 41, pp. 393-408, 2002.

- [53] E. Escobar y M. Maass, «Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas,» de *Conocimiento actual de la biodiversidad*, Ciudad de Mexico, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2008, pp. 161 - 189.
- [54] M. A. Díaz-Granados Ortiz, J. D. Navarrete González y T. Suárez López, «Páramos: Hidrosistemas Sensibles,» *Revista de Ingeniería*, vol. I, nº 22, pp. 64-75, 2005.
- [55] Consejo de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, «Los Ecosistemas y el Bienestar Humano: Humedales y Agua,» World Resources Institute, Washington, D.C., 2005.
- [56] C. P. Rodríguez, Chingaza como destino de turismo contemplativo, Bogotá: Universidad del Rosario, 2010.
- [57] H. Salas, Eutroficación en lagos cálidos tropicales, Santo Domingo: CEPIS, 1996.
- [58] A. Jimenez, Limnología Aplicada, Sevilla: Universidad Pablo D Olavide, 2007.

ANEXO A

DATOS

Laguna	M	E	Respiración	PPB	PPN	Clorofila <i>a</i>	DO	SAT	pH	T	Redox	Conductividad
			mg C /m³/h	mg C /m³/h	mg C /m³/h	mg/m³	mg/L	%		°C	m V	mS/cm
Arñical	1	1	33.75	108.75	75.00	2.91	3.3	43.4	6.3	11.8	145	.02
	2	1	101.25	135.00	33.75	24.19	3.9	42.3	7.2	12.4	172	.01
	3	1	131.25	243.75	112.50	6.86	3.6	40.7	6.3	12.6	165	.01
	4	1	48.75	243.75	195.00	21.89	3.6	42.4	5.4	12.7	177	.01
	5	1	217.50	255.00	37.50	20.82	4.0	41.6	5.7	12.6	164	.01
	1	2	127.50	221.25	93.75	5.64	4.0	43.6	4.4	12.7	471	.00
	2	2	82.50	273.75	191.25	1.76	4.4	39.2	6.0	12.5	201	.00
	3	2	18.75	63.75	45.00	3.35	3.8	38.9	7.2	12.0	211	.01
	4	2	30.00	71.25	41.25	2.31	3.8	38.7	7.0	12.5	214	.01
	5	2	120.00	153.75	33.75	2.43	3.9	37.4	8.2	12.3	198	.01
	1	3	86.25	90.00	3.75	4.37	2.8	35.3	6.5	12.6	362	.01
	2	3	108.75	161.25	52.50	7.33	3.5	42.7	8.1	14.5	196	.04
	3	3	11.25	78.75	67.50	3.33	3.8	42.4	4.2	14.1	168	.03
	4	3	75.00	191.25	116.25	11.82	3.5	44.5	6.9	14.5	143	.03
	5	3	26.25	71.25	45.00	10.50	3.9	44.8	8.5	14.0	178	.03
	1	4	26.25	150.00	123.75	1.73	3.3	43.6	5.5	12.9	353	.01
	2	4	360.00	412.50	52.50	4.44	4.7	45.6	5.1	12.7	196	.01
	3	4	157.50	251.25	93.75	2.47	4.7	37.1	6.3	12.5	200	.01
	4	4	7.50	78.75	71.25	5.55	3.8	42.4	6.0	13.2	174	.01
	5	4	161.25	210.00	48.75	4.41	4.4	42.0	6.6	13.0	189	.01
El Medio	1	1	15.00	135.00	120.00	13.05	3.8	41.5	4.9	12.2	433	.01
	2	1	157.50	236.25	78.75	4.98	4.2	39.9	6.7	11.4	198	.00
	3	1	176.25	528.75	352.50	6.50	4.0	37.1	6.9	9.0	161	.01
	4	1	30.00	75.00	45.00	7.17	3.9	38.3	4.8	9.9	176	.01
	5	1	71.25	78.75	7.50	14.37	3.9	38.9	6.8	9.7	167	.01
	1	2	60.00	63.75	3.75	1.78	3.6	37.5	5.2	10.4	411	.00
	2	2	120.00	150.00	30.00	6.52	3.8	38.7	7.0	10.6	247	.00
	3	2	30.00	63.75	33.75	8.63	3.8	38.8	7.0	10.3	250	.01
	4	2	75.00	202.50	127.50	11.76	3.6	39.8	5.9	10.7	249	.01
	5	2	86.25	191.25	105.00	17.04	3.6	39.5	7.2	10.8	256	.00
	1	3	191.25	217.50	26.25	3.59	3.1	34.8	6.0	11.7	384	.00
	2	3	75.00	150.00	75.00	3.72	4.2	38.3	7.0	11.8	171	.01
	3	3	101.25	120.00	18.75	2.23	4.4	37.8	7.4	10.2	170	.02
	4	3	18.75	150.00	131.25	6.00	4.1	38.9	7.0	10.8	187	.01
	5	3	67.50	153.75	86.25	5.70	4.2	37.2	6.3	10.5	178	.01
	1	4	71.25	161.25	90.00	2.33	3.8	43.4	4.9	13.6	424	.00
	2	4	67.50	138.75	71.25	2.39	3.6	44.6	7.0	11.2	287	.01
	3	4	37.50	97.50	60.00	5.91	3.7	31.7	6.8	10.4	269	.01

	4	4	52.50	86.25	33.75	9.03	3.8	39.7	5.0	11.6	275	.00
	5	4	90.00	138.75	48.75	35.04	3.7	37.6	5.1	11.8	294	.00
Chingaza	1	1	-67.50	-33.75	33.75	2.72	2.5	28.3	6.4	13.7	376	.03
	2	1	97.50	142.50	45.00	2.34	5.0	40.2	7.9	13.2	246	.05
	3	1	97.50	120.00	22.50	2.67	5.1	40.7	6.0	13.3	210	.05
	4	1	15.00	56.25	41.25	7.41	5.1	40.6	5.3	13.3	324	.00
	5	1	153.75	210.00	56.25	4.71	5.0	38.2	6.2	13.4	405	.00
	1	2	11.25	41.25	30.00	2.12	3.1	35.6	6.0	13.7	414	.03
	2	2	41.25	123.75	82.50	3.69	3.5	36.1	6.0	13.7	314	.05
	3	2	348.75	765.00	416.25	9.06	4.2	38.8	5.3	13.2	213	.05
	4	2	93.75	157.50	63.75	10.89	3.9	39.0	6.6	14.0	202	.05
	5	2	48.75	75.00	26.25	7.29	4.1	41.2	5.8	13.8	325	.01
	1	3	26.25	52.50	26.25	1.31	3.3	38.8	5.9	14.4	319	.04
	2	3	112.50	138.75	26.25	7.45	3.8	41.0	7.6	14.0	401	.02
	3	3	-26.25	386.25	412.50	9.84	3.7	41.0	6.4	13.6	225	.05
	4	3	75.00	82.50	7.50	5.25	3.9	43.5	6.2	13.7	184	.05
	5	3	67.50	86.25	18.75	2.25	3.8	43.3	8.0	13.8	175	.03
	1	4	22.50	82.50	60.00	4.38	3.8	44.8	6.4	15.4	385	.03
	2	4	75.00	101.25	26.25	6.68	3.4	38.6	8.1	13.5	265	.04
	3	4	108.75	157.50	48.75	6.51	4.0	42.8	7.2	13.8	235	.05
	4	4	138.75	165.00	26.25	7.86	3.7	43.0	6.5	14.3	213	.05
	5	4	41.25	60.00	18.75	9.39	4.0	38.8	7.4	14.5	324	.01
	1	5	71.25	273.75	202.50	6.33	3.6	39.6	6.2	12.3	348	.03
	2	5	18.75	48.75	30.00	8.96	4.1	40.1	5.5	13.5	215	.01
	3	5	30.00	75.00	45.00	4.77	3.7	39.1	6.1	13.7	212	.05
	4	5	56.25	71.25	15.00	3.09	4.3	38.7	5.1	14.3	211	.05
	5	5	26.25	56.25	30.00	6.81	4.4	39.6	6.1	13.4	302	.04
	1	6	56.25	236.25	180.00	6.08	3.3	33.4	5.9	13.0	340	.03
	2	6	101.25	187.50	86.25	3.35	3.9	40.3	7.0	13.7	285	.03
	3	6	225.00	270.00	45.00	3.87	4.0	43.9	6.6	13.3	223	.05
	4	6	41.25	67.50	26.25	2.49	4.1	44.2	6.1	13.5	412	.03
	5	6	93.75	142.50	48.75	5.40	4.0	41.3	6.7	14.0	387	.06

ANEXO B

MEMORIA FOTOGRÁFICA

A continuación se adjuntan fotografías tomadas por los autores con el fin de dar a conocer con mayor claridad la zona de estudio para este trabajo.

Fotografía 1: Laguna del Arnical



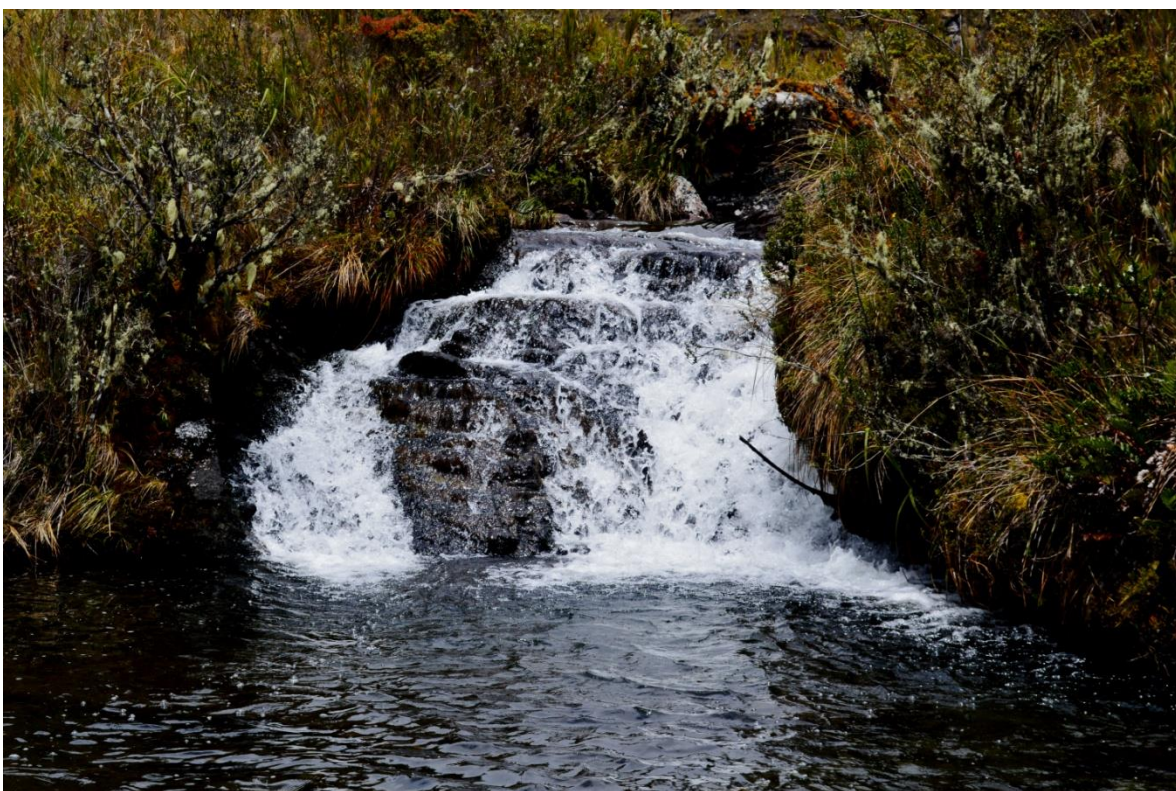
Fotografía 2: Laguna Chingaza



Fotografía 3: Vista panorámica de la laguna Chingaza



Fotografía 4: Salida de la laguna El Medio.



Fotografía 5: Laguna El Medio.



Fotografía 6: Puesto “La Paila”



Fotografía 7: Venado Cola Blanca.



Fotografía 8: Folleto del convenio con la Universidad, ubicado en los puestos de control del Parque Chingaza.

