

**DESARROLLO DE UN ÍNDICE DE DIATOMEAS PERIFÍTICAS PARA EVALUAR EL ESTADO DE LOS
HUMEDALES DE BOGOTÁ**

DENISE CASTRO ROA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
BOGOTÁ
2009**

**DESARROLLO DE UN ÍNDICE DE DIATOMEAS PERIFÍTICAS PARA EVALUAR EL ESTADO DE LOS
HUMEDALES DE BOGOTÁ**

**DENISE CASTRO ROA
Código 190240**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al
Titulo de MSc**

Director

Dr. GABRIEL ANTONIO PINILLA AGUDELO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
BOGOTA
2009**

AGRADECIMIENTOS

Debo un agradecimiento enorme y especial al profesor Gabriel Antonio Pinilla Agudelo director del trabajo por su paciencia, guía, apoyo y comprensión, en cada una de las etapas del trabajo.

Dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá (DIB) por la financiación del estudio.

Profesor Orlando Rangel, coordinador del laboratorio de Palinología del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (ICN) donde se llevó a cabo la fase de laboratorio por su colaboración y apoyo.

Profesor José Eduardo Morales y Omar Fuerte López por la colaboración en la determinación taxonómica de las diatomeas.

Henry Arellano por las asesorías estadísticas.

Profesor John Donato y Hoz Chaparro por la colaboración en la medición de clorofila en el Laboratorio de diatomeas.

Carol Franco del laboratorio de SIG del Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia dirigido por la Profesora Dolores Armenteras por el diseño y edición del mapa de distribución de humedales del estudio.

Profesor Luis Norberto Parra por el Naphrax

Adriana Antolinez del laboratorio de microscopía electrónica de la Universidad Nacional de Colombia por la colaboración en la toma de las imágenes MEB.

Grupo de trabajo del proyecto ICOL, Sandra Rojas, Manuela Venegas, Andrés Malagón y Oscar Jiménez por el apoyo en la fase de campo y en tareas posteriores.

Ingrid Romero, Cindy Leguizamo, Jaime Navarro, Victor Solarte, Andrés Malagón, Adriana Díaz, Alejandra Betancourt, María del Ángel Martínez y muchos otros por ser amigos más que compañeros, además de un importante y bonito apoyo en esta etapa de maestría.

Cindy Leguizamo por su valiosa ayuda en la etapa final del trabajo.

Profesores de la línea de ecología de la maestría en ciencias biológicas.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES	13
3. METODOLOGÍA	24
3.1 Área de estudio	24
3.2 Temporalidad de los muestreos	28
3.3 Campo	28
3.4 Laboratorio	29
3.5 Análisis estadísticos	30
3.6 Construcción de los Índices	31
3.6.1 Índice de especies de diatomeas para los humedales (IDHB)	31
3.6.2 Índice de géneros para los humedales (IGD)	32
3.6.3 Índice sapróbico para los humedales bogotanos (ISHB)	33
3.6.4 Correlaciones de los índices con las variables fisicoquímicas	34
4. RESULTADOS	35
4.1 Caracterización de la comunidad de diatomeas	35
4.1.1 Diversidad, Riqueza y Dominancia	35
4.1.2 Análisis de similitud entre humedales	37
4.1.3 Análisis de correspondencia canónica	39
4.1.4 Cálculo de óptimos y tolerancias	41
4.1.5 Estimación de clorofila A	44
4.2 Evaluación fisicoquímica de los humedales	45
4.2.1 Análisis discriminante	45
4.2.2 Análisis de componentes principales	46
4.2.3 Comportamiento detallado de las variables fisicoquímicas	51
4.3 Las diatomeas perifíticas en la indicación de la calidad del agua	61
4.3.1 Índice de especies de diatomeas para los humedales (IDHB)	61
4.3.2 Índice de géneros para los humedales (IGD)	65
4.3.3 Índice sapróbico para los humedales bogotanos (ISHB)	68
5. DISCUSIÓN	72
6. CONCLUSIONES	85
7. RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	95

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Ubicación geográfica de los humedales evaluados en el estudio (Noviembre 2007 – Agosto 2008).	27
2	Promedios mensuales de precipitación total en la Sabana de Bogotá (noviembre y diciembre de 2007 y enero – agosto de 2008).	28
3	Instrumento usado para la colecta de las muestras de perifiton.	29
4	Índices de diversidad, riqueza y dominancia en las comunidades de diatomeas perifíticas calculados para los humedales durante los periodos de estudio.	37
5	Análisis de correspondencia canónica entre las especies encontradas en el estudio y las variables fisicoquímicas medidas.	41
6	Comportamiento en los humedales de las concentraciones de clorofila A durante los tres últimos periodos de estudio (M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	46
7	Grafica del análisis de funciones discriminantes realizado con las variables fisicoquímicas medidas en los humedales durante el estudio (Noviembre 2007 – Agosto 2008)	47
8	Comportamiento en los humedales de las concentraciones de oxígeno disuelto durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	50
9	Comportamiento en los humedales de la demanda biológica de oxígeno durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	51
10	Comportamiento en los humedales de las concentraciones de fosfatos durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	52
11	Comportamiento en los humedales de las concentraciones de amonio durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	53
12	Comportamiento en los humedales de las concentraciones de nitratos durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	54
13	Comportamiento en los humedales del pH durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero y Marzo 2008, M3: Mayo 2008, M4: Agosto 2008 – sequia).	55
14	Comportamiento en los humedales de la transparencia durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	56
15	Comportamiento en los humedales de los sólidos suspendidos durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	57
16	Comportamiento en los humedales de la conductividad durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	58
17	Comportamiento en los humedales de la dureza durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	59

18	Comportamiento en los humedales de los cloruros durante el estudio (M1: Noviembre de 2007, M2: Febrero – Marzo de 2008, M3: Mayo de 2008, M4: Agosto de 2008).	60
19	Puntaje del IDHB para los humedales en cada periodo evaluado. M = muestreo	62
20	Puntaje del IGD para los humedales en cada periodo evaluado. M= muestreo.	66
21	Puntaje del ISHB para los humedales en cada periodo evaluado. M= muestreo	70

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Valores de similitud de Bray Curtis entre los humedales durante el primer periodo de estudio (lluvias, noviembre de 2007).	38
2	Valores de similitud de Bray Curtis entre los humedales durante el segundo periodo de estudio (Sequía, febrero de 2008).	38
3	Valores de similitud de Bray Curtis entre los humedales durante el tercer periodo de estudio (transición lluvias – sequía - mayo de 2008).	39
4	Valores de similitud de Bray Curtis entre los humedales durante el cuarto periodo de estudio (comienzo de la transición sequía – lluvias - agosto de 2008).	39
5	Estadísticos del análisis de correspondencia canónica entre las especies y las variables fisicoquímicas estimadas en el estudio (Noviembre 2007 – Agosto 2008)	42
6	Valores óptimos calculados para las especies que presentaron una frecuencia de aparición del 20%	42
7	Valores de rangos de tolerancia (+/- optimo) calculados para las especies que presentaron una frecuencia de aparición del 20%	43
8	Escala de clasificación según el IDHB para los humedales evaluados	61
9	Clasificación general (promedio) para los humedales estudiados según el IDHB	62
10	Tabla de correlaciones de Pearson entre el IDHB y las variables fisicoquímicas evaluadas durante el estudio	63
11	Listado de valores de polución de las especies de diatomeas usadas para la construcción del Índice de diatomeas de los humedales bogotanos (IDHB).	64
12	Clasificación general para los humedales estudiados según el IGD	66
13	Listado de valores de polución de los géneros de diatomeas usados para la construcción del Índice para géneros de diatomeas de los humedales bogotanos (IGD)	67
14	Tabla de correlaciones de Pearson entre el IGD y las variables fisicoquímicas evaluadas durante el estudio	67
15	Listado de valores sapróbicos de las especies de diatomeas usadas para la construcción del Índice Sapróbico de los humedales bogotanos (ISHB).	68
16	Clasificación general para los humedales estudiados según el ISHB .	71
17	Tabla de correlaciones de Pearson entre el ISHB y las variables fisicoquímicas evaluadas durante el estudio	71

RESUMEN

Este estudio planteó como objetivo la evaluación de las comunidades de diatomeas perifíticas en cinco humedales de la ciudad de Bogotá (Guaymaral, Jaboque, Juan Amarillo, Santa María del Lago y Tibanica), afectados por la matriz urbana que los rodea, y en un humedal rural de similares características climáticas y altitudinales (Meridor, municipio de Tenjo) pero ajeno a la matriz antes mencionada. Se determinaron algunas de las propiedades ecológicas de estas comunidades y se evaluó su relación con el hábitat. La metodología contempló muestreos biológicos y fisicoquímicos durante cuatro periodos climáticos distintos en los humedales seleccionados. Los resultados evidenciaron diferencias de composición y abundancia entre las comunidades de diatomeas de los humedales y entre los atributos del hábitat representados en las variables fisicoquímicas consideradas.

Esta aproximación a los patrones observados en la comunidad se tomó como base para la construcción de tres herramientas de evaluación basadas en el principio de bioindicación. Se establecieron valores de polución para cada especie y con base en ellos y en la presencia de los taxones en cada humedal se calcularon índices de polución para cada ecosistema en los distintos periodos evaluados. La evaluación de los índices construidos permitió concluir que una evaluación de los ecosistemas mediante especies de diatomeas es la más acertada para lograr una discriminación en el estado limnológico de estos cuerpos de agua, en contraste con el índice sapróbico y el índice de géneros de diatomeas. Esta herramienta, denominada Índice biótico de diatomeas para evaluar el estado de los humedales Bogotanos (IDHB), estableció que los humedales contemplados en el estudio presentan condiciones variadas que van desde ligeramente contaminadas hasta severamente contaminadas y deja ver además que estas condiciones son susceptibles de cambios importantes en el tiempo. Según la escala de estado limnológico establecida para los ambientes estudiados, los seis humedales pueden clasificarse así: Santa María del Lago y Meridor se encuentran en aceptables condiciones limnológicas, Guaymaral, Tibanica y Jaboque están en regulares condiciones y Juan Amarillo tiene malas condiciones, lo cual indica que es un humedal severamente contaminado. Las correlaciones entre el IDHB y las variables fisicoquímicas de contaminación fueron altas.

Palabras clave: Ecología de comunidades, diatomeas, humedales urbanos, Bogotá, bioindicación.

ABSTRACT

This study had as objective to evaluate the communities of periphytic diatoms in five wetlands of Bogotá city area (Guaymaral, Jaboque, Juan Amarillo, Santa María del Lago and Tibanica), affected by the urban environment that surrounds them, and in a rural wetland (Meridor, municipality of Tenjo) with similar characteristics climate and altitude but without the urbanized environment before mentioned. Some of the ecological properties of these communities, and their relationship with the habitat, were evaluated through the exploration with various statistical tools, of their numerical relationships with different physicochemical variables measured in the wetlands. The methodology contemplated biological and physicochemical samplings during four different climate periods in the wetlands selected. The results evidenced both composition and abundance differences among the communities of wetland's diatoms and between attributes of the habitat represented by the selected physicochemical variables.

This approach to the patterns observed in the community was taken as a basis for building an assessment tool based on the principle of bioindication. Pollution values were established for each species and based on them, and in the presence of taxa in each wetland, was constructed an index of pollution for each ecosystem in the different periods evaluated. This tool, called Diatoms Biotic Index to assess the status of Bogotá Wetlands (IDHB) established that wetlands of the study have varied conditions, ranging from slightly polluted to heavily polluted, and shows further that these conditions are subject to important changes over time. According to the limnological state level established for the environments studied, the six wetlands can be classified thus: Santa María del Lago and Meridor are of acceptable limnological conditions, Guaymaral, Tibanica and Jaboque are in regular conditions, and Juan Amarillo has poor conditions, which indicates that this wetland is severely polluted. Correlations between IDHB and pollution physicochemical variables were high.

Key words: Community ecology, diatoms, urban wetlands, Bogotá, bioindication.

INTRODUCCIÓN

Los humedales bogotanos fueron (y en algunos casos aun lo son) ecosistemas sometidos a fuertes acciones de intervención negativa que disminuyen sus capacidades potenciales, tan repetidamente mencionadas en la literatura como servicios ambientales. Algunos autores afirman que la dificultad de capitalizar en formas más tangibles o valoradas por la sociedad estos atributos, ha ocasionado este fenómeno de degradación, y algunos más opinan que de no tomarse medidas urgentes, que puedan ser drásticas, el fin de este tipo de ecosistemas es inminente. Eficientes o no, hay en curso diversas estrategias para recuperación de este tipo de ambientes en la capital. La forma apropiada de decidir la bondad de tales estrategias depende de seguimientos continuos y confiables en distintos aspectos: físicos, estéticos y por supuesto biológicos.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un índice para evaluar el estado limnológico de los humedales, específicamente en lo que a calidad del agua se refiere. Para este fin, los organismos con base en los cuales se realiza esta evaluación son las algas diatomeas, ya que al ser totalmente dependientes del medio acuático responden a las condiciones en las cuales se encuentran. Además, sus respuestas varían según los requerimientos o reacciones que presenten ante las condiciones particulares de cada ambiente. Esta lógica biológica es apoyada por una vasta cantidad de trabajos de bioindicación basados en diatomeas. Sin embargo varios autores han planteado que debido a esa multiplicidad de respuestas es necesario contar con herramientas diseñadas a nivel local que involucren directamente las variables más determinantes para el sistema a evaluar.

En este trabajo se involucran cinco humedales de Bogotá (Guaymaral, Jaboque, Juan Amarillo, Santa María del Lago, Tibanica) y a un humedal rural del municipio de Tenjo (Meridor), que se consideró como un sistema conservado, al no encontrarse inmerso en la zona urbana que caracteriza a los cinco primeros. Con base en las características fisicoquímicas y biológicas de la comunidad de diatomeas de estos heterogéneos sistemas se construyó el **IDHB**. Este índice se propone como herramienta confiable para evaluar la calidad de agua de estos sistemas. Sin embargo, para su posible utilización en otros humedales se recomienda realizar nuevos muestreos que permitan ampliar la lista de especies y sus respectivas características ecológicas. Como base de comparación, se incluye un catálogo de las especies de diatomeas halladas en los seis ecosistemas trabajados.

Este trabajo hace parte de un conjunto de iniciativas financiadas por la División de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá (DIB) y realizadas por el grupo de investigación “Biodiversidad, biotecnología y conservación de ecosistemas” del Departamento de Biología, que buscan el desarrollo de herramientas de bioindicación para este tipo de ecosistemas. Los resultados obtenidos son importantes, porque son un insumo para la realización de futuros estudios en los humedales bogotanos y en un referente para otros trabajos en este tipo de ecosistemas, además por sus posibilidades como instrumento práctico de seguimiento, evaluación y control de estos ecosistemas tan amenazados en la ciudad.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un índice de diatomeas perifíticas para evaluar biológicamente la calidad del agua de los humedales bogotanos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Caracterizar los humedales con base en información fisicoquímica.

Relacionar algunos de los atributos de las comunidades de diatomeas perifíticas con la caracterización fisicoquímica realizada y evaluar los posibles patrones que se originen de esta relación.

Determinar y cuantificar las especies de diatomeas de cada humedal y clasificarlas según sus características ecológicas de tolerancia y sensibilidad.

Establecer cuáles de los atributos medidos incorporan de manera clara y eficaz información sobre la calidad del agua de los humedales para integrarlos en la construcción del índice.

2. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES

Humedales

La definición de humedal ha sido controvertida entre distintos autores, debido principalmente a la gran diversidad de tipos de este ecosistema y las características únicas de cada uno de ellos, lo que ha complicado enmarcarlos en una única definición. Sin embargo, la más aceptada y comúnmente usada ha sido la de la Convención *Ramsar*, que indica que los humedales son aquellos ecosistemas tanto naturales como artificiales que se caracterizan por estar permanente o temporalmente inundados, ya sea por aguas dulces, estuarinas o salinas, las cuales pueden estar estancadas o corrientes y no exceden los seis metros de profundidad. Cabe resaltar que la de *Ramsar* es la definición adoptada por las leyes colombianas (Ministerio del Medio Ambiente 2002).

Si se clasificara a Meridor y los otros humedales distritales según *Ramsar*, pertenecerían a la categoría Tp, que incluye a los pantanos, esteros y charcas permanentes de agua dulce que se ubican sobre suelos inorgánicos y presentan vegetación emergente por lo menos durante la mayor parte del período de crecimiento, estando esta vegetación constituida por plantas acuáticas o semiacuáticas (macrófitas), que son las que dominan el paisaje.

Las características ecológicas que un área debe cumplir para considerarse un humedal son las siguientes: 1. Vegetación hidrófila asociada a medios acuáticos o semiacuáticos; 2. Suelos hídricos que se desarrollan en condiciones de alta humedad llegando incluso al grado de saturación y 3. Condición hídrica determinada principalmente por la influencia climática (Roldán y Ramírez 2008).

Funciones ecológicas de los humedales

Las características mencionadas ligadas a diversos agentes externos naturales o no, llevan a que los humedales sean ecosistemas muy dinámicos que aun en ausencia de factores de disturbio están sujetos a una continua modificación en el tiempo. Así, sus propiedades físicas son constantemente moldeadas por procesos endógenos como la sedimentación y la desecación y por fenómenos de naturaleza exógena como el deslizamiento de tierras y las inundaciones estacionales y ocasionales, entre otros. También sus propiedades químicas y

biológicas varían en el tiempo, ya sea por su evolución biocenótica natural o por procesos originados en otros puntos de la zona de captación que tienen efecto en la dinámica del humedal, como es la acumulación de material orgánico, la acidificación, la invasión de especies que no son propias del humedal y la eutrofización (Ministerio del Medio Ambiente 1999).

Esta gama de posibles combinaciones de condiciones crea características intrínsecas que determinan diversos tipos de humedales, cada uno de los cuales según sus propiedades tendrá flujos de energía particulares, ciclos de nutrientes particulares, albergará redes tróficas de distintos grados de complejidad (Moore 2006) y además podrá desempeñar distintas funciones como recarga y descarga de aguas subterráneas, control de flujos de agua, control de inundaciones, retención de sedimentos tóxicos y no tóxicos, retención de nutrientes, exportación de biomasa, estabilización de microclimas, soporte de cadenas tróficas y creación de hábitats para diversas especies de fauna y flora (Mitsch 1994).

Bienes y servicios de los humedales

El concepto de bienes y servicios se ha desarrollado en las últimas décadas y se refiere principalmente a las características de los diferentes ecosistemas mundiales, entre los que se incluyen los humedales, que ofrecen al ser humano en particular algún tipo de beneficio. De esta manera, todos los atributos mencionados anteriormente como funciones ecológicas son de alguna manera bienes o servicios para el hombre, pero además pueden incluirse aquellos atributos que sin ser funciones ecológicas son características aprovechables, como el abastecimiento de agua, la explotación de recursos pesqueros, forrajeros, forestales o agrícolas y otras actividades de carácter cultural, turístico, social o religioso ligadas a este tipo de cuerpos de agua que han sido incluidas en esta lista de bienes y servicios (UICN 2002).

Uno de los atributos de los humedales que ha sido ampliamente reconocido es el relacionado con mejora de la calidad de aguas, lo cual está relacionado con su capacidad purificadora que ha sido demostrada mediante la aplicación de aguas de desecho a humedales, en algunos casos de formación natural. Sin embargo recientemente se han construido muchos humedales artificiales con el único fin de controlar fuentes no puntuales de contaminación provenientes de tierras agrícolas y áreas urbanizadas. La construcción de humedales con este fin es una propuesta reciente y la conservación de este tipo de ecosistemas para usarlos con este fin se ha convertido en una razón válida para conservar remanentes de humedales ribereños en

Norteamérica, Asia, Europa y otras regiones del mundo (Roldán y Ramírez, 2008). No obstante este tipo de uso está condicionado a un manejo especial del ecosistema que incluye medidas de remediación y rehabilitación (Schueler 1987).

Como en el ejemplo anterior, otros usos se han dado a humedales tanto naturales como artificiales empleándolos de tal manera que presten algún tipo de utilidad al ambiente o contexto en el cual se encuentran. Para este fin se realizan evaluaciones previas para determinar la utilidad potencial del sistema para el propósito deseado, ya que dependiendo de sus características serán más o menos eficientes. Sin embargo el acelerado deterioro o extinción de este tipo de ecosistemas ha llevado a que las prioridades para los humedales actuales sean la remediación, la rehabilitación o la restauración de estos sistemas con diferentes grados de alteración. La conservación se establece también, pero para aquellos humedales que se encuentran en buen estado ecológico (EEM 2005).

Problemática actual de los humedales

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EEM o MEA por su sigla en inglés) publicó en 2005 un completo informe sobre el estado actual de los humedales a nivel mundial, y aunque la definición de humedal para este estudio es tan amplia como la definición de *Ramsar* al incluir distintos tipos de ecosistemas, la problemática de todos ellos lamentablemente es general, siendo en algunos casos más crítica la situación para los ambientes continentales. A continuación se mencionan algunos de los aspectos de dicho informe.

La degradación y desaparición de los humedales es más rápida que la experimentada por otros ecosistemas. De igual manera el estado de las especies asociadas directa o indirectamente con ellos presenta un mayor deterioro que el de aquellas presentes en otros ecosistemas. Los principales generadores de este fenómeno han sido el crecimiento de la población y el creciente desarrollo económico, los cuales han causado la proliferación de infraestructuras ligadas al desarrollo que interfieren o cambian de manera importante con la dinámica natural del hábitat, cambios en el uso del suelo ya sea para urbanización o agricultura, extracción de agua que en algunos casos es abusiva y excede las capacidades del humedal, eutrofización, contaminación, sobreexplotación de las especies de fauna y la introducción de especies exóticas invasoras.

De los anteriormente mencionado la eutrofización es una de las problemáticas que más ha afectado a distintos tipos de humedales, particularmente aquellos inmersos en una matriz agrícola o urbana como es el caso de muchos de los humedales ubicados en la sabana de Bogotá (Andrade 1998). La eutrofización es un proceso que se lleva a cabo cuando hay una alta carga de nutrientes que genera el crecimiento excesivo de algunos tipos de plantas y que trae como consecuencia una disminución en la cantidad de oxígeno disuelto disponible, lo cual perjudica las diferentes comunidades bióticas que requieren condiciones con ciertos niveles de este gas.

Desde 1950 el aumento en las concentraciones de algunos elementos como nitrógeno, fósforo, azufre y otros contaminantes asociados a los nutrientes, se ha convertido en uno de los principales y más graves generadores de cambio en los humedales. Esto ha provocado eventos como la acidificación de ecosistemas de agua dulce y la proliferación de algas que en algunos casos son tóxicas y han causado intoxicación y muerte de grandes y pequeños animales, así como mortandades de peces debido a hipoxia o anoxia (baja concentración o ausencia de oxígeno disuelto).

Evaluación fisicoquímica del grado de eutrofia en un humedal

Los nutrientes causantes de la eutrofización son fundamentalmente los nitratos y los fosfatos. La fuente natural de estos elementos es la descomposición de la materia orgánica; sin embargo es más común que una alta concentración de ellos se deba a la polución con desechos domésticos y agrícolas (Roldán y Ramírez 2008). Se considera que el fósforo es el factor clave en el proceso de eutrofización ya que es el principal responsable de la productividad primaria y del crecimiento algal (Vasconcelos 2006). Por lo tanto, la determinación directa de la concentración de este y otros nutrientes en el agua es una medida del grado de trofia de un sistema. También la medición del oxígeno disuelto o del porcentaje de saturación de oxígeno ofrece una idea inmediata del estado del ecosistema.

Otra medición que se acerca a la evaluación del estado trófico de un sistema acuático es la de los sólidos disueltos, es decir los iones que se encuentran en el agua (cloruros, sulfatos, bicarbonatos y silicatos entre otros) y cuya concentración es variable, bien sea por la naturaleza del humedal o por efectos de contaminación doméstica. Un incremento de sólidos disueltos, especialmente cloruros, aumenta la salinidad y causa problemas de

osmorregulación. Por esta causa, una elevada concentración de sales está asociada a una baja diversidad. Una forma de medir los sólidos disueltos es determinar la conductividad eléctrica. Los valores normales de conductividad están entre los 30 y 60 μ Siemens cm^{-1} ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$); resultados por debajo indican oligotrofia y por encima eutrofia (Roldán 1992).

Bioindicación

Aunque la medición de variables fisicoquímicas es una buena herramienta de evaluación de la calidad del agua, analiza básicamente los efectos de la contaminación a corto plazo. Por esta razón los métodos biológicos se han venido desarrollando desde la década de los cincuenta con herramientas que evalúan las respuestas que ofrecen plantas y animales a la contaminación. Se ha encontrado que estos organismos indicadores determinan los efectos de los impactos en el ecosistema acuático a través de un tiempo más prolongado (Vásquez *et al.*, 2006).

Odum (1972) define un organismo indicador como una especie en particular cuya presencia demuestra la existencia de ciertas condiciones en el medio, mientras que su ausencia es la consecuencia de la alteración de tales condiciones. Usualmente se emplean bioindicadores de contaminación debido a su especificidad y fácil monitoreo. Las ventajas del uso de bioindicadores como herramienta para determinar la calidad del agua e implementar acciones sobre la recuperación son variadas y la información resultante puede expresarse por medio de índices bióticos que expresan la calidad del agua mediante escalas numéricas (Vásquez *et al.*, 2006).

Existen muchos ejemplos de algas microscópicas que permiten inferir sobre la calidad de los ambientes acuáticos, esto debido a que permiten conocer las fluctuaciones en las masas de agua. Con este fin se caracterizan especies tolerantes o afines a la materia orgánica y que tienen capacidad de descomponerla (Griffith *et al.*, 2002). De las microalgas, las diatomeas son las preferidas para los monitoreos debido a que constituyen un grupo autotrófico que es dominante en muchos sustratos, además de que su identificación es sencilla en comparación con otros grupos. Su uso es ventajoso porque son cosmopolitas, algunas especies son muy sensibles a cambios ambientales, otras son muy tolerantes, su muestreo es sencillo y rápido y pueden cultivarse para estudiarlas en diseños experimentales (Toro *et al.*, 2003).

Es importante en el uso de bioindicadores tener en cuenta que actualmente no se ha encontrado un grupo que pueda considerarse como indicador universal, debido a que todos los ambientes son distintos, incluso dentro de un mismo ecosistema, y en muchos casos se podrán encontrar organismos indicadores que serán específicos de algún tipo de evento. Igualmente, debido a que el conocimiento en el campo de la evaluación de la salud de los ecosistemas aun es escaso, no existe una fórmula general para determinar el estado de un ecosistema (Jorgesen *et al.*, 2005).

Índice Sapróbico

Saprobiedad se refiere a la calidad del agua con respecto al contenido de materia orgánica en descomposición y se estima mediante el cálculo de la demanda biológica de oxígeno o DBO. El índice Sapróbico se basa en que cada organismo de una comunidad es un indicador y si se conocen sus requerimientos ambientales, éste servirá para evaluar la condición de un cuerpo de agua según su presencia o ausencia. No obstante un cuerpo de agua está compuesto por múltiples especies, de manera que un ambiente será un gran compendio de taxones con distintos atributos de tolerancia. Este índice sapróbico, que fue propuesto en 1955 por Pantle y Buck, hace una aproximación totalmente cuantitativa que pretende reemplazar la estimación subjetiva que se había desarrollado previamente (Kolkwitz y Marsson 1909, citados por Sládeček, (1979) para conocer los rangos de tolerancia de las especies (Sládeček, 1979). El índice sapróbico se ha modificado y adaptado según las necesidades de distintos investigadores, pero básicamente su objetivo es determinar el grado de trofía de un cuerpo de agua con base en la información de las especies del sitio a evaluar y ubicarlo en una escala de categorías que clasifica a los cuerpos de agua en diferentes estados, desde oligosaprobiedad (reducida o nula presencia de materia orgánica), hasta un nivel máximo de trofía según el caso (polisaprobiedad), lo que permite que cualquier tipo de agua pueda ser clasificada de acuerdo a esta escala.

Índices multimétricos

Aprovechando esta aproximación de organismos bioindicadores, se han desarrollado diferentes enfoques de investigación, que según Lobo (2002) son cuatro principalmente: el enfoque del análisis de la relación de la abundancia de las especies, que se basa en la comparación con los modelos ecológicos conocidos; el enfoque de los índices de diversidad

que presenta algunas críticas; el enfoque de los análisis multivariados que tiene como propósito analizar grandes cantidades de datos biológicos contrastándolos con atributos del ambiente en el cual se encuentran estas comunidades, con el fin de esclarecer patrones que permitan generar hipótesis sobre la distribución biológica a través de gradientes fisicoquímicos; y el enfoque de los índices bióticos que tiene como objetivo expresar de forma numérica un conjunto de datos de composición de las comunidades, procurando evaluar los efectos de la polución en estas comunidades. Esto se logra asignando a los taxones valores basados en sus tolerancias, de tal forma que la suma de valores en una muestra ofrece una expresión matemática o índice para un punto de evaluación (Lobo, 2002).

El primer índice multimétrico se desarrolló con la intención de medir la integridad biótica basándose en comunidades ícticas, pero pronto se desarrollaron índices similares basados en el concepto original, utilizando otras comunidades biológicas como macroinvertebrados y algas. Dado que algunas comunidades de organismos como las algas perifíticas se ven afectadas por múltiples factores ambientales como el sustrato, la temperatura, la luz, los nutrientes disponibles y la depredación sobre las poblaciones que la componen (además de los cambios sucesionales y estacionales), en algunas ocasiones la interpretación de las respuestas a cambios en las condiciones es un tanto complicada. En muchas ocasiones esta interrelación compleja de variables físicas, químicas y biológicas desafía la habilidad del investigador para detectar cambios de la calidad del agua (Vis *et al.*, 1998), punto en el cual la construcción de índices facilita la compilación de los distintos factores.

Estos índices usan técnicas multimétricas que permiten interrelacionar características fisicoquímicas y de estructura de las comunidades bióticas. Con este fin se identifican medidas de la comunidad o de las especies individuales que son útiles para diagnosticar los principales factores que afectan al ambiente (Griffith *et al.*, 2002). El desarrollo de este enfoque se ha llevado a cabo ampliamente en ríos de Europa y Estados Unidos, sin embargo se encuentran trabajos de bioindicación realizados en sistemas lénticos, donde su aplicación es igualmente válida (Hering *et al.*, 2004).

Se considera que un índice multimétrico debe cumplir ciertas reglas: un apropiado sistema de clasificación, una selección de variables que midan de manera efectiva los signos de la condición del cuerpo de agua, métodos de muestreo de campo estandarizados y técnicas estadísticas que puedan extraer los patrones biológicos importantes (Karr 1999). Si se cumple

con estas reglas, el índice obtenido considerará múltiples impactos y combinará medidas individuales en una única medida que podrá usarse para evaluar la condición global de un humedal.

Perifiton

El perifiton se entiende para este estudio como el conjunto de algas microscópicas que viven adheridas a algún tipo de sustrato, natural o no, que puede llegar a desempeñar un papel fundamental al contribuir hasta con cerca del 70% de la productividad de un sistema acuático. Esta comunidad presenta una alta tasa de reciclaje de nutrientes, dado que en ella se alojan muchos organismos descomponedores y depredadores. Además de permitir determinar la productividad del sistema, el estudio del perifiton posibilita conocer el estado de eutrofización del mismo y los efectos que una fuente de contaminación pueden estar causando en dicho ambiente.

Algunas investigaciones previas han demostrado que ciertas características del perifiton como la biomasa, la diversidad y la composición taxonómica responden a gran parte de los cambios en la calidad del agua. Estos resultados permiten señalar que la comunidad perifítica es una buena indicadora de la calidad del agua. Por otra parte, ya se ha establecido que la abundancia y composición de la comunidad de algas perifíticas está relacionado con los factores medioambientales (Vis *et al.*, 1998).

Algunos estudios han encontrado que variables como el fósforo total, los sustratos gruesos y sumergidos y la condición fisiológica de la vegetación adyacente se relacionan con las características del perifiton. Por ejemplo, la abundancia de las especies perifíticas se corresponde con el tamaño del cuerpo de agua y con los hábitats disponibles. Otros factores que influyen en la abundancia de las algas perifíticas son los fosfatos, los sólidos disueltos, la conductividad (Winter y Duthie, 2000) y los disturbios causados por las labores agrícolas cerca de las orillas del cuerpo de agua.

Entre las características del perifiton que responden a los cambios en la calidad del agua se ha registrado que la biomasa, la diversidad y la composición taxonómica son variables indicadoras. Estudios recientes demuestran que la cantidad de algas de la comunidad perifítica se relaciona con la calidad del agua; sin embargo las características que responden a

cambios en la calidad del agua no siempre son las mismas. Por ejemplo, ciertos estudios han hallado correlaciones entre los índices de diversidad o la autoecología de algunas especies con la calidad del agua, mientras que otros reportan fuertes respuestas de los índices de biomasa (Vis *et al.*, 1998). Se ha mostrado que los ecosistemas acuáticos se ven fuertemente afectados por la eutrofización y se ha determinado que ésta en algunas ocasiones trae consigo la pérdida de diversidad, aunque en algunos casos se ha encontrado que aumenta. Algunos autores proponen que la diversidad perifítica es máxima con niveles de disturbio entre bajos e intermedios (Biggs *et al.*, 1998; Hillebrand y Sommer, 2000).

Las algas que componen el perifiton tienen tiempos generacionales de horas a días, lo cual es muy poco si se compara con los periodos vitales de otros organismos (Tont, 1976) como peces y macroinvertebrados, también usados como indicadores, por lo cual las algas señalan bastante bien los cambios recientes en las condiciones del agua. Por otra parte, las algas tienen una presencia asegurada en los humedales, de manera que siempre será posible hallarlas en las valoraciones de calidad que se programen en estos ecosistemas.

En casi todas las latitudes el perifiton de aguas dulces presenta una estructura típica dominada por diatomeas, algas verdes y cianobacterias (Kalff, 2002). Los géneros más comunes de algas epipélicas (que habitan sobre el fango) son *Nitzschia*, *Navicula*, *Gyrosima*, *Fragilaria*, y *Surirella*; entre las epilíticas (adheridas a piedras) están *Anabaena*, *Asterionella*, *Gyrosima*, *Oscillatoria* y naviculaceas en general; y dentro de las epifíticas (adheridas a macrófitas) se destacan *Cocconeis*, *Cymbella*, *Achnanthes* y *Gomphonema* (Roldán, 1992).

Diatomeas

Las diatomeas son un grupo de algas pardas eucariotas del reino protista pertenecientes a la clase Bacillariophyceae que según evidencia fósil se registran desde el periodo jurasico temprano y que se cree se tuvieron origen mediante endosimbiosis secundaria, es decir un eucariota no fotosintético adquirió un cloroplasto al fagocitar y mantener como endosimbionte un eucariota fotosintético, probablemente un alga roja (Mauseth 1995, Koistra – Medlin 1996, Falkowski 2004).

La principal característica distintiva de las diatomeas es su cubierta silíceo denominada frústulo, el cual posee una gran variedad de formas cuyas variaciones han sido usadas por los

expertos como características diagnósticas para clasificación y determinación taxonómica. El estudio efectivo de estos frústulos se ha debido al avance de la microscopía óptica y electrónica, por lo que se puede considerar que su estudio es relativamente reciente; esta es la razón del continuo descubrimiento de especies que dificulta tener un estimativo certero del número de especies en mundo, no obstante algunos científicos como Mann y Dropp consideraron que con la aplicación del concepto moderno de especie y técnicas como la biología molecular, el número podría acercarse a 10^5 (Round 1990, Hock *et al.*)

Las diatomeas son actualmente utilizadas en una gran variedad de áreas de aplicación en donde son ampliamente investigados, por tanto el número de especialistas en diatomeas y de publicaciones en el área crece rápidamente. Entre estas aplicaciones una de las más reconocidas y que cuenta con más desarrollo es la bioindicación. La importancia de las diatomeas como herramienta bioindicadora se debe principalmente a atributos como su abundancia, la característica resistente a deterioro de su frústulo, la seguridad de que cada frústulo representa un único organismo, la identificación taxonómica relativamente sencilla en comparación con otros grupos de algas, la facilidad de conservación y el hecho de no ser necesaria la fijación u observación inmediata de las muestras tomadas, el aumento en la información disponible sobre preferencias ecológicas de las distintas especies y la alta y rápida capacidad de respuesta de las poblaciones a cambios en el ambiente (Canter – Lund 1995).

La utilidad de las diatomeas como bioindicadoras radica en los cambios en las estructuras debidas a factores estresantes y la proliferación de especies asociadas a aportes de determinadas sustancias. Se ha establecido que hábitats de agua dulce en ambientes sin polución existirán muchas especies cada una con poblaciones reducidas y en ambientes alterados o polutos existirá un bajo número de especies, en algunos casos con altas abundancias debido a los factores ecológicos limitantes impuestos por la sustancia polutante (Canter – Lound 1995, Karthick).

En cuanto a funciones ecosistémicas las diatomeas cumplen un importante rol dentro de la productividad primaria global, ya que en algunos ambientes llegan a ser los fotosintetizadores más importantes. Esta actividad constituye de igual manera una función como depuradoras, ya que a través del proceso fotosintético incorporan oxígeno contribuyendo igualmente a la oxidación de la materia orgánica y al aumento del oxígeno disuelto en el agua, el cual es utilizado por diversas comunidades de organismos acuáticos (Margalef 1967).

Estudios sobre diatomeas como indicadoras en Colombia

Son pocas las aproximaciones en cuanto a bioindicación mediante diatomeas las que se encuentran publicadas. No obstante cabe resaltar el trabajo de Díaz - Quiroz y Rivera (2004) que evalúa la composición de diatomeas perifíticas en relación a las variables fisicoquímicas de algunos ríos andinos encontrando algunas relaciones interesantes como la importancia de variables como el fósforo, el nitrógeno total y la conductividad en la conformación de las comunidades de diatomeas perifíticas ; y otros trabajos que han revelado características ecológicas de este grupo como los realizados por Ramírez y Plata-Díaz (2008) que encontraron por ejemplo una alta tolerancia de las especies de *Eunotia* a altos valores de pH y el favorecimiento de *Navicula* y *Nitzschia* por polución debida a altas cargas de materia orgánica, Martínez y Donato (2003) y Castellanos y Donato (2004) igualmente encontraron que hay una relación estrecha entre la diversidad de la comunidad y variables como la conductividad, el amonio y los fosfatos, y entre la dominancia. Sobre bioindicación con diatomeas en humedales hasta el momento no se encuentra información publicada.

3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

Para establecer qué humedales se usarían para la construcción del índice se realizó un muestreo a diez de los distintos humedales distritales. Se tomaron mediciones de oxígeno disuelto, conductividad, sólidos disueltos totales, temperatura y pH. Con base en estos datos, en observaciones de características como la ronda, el tipo de vegetación, los aportes de agua en cada humedal, y en algunas consideraciones logísticas, se escogieron cinco humedales considerados representantes de distintos grados de calidad del agua por causa de la intervención antrópica. Adicionalmente se seleccionó a Meridor como humedal con un menor grado de intervención por encontrarse en una zona relativamente rural pero con condiciones climáticas y altitudinales similares a las de los humedales distritales. La ubicación de los humedales estudiados se puede observar en la figura 1. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

Humedal Jaboque

Ubicado al occidente de la ciudad en la localidad de Engativá, este humedal de 148 hectáreas que aún conserva una angosta conexión con el río Bogotá, recibe aporte continuo de aguas residuales tanto domésticas como industriales descargadas por medio de tuberías. En la ronda el humedal no presenta vegetación al estar completamente rodeado por construcciones, principalmente de vivienda.

La estación en la cual se realizó el muestreo (N 4°42'53.7" W 74° 7'9.1") presentó un espejo de agua durante todo el estudio y se caracterizó por la presencia de pequeñas "islas" de vegetación que fueron construidas con el fin de servir como hábitat para la fauna acuática; las plantas acuáticas dominantes observadas fueron *Bidens laevis* (botoncillo), *Hydrocotyle ranunculoides* (sombrillita de agua) y *Eichornia crassipes* (buchón). Otras especies que presentaron menores porcentajes de cobertura fueron *Azolla filiculoides* (helecho de agua), *Nasturbium officinale* (berro de agua), *Schoenoplectus californicus* (junco nativo) y *Cyperus rufus* (cortadera).

Humedal Guaymaral

Este humedal de 50 hectáreas (15.5 de zona inundable) se encuentra al norte de la ciudad en la localidad de Suba. Las zonas aledañas se encuentran en su mayoría sembradas con pastos para ganadería o rellenadas al ser terrenos aledaños a la autopista norte. El humedal recibe aguas negras a través de canales de vertimiento relacionados principalmente con el complejo comercial Bima; no obstante Guaymaral se considera por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) como uno de los humedales distritales menos afectado por la presión urbana.

Entre las especies de plantas observadas en cercanías de la estación de muestreo (N 4°48'27.9" W 74°2'43.1") están *Hydrocotyle ranunculoides*, *Rumex conglomeratus* (lengua de vaca), *Cyperus rufus*, *Eichornia crassipes*, *Juncus effusus* (junco), *Eleocharis* sp (velita), *Schoenoplectus californicus*, *Polygonum hydropiperoides* (barbasco) y *Solanum americanum* (hierba mora). Cabe resaltar además la presencia de *Pennisetum clandestinum* (pasto kikuyo) que penetra en el humedal en varios sectores, adicionalmente se observó presencia constante de ganado. El espejo de agua en esta zona se limitó a lo largo del estudio a pequeños parches de agua que no excedían los 2m² y cuya profundidad no era superior a 20 cm.

Humedal Juan Amarillo

Este humedal ubicado al noroccidente de la ciudad pertenece a las localidades de Engativá y Suba y se considera el humedal de mayor extensión con 223 hectáreas. Entre los impactos que sufre se cuentan la contaminación por aguas residuales, la reducción de su superficie por efectos de rellenos e invasión de riberas y el aporte permanente de sedimentos provenientes de toda la cuenca de captación que se inicia en los cerros orientales. Aunque actualmente las aguas del río Bogotá no ingresan al humedal, durante muchos años el humedal Juan Amarillo tuvo una importante función en la regulación de su caudal.

La estación de muestreo (N 4°44'24.3" W 74°6'59.1") presentó un amplio espejo de agua únicamente durante el primer muestreo; posteriormente *Eichornia crassipes* ocupó la zona totalmente. También se encontraron parches de *Hydrocotyle ranunculoides*, *Spirodela intermedia* (lenteja de agua), *Schoenoplectus californicus*, *Bidens laevis* y otras especies de plantas acuáticas con porcentajes de cobertura mínimos. La zona aledaña comprende una

franja de potrero dominada por *Pennisetum clandestinum* y *Holcus lanatus* (pastos) seguida por urbanizaciones.

Humedal Meridor

Este humedal se encuentra en el municipio de Tenjo al norte de Bogotá y hace parte de un complejo residencial rural. El humedal es receptor de aguas lluvias que por escorrentía lavan los terrenos de la ronda, compuestos principalmente por zonas de pastos, jardines y algunos pequeños cultivos.

Tanto en la estación de muestreo (N 4°51'9.4" W 74°7'40.7") como en el resto del humedal la cobertura por macrófitas es apreciablemente menor en comparación con los otros humedales del estudio. No obstante Meridor presentó la mayor riqueza de especies. Entre las dominantes se encuentran *Spirodela intermedia*, *Azolla filiculoides*, *Hydrocotyle ranunculoides*, *Ludwigia peploides* (clavito) y *Schoenoplectus californicus*.

Humedal Santa María del Lago

Ubicado en la localidad de Engativá a pocas calles del cruce de las avenidas Boyacá y calle 80, este humedal se abastece por aguas lluvia y tres nacederos subterráneos. La EAAB lo considera como el de mejor calidad del agua, al tener mínimo el aporte de aguas residuales. No obstante es uno de los que tienen mayores problemas de conservación por estar totalmente inmerso en una matriz urbana, que en años anteriores redujo de manera considerable el área del mismo y degradó la cobertura vegetal nativa de su ronda. Actualmente se han sembrado alisos, saucos, acacias y otros árboles nativos.

La estación de muestreo (N 4°41'50.1" W 74°5'50.6") se ubicó cerca de un parche de *Schoenoplectus californicus* y presentó espejo de agua durante todo el estudio. Otras especies observadas fueron *Typha latifolia* (enea) que tiene una amplia distribución y dominancia en todo el humedal, *Bidens laevis*, *Hydrocotyle ranunculoides*, *Lemna minor*, *Lemna minuta* (lentejas de agua), *Spirodela intermedia* y *Azolla filiculoides*.

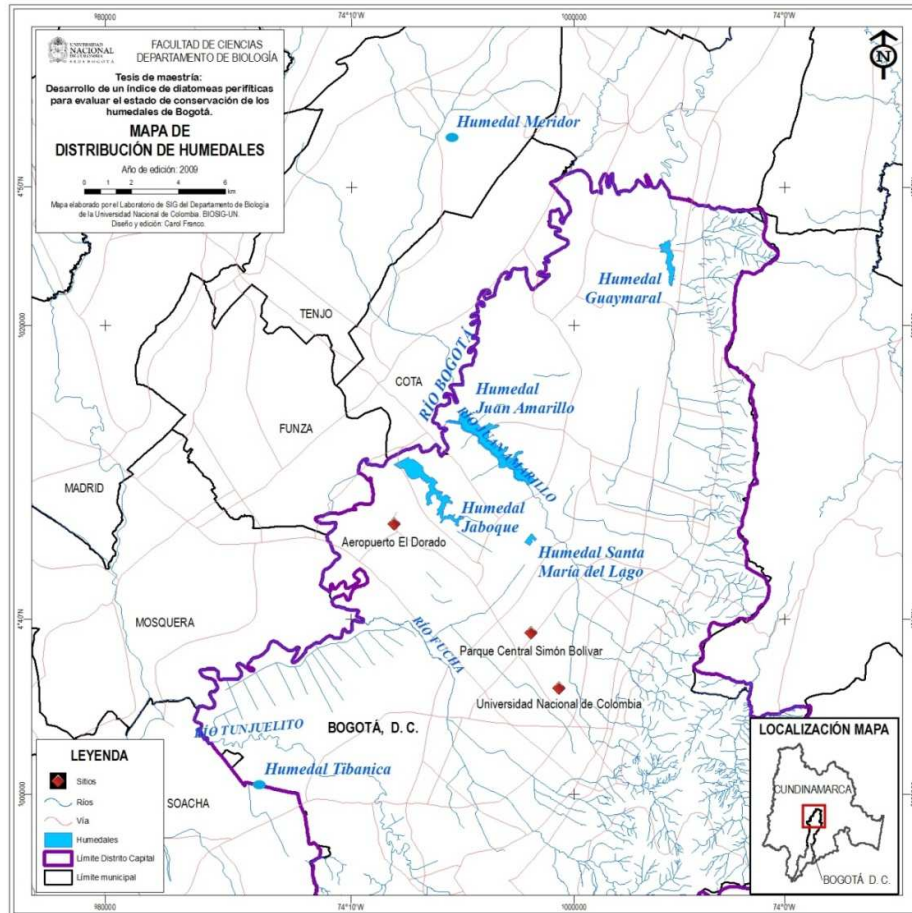


Figura 1. Ubicación geográfica de los humedales evaluados en el estudio (Noviembre 2007 – Agosto 2008).

Humedal Tibanica

Este humedal del suroccidente de la ciudad pertenece a la localidad de Bosa y al municipio de Soacha y comprende aproximadamente 18 hectáreas, de las cuales menos de 10 corresponden a espejo de agua. Al igual que otros humedales, su área se ha visto disminuida por el avance de rellenos ilegales en los que se construyen viviendas que a su vez vierten aguas sin tratamiento a la zona inundable del humedal. Además recibe aportes contaminantes de la quebrada Tibanica. Otro factor de alteración es el depósito de residuos de ceniza producto de la quema de madera para la obtención de carbón vegetal, fenómeno que también ha causado una considerable disminución en el área de cobertura vegetal.

La zona de muestreo (N 4°36'8,6" W 74°12'10,6"), que se ubicó cerca de uno de los canales que aportan aguas negras al humedal, presentó para el primer muestreo una amplia zona de espejo de agua, no obstante en cada fase del estudio se observó una disminución del mismo a

causa del avance de *Eichornia crassipes* que a pesar de las actividades de cosecha por parte de la administración del humedal se expandía progresivamente. Otras especies de macrófitas encontradas fueron *Schoenoplectus californicus*, *Lemna minor*, *Spirodela intermedia*, *Lemna gibba* y *Rumex conglomeratus* (lengua de vaca). Además se destaca en algunas zonas el avance de *Pennisetum clandestinum*.

3.2 Temporalidad de los muestreos

Se realizaron cuatro muestreos correspondientes a distintos periodos climáticos. En la figura 2 se puede observar el comportamiento de los promedios de precipitación en la Sabana de Bogotá durante el periodo de estudio, iniciando con el primer muestreo realizado en Noviembre de 2007 que fue un periodo de lluvias, el segundo muestreo realizado en los días finales de Febrero e iniciales de Marzo de 2008 y que coincide con la finalización del periodo seco y transición al periodo lluvioso, el tercer muestreo llevado a cabo hacia finales de Mayo de 2008 cuando se daba la transición entre el periodo de lluvias y el periodo seco, y por último el cuarto muestreo realizado en Agosto de 2008 durante la época más seca del estudio (IDEAM). Este patrón de comportamiento en las precipitaciones en la sabana es constante, no obstante hacia la zona norte de Bogotá los volúmenes precipitados son mayores respecto a la zona sur, de esta manera Tibanica presenta el promedio anual de precipitación más bajo entre los humedales estudiados con 450 – 550 mm / año, mientras Juan Amarillo y Jaboque tienen un promedio de 551 – 750 mm / año, Guaymaral y Santa María del Lago cuentan con una precipitación anual promedio variable entre 751 – 750 mm / año (Secretaría distrital de Ambiente 2007).

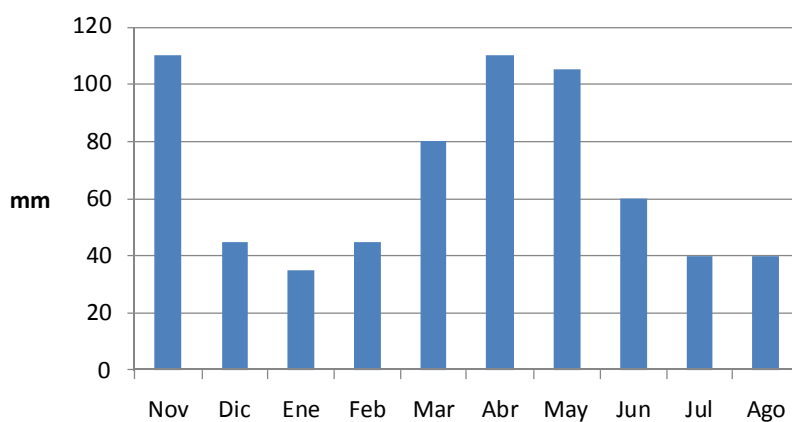


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación total en la Sabana de Bogotá (noviembre y diciembre de 2007 y enero – agosto de 2008).

3.3 Campo

En tres sitios del punto de muestreo de cada humedal y para cada periodo climático, se tomaron muestras de diatomeas epifíticas sobre plantas macrófitas de alta frecuencia en todos los humedales (*Schoenoplectus californicus* y *Eichornia crassipes* o *Hydrocotyle ranunculoides*). Además se utilizó un sustrato artificial consistente en láminas plásticas de 28 x 21.5 cm que tuvieron tiempos de colonización de aproximadamente 3 meses.

La toma de muestras se realizó con un instrumento de colecta que consistió en un cilindro plástico de 3 cm de diámetro con uno de los extremos rodeado por material de caucho flexible (figura 3). Para la colecta se puso el extremo adherente de este instrumento sobre el sustrato escogido y con ayuda de un pincel se “raspó” el área que quedó en el área interna del cilindro correspondiente al extremo adherido. Con una pipeta plástica Pasteur se recogió este raspado, se transfirió a un frasco plástico y se conservó en solución transeau (agua, alcohol y formol en proporciones 6:3:1). Este procedimiento se realizó 10 veces para cada sustrato (natural y artificial) y los 10 raspados se conservaron en el mismo frasco.



Figura 3. Instrumento usado para la colecta de las muestras de perifiton.

De las láminas plásticas usadas como sustrato artificial en cada muestreo, un lado se utilizó para complementar el muestreo de diatomeas y el otro lado se raspó, se lavó con agua destilada y se almacenó en su totalidad en un frasco oscuro para la determinación posterior en laboratorio de clorofila.

Paralelo a la toma de muestras se realizaron in situ mediciones de temperatura del agua, sólidos disueltos (mg/L), conductividad (μS) y pH con un equipo de medición EXTECH Exstik EC 500, oxígeno disuelto (mg/L) con un equipo de medición EXTECH Exstik DO 600, cloro libre, cloro total (mg/L), cloruros (mg/L) y dureza (mg/L CaCO_3) con test de medición colorimétrica

Merck y transparencia con disco Secchi. Adicionalmente se tomaron dos muestras de agua, una para realizar la prueba de demanda biológica de oxígeno (DBO) en el laboratorio ANALQUIM LTDA y otra para hacer determinaciones de nitratos (mg/L NO_3) por el método de reducción por Cadmio, nitritos (mg/L NO_2) por el método de diazotización, amonio (mg/L NH_3) por el método Nessler y ortofosfatos (mg/L P) por el método de ácido ascórbico con un espectrofotómetro HACH DR/2000 y sólidos totales en suspensión mediante filtración ($1,7 \mu$ de poro) y secado en estufa. En todos los casos se siguieron las metodologías estándar (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA) y WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPF), 1995).

3.4 Laboratorio

Para el análisis de las muestras de perifiton se siguió un protocolo de limpieza que consistió en tomar un mililitro de cada muestra, agregarle cinco mililitros de agua destilada, centrifugar a 2000 rpm y luego remover el sobrenadante verificando en el microscopio óptico que no se estuvieran desechando ejemplares de diatomeas. Este paso, que tiene como objetivo lavar la solución transeau, se repitió dos veces. Posteriormente se agregaron a la muestra entre 8 – 10 ml de peróxido de hidrógeno y se llevó a baño maría (80°C) durante aproximadamente 8 horas hasta que la muestra se veía como un precipitado blanquecino; se asumía por tanto que la materia orgánica se había eliminado por oxidación. En seguida se agregaron cinco gotas de HCl (1N) para neutralizar el pH y por último, una vez la muestra alcanzó la temperatura ambiente, se adicionaron cinco gotas de NH_3 (1N) con el fin de disgregar el material.

Para el montaje de las diatomeas las muestras se lavaron siguiendo los mismos pasos realizados para eliminar la solución transeau. Una vez limpias se tomaron tres gotas que se depositaron en un cubreobjetos. Mediante aplicación de calor se evaporó el agua contenida en la muestra y se agregaron una o dos gotas de resina fijadora Naphrax®, completando el montaje sobre una placa portaobjetos. La muestra restante se fijó con etanol al 70% para la posterior observación en microscopía electrónica de barrido (MEB), para lo cual se deshidrató una gota de la misma y se metalizó con oro-paladio.

Se realizaron observaciones de microscopía óptica a 1000X en un microscopio Carl Zeiss; de cada muestra se realizaron conteos hasta alcanzar 500 valvas de la especie más abundante.

Las observaciones de microscopía electrónica se realizaron en el departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia en un microscopio Quanta 200, a alto vacío. Se fotografió la mayor cantidad de morfotipos distintos hallados en las muestras con el fin de realizar la determinación taxonómica al nivel de especie, principalmente de los ejemplares más pequeños.

La determinación taxonómica se llevó a cabo siguiendo las claves de Kramer y Lange-Bertalot (1986, 1991) y Lange-Bertalot (1995), y revisando las descripciones de Lange-Bertalot (1998, 2000 y 2007).

Para la determinación de la clorofila se utilizó el método monocromático filtrando al vacío un volumen de la muestra con un filtro de microfibras de vidrio de 47 mm de diámetro y poro de 1,7 micras. Este filtro se sometió a extracción de la clorofila en un tubo de ensayo, al cual se le adicionaron 10 ml de acetona sometiéndolo a vibraciones en un zonicador durante 5 minutos. El tubo se colocó en refrigeración y 12 horas después se realizaron 5 minutos adicionales de vibración y se procedió a realizar las lecturas, antes y después de acidificar, a 480, 630, 647, 664, 665 y 750 nm en un espectrofotómetro Agilent 8453. La acidificación se realizó con solución 0.1 N de HCL y la solución de acetona usada para la extracción se empleó también como patrón de calibración.

3.5 Análisis estadísticos

Para evaluar las comunidades de diatomeas perifíticas se calcularon índices de diversidad de Shannon-Wiener, índices de dominancia de Simpson e índices de riqueza de Margalef. Con estos datos se realizaron gráficas comparativas y se calcularon porcentajes de similitud de Bray Curtis entre los humedales en cada periodo para establecer posibles patrones de organización de las comunidades de diatomeas. Estos cálculos se realizaron con el software de libre distribución PAST-PROGRAM, versión 1.95.

El cálculo de los valores óptimos y las tolerancias se llevó a cabo mediante el método del promedio ponderado o "Weighted Averaging" que permite calcular los valores óptimos a partir del promedio de la variable en las distintas estaciones ponderado por la abundancia de la especie en dichas estaciones; y el rango de las tolerancias como la desviación estándar de estos valores óptimos, según metodología descrita por Almeida y Gil (2001).

Se realizó un análisis discriminante con todas las variables fisicoquímicas medidas durante el estudio (en cada humedal y en cada periodo) para evaluar posibles diferencias significativamente estadísticas entre humedales según sus características fisicoquímicas. Este análisis resume en unas pocas funciones discriminantes toda la variación debida al conjunto de variables fisicoquímicas y la maximiza para realizar la separación de las observaciones en grupos según su similitud. Los resultados se evaluaron con base en los valores p (que miden la significancia estadística de cada función discriminante) y los valores Wilks λ que van de 0 a 1 según la variación entre las observaciones no explicada por las funciones discriminantes, siendo cero una separación perfecta de los grupos. Los coeficientes estandarizados de función permiten establecer la importancia relativa de cada variable dentro de cada una de las funciones.

Para evaluar la semejanza entre humedales según su comportamiento fisicoquímico en cada periodo se realizó un análisis de componentes principales, el cual permite resumir en unas pocas variables o componentes la variación debida al total de los datos fisicoquímicos colectados. Este análisis permitió clasificar los humedales por su variabilidad con respecto a los distintos parámetros fisicoquímicos. Por último, para evaluar la posible asociación entre las especies de diatomeas y las variables fisicoquímicas se realizó un análisis de correspondencia canónica. El análisis discriminante, el de componentes principales y el de correspondencia canónica se realizaron con el programa CANOCO 4.5.

3.6 Construcción de los índices

3.6.1 Índice a nivel de especie o IDHB (Indicé de Diatomeas para Humedales Bogotanos)

Para la construcción del índice se siguió la metodología propuesta por Jiang y Shen (2003 Y 2006), la cual se basa en distintos pasos. El primero consiste en calcular los valores de polución de las variables fisicoquímicas en cada uno de los humedales, según la siguiente fórmula:

$$IP = \sum_{i=1}^n \frac{C}{CL}$$

Donde C es el valor medido de la variable en el humedal y CL es el valor límite de dicha variable según el decreto 1594 de 1984 de la legislación colombiana. La sumatoria del IP de cada una de las variables fisicoquímicas da como resultado para cada humedal un IP distinto que además varía según el periodo climático.

Posteriormente se calculó el valor de polución de cada especie (VPT) según la fórmula:

$$VPT = \frac{\sum_{i=1}^n (Ln 10IP/n)^i}{N}$$

Donde n es el número de variables fisicoquímicas medidas, IP corresponde al valor calculado anteriormente y N el número de especies, *i* representa la ocurrencia de la especie en dicha estación. Este VPT es único para cada especie y depende de la aparición en los distintos humedales y de las características fisicoquímicas de los mismos.

Por último se calculó el valor de polución para la comunidad de diatomeas perifíticas (denominado Índice de Diatomeas de los Humedales de Bogotá – IDHB) de cada humedal en cada periodo según la siguiente fórmula:

$$IDHB = \frac{\sum_{i=1}^n (VPT)^i}{n}$$

Donde n es el número de especies. Este valor es el indicador del grado de polución en cada humedal en el periodo climático correspondiente, con base en las especies de diatomeas perifíticas.

Para una mejor interpretación de este último valor de polución se realizó una transformación porcentual en la cual el 100% correspondió al mayor valor del IDHB calculado. Este resultado se restó a 100 para obtener una calificación directamente proporcional al estado de conservación (a mayor valor del IDHB, mejor estado limnológico). Las escalas de clasificación (de menor a mayor calidad del agua) se construyeron mediante la técnica de cuartiles.

3.6.2 Índice a nivel de género o IGD (Índice para Géneros de Diatomeas)

La construcción del índice a nivel de género (**IGD**) se realizó siguiendo la misma metodología propuesta para la construcción del índice a nivel de especie o **IDHB** descrita anteriormente, pero con los datos agrupados en la categoría taxonómica de género. Así, los valores de polución de las variables fisicoquímicas en cada uno de los humedales o IP son iguales a los calculados para el IDHB, mientras que los valores de polución de cada género (VPG) se calcularon según la fórmula:

$$VPG = \frac{\sum_{i=1}^n (Ln^{10IP/n})_i}{N}$$

Donde n es el número de variables fisicoquímicas medidas, IP corresponde al valor mencionado anteriormente y N el número total de géneros, donde f_i representa la ocurrencia del género en dicha estación.

El valor del IGD se calculó según la fórmula:

$$IGD = \frac{\sum_{i=1}^n (VPG)_i}{n}$$

Donde n es el número de géneros presentes en el humedal. Este valor **IGD** es el indicador del grado de polución en cada humedal en el periodo climático correspondiente con base en los géneros de diatomeas perifíticas. A este valor se realizó una transformación porcentual igual a la realizada con el IDHB y la escala de clasificación se construyó mediante la técnica de cuartiles.

3.6.3 índice sapróbico o ISHB (Índice Sapróbico para los Humedales Bogotanos)

Para la construcción del índice sapróbico se siguió en parte la metodología descrita por Sládeček (1979) con base en el índice sapróbico de Pantle y Buck. En primer lugar se calcularon los valores sapróbicos (VST) para aquellas especies que tuvieron una frecuencia de aparición mayor o igual al 10%; la fórmula correspondiente es:

$$VST = \frac{\sum_{i=1}^n (h * S_i)_i}{N}$$

Donde h es la abundancia relativa de la especie, S_i es el valor de DBO calculado y N corresponde al número de estaciones en las cuales se encontró la especie, i representa la ocurrencia de la especie en dicha estación. Con estos valores VST se calculó el índice sapróbico para cada estación según la fórmula

$$ISHB = \frac{\sum_{i=1}^n (VST)}{n}$$

Donde n es el número de especies presentes en la estación para la cual se calcula el ISHB.

La evaluación del resultado del ISHB se hizo con base en la siguiente escala basada en los valores de DBO, la cual fue propuesta también por Sládeček (1979):

Condición	Límite superior	Interpretación
Xenosapróbica	1	Aguas claras casi sin polución
Oligosapróbica	2,5	Aguas claras con polución despreciable
β mesosapróbica	5	Aguas con cierto nivel de polución y calidad mediana
α mesosapróbica	10	Aguas con un considerable grado de polución
Polisapróbica	50	Aguas altamente polutas
Isosapróbica	400	Aguas de un muy alto nivel de polución
Metasapróbica	700	Aguas de condiciones sépticas con formación de H_2S

3.6.4 Correlaciones de los índices con las variables fisicoquímicas

Para evaluar la significancia de los índices propuestos, se calcularon correlaciones de Pearson entre los valores de dichos índices y los IP de las estaciones, así como entre los índices y las variables fisicoquímicas. Para estos análisis se utilizó una hoja de cálculo EXCEL.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización de la comunidad de diatomeas

4.1.1 Diversidad, riqueza y dominancia

La evaluación realizada en términos de diversidad, riqueza y dominancia permitió esclarecer algunos atributos de las comunidades de diatomeas perifíticas de los humedales, pero no evidenció un patrón claro de organización del conjunto (Figura 4). En términos generales cabe resaltar que Guaymaral es el humedal más diverso, con mayor riqueza de especies y con menor dominancia del estudio. No obstante esta situación no fue constante en el estudio ya que este humedal pasó de tener la menor diversidad durante el primer periodo, a llegar a tener los más altos valores en los periodos tercero y cuarto. Igualmente su riqueza de especies fue en aumento durante el estudio conforme su índice de dominancia decreció.

En el otro extremo aparece Meridor, que fue el humedal menos diverso, con menor número de especies, mayor índice de dominancia y con un comportamiento en el tiempo inverso al de Guaymaral, al disminuir desde el primer hasta el tercer periodo sus valores en el índice de Shannon-Wiener. Posteriormente durante el cuarto periodo se observó un ligero aumento de su diversidad, además de un considerable aumento en la riqueza de especies y en el valor de dominancia, que alcanzó su valor máximo durante este periodo.

El comportamiento de estas variables en Juan Amarillo fue irregular. En los periodos de lluvias y transición de lluvias a sequia este humedal tuvo unos valores de diversidad elevados, valores de riqueza altos y dominancias bajas. En otros muestreos su comportamiento fue inverso y en algunos casos los valores fueron intermedios, por lo que es difícil establecer un patrón claro para este humedal. No obstante cabe destacar la altísima dominancia que presentó durante el tercer periodo, la cual fue la mayor del estudio.

Jaboque tuvo hasta el tercer periodo un decrecimiento de sus índices de diversidad y de riqueza conforme su dominancia aumentó. En el cuarto periodo los valores de diversidad aumentaron ligeramente y la dominancia disminuyó. Tibanica tuvo un comportamiento similar al de Jaboque.

En Santa María del Lago los índices se mantuvieron relativamente estables en los cuatro periodos. Sin embargo los mayores valores de diversidad y riqueza en este humedal se observaron en el segundo periodo de estudio.

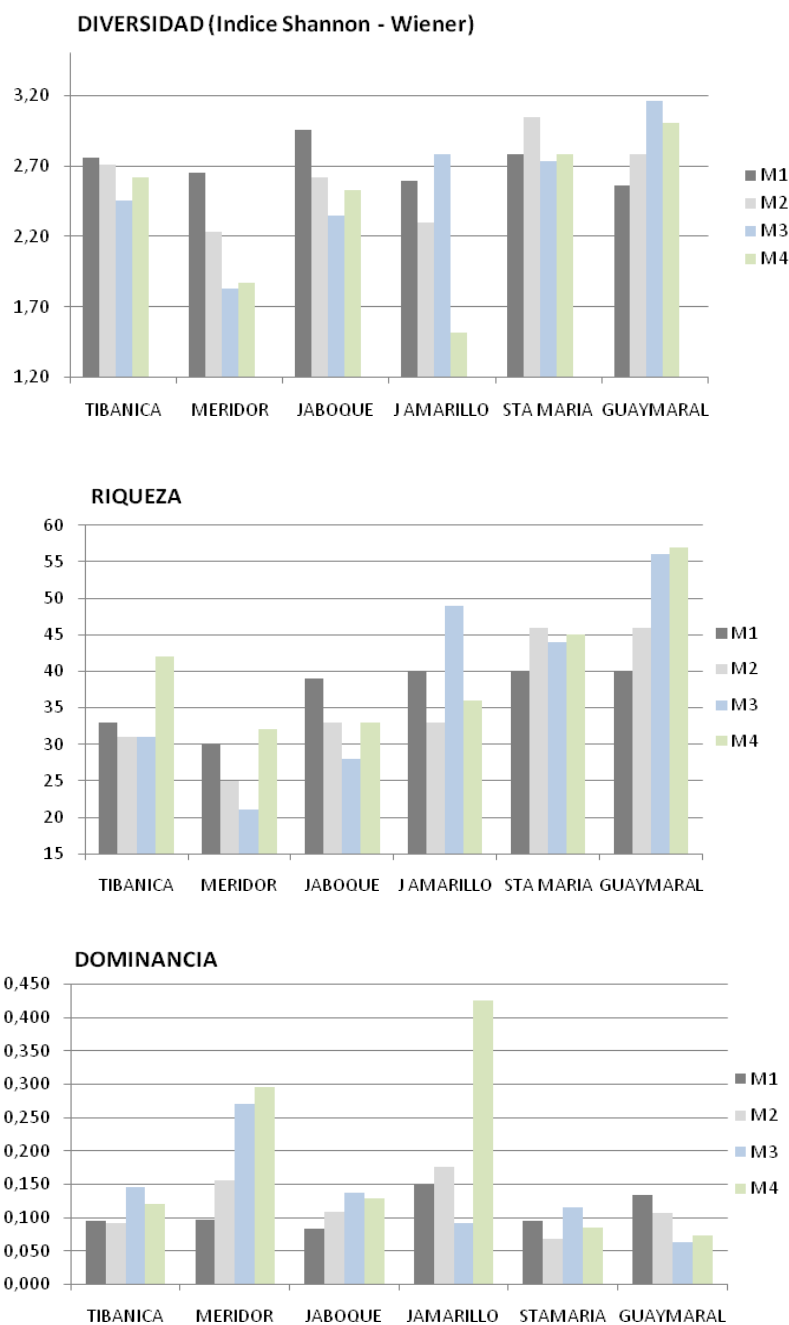


Figura 4. Índices de diversidad, riqueza y dominancia en las comunidades de diatomeas perifíticas calculados para los humedales durante los periodos de estudio. (M1: Noviembre de 2007 - lluvias, M2: febrero y marzo 2008 - transición sequia - lluvias, M3: mayo 2008 transición lluvias - sequia, M4: agosto 2008 – sequia).

4.1.2 Análisis de similitud entre humedales

Las tablas 1 a 4 resumen los valores de similitud de Bray Curtis entre los humedales según la composición de sus comunidades de diatomeas. Los cuadros sombreados en color azul corresponden a los humedales más similares y los sombreados en naranja a los que presentan mayores diferencias en su composición de diatomeas perifíticas. Para el primer periodo (Tabla 1) se observa que los humedales con mayor porcentaje de similitud (50.1%) fueron Tibanica y Jaboque, seguidos por Meridor y Guaymaral con 42.3%, mientras los humedales más disimiles entre sí fueron Guaymaral y Jaboque que tuvieron un porcentaje de similitud de 11.8%, y Santa María del Lago y Juan Amarillo con 10.9%. Las similitudes entre otros humedales fueron variables pero con porcentajes menores al 31.4%.

Tabla 1. Valores de similitud de Bray Curtis entre los humedales durante el primer periodo de estudio (lluvias, noviembre de 2007).

PERIODO 1	Tibanica	Meridor	Jaboque	Juan Amarillo	Santa María	Guaymaral
Tibanica	*	31,4	50,1	17,5	28,8	20,2
Meridor	*	*	23,9	23,2	23,3	42,3
Jaboque	*	*	*	23,01	29,3	11,8
Juan Amarillo	*	*	*	*	10,9	19,4
Santa María	*	*	*	*	*	13,6

En el segundo periodo correspondiente a la época seca (Tabla 2), los porcentajes de similitud fueron mucho más bajos en comparación con el periodo lluvioso. La mayor similitud observada fue de apenas 33.6% entre Santa María del Lago y Jaboque, seguidos por un 26 % de similitud entre Jaboque y Juan Amarillo, valor muy cercano al que mostraron en el primer periodo. Por otra parte Meridor presentó similitudes bajas con todos los humedales, en especial con Jaboque (4.5%) y Tibanica (3.4%).

Tabla 2. Valores de similitud de Bray Curtis entre los humedales durante el segundo periodo de estudio (Sequia, febrero de 2008).

PERIODO 2	Tibanica	Meridor	Jaboque	Juan Amarillo	Santa María	Guaymaral
Tibanica	*	3,4	15,5	17,6	14,1	7,3
Meridor	*	*	4,5	12,3	9,2	7,5
Jaboque	*	*	*	26,09	33,6	11,9
Juan Amarillo	*	*	*	*	19,8	8,4
Santa María	*	*	*	*	*	13,8

En el tercer muestreo (Tabla 3) las similitudes también fueron bajas comparadas con las del primer periodo, pero similares a las del segundo muestreo. En este tercer periodo, caracterizado por ser una transición de la época lluviosa a la temporada seca, Tibanica tuvo altos porcentajes de similitud con Juan amarillo (32%) y Guaymaral (30.9%). Cabe también resaltar la alta similitud entre Juan Amarillo y Guaymaral. Igualmente en este periodo Meridor evidenció las menores similitudes con otros humedales, a excepción de Santa María del Lago. Los humedales más disimiles a Meridor fueron Juan Amarillo (5.2%) y Jaboque (3%).

Tabla 3. Valores de similitud de Bray Curtis entre los humedales durante el tercer periodo de estudio (transición lluvias – sequía - mayo de 2008).

PERIODO 3	Tibanica	Meridor	Jaboque	Juan Amarillo	Santa María	Guaymaral
Tibanica	*	11,4	15,5	32,8	18,8	30,9
Meridor	*	*	3	5,2	21,8	8,1
Jaboque	*	*	*	20,3	9,4	17
Juan Amarillo	*	*	*	*	12,6	26,4
Santa María	*	*	*	*	*	14,2

Para el cuarto muestreo (transición de época seca a lluviosa) se encontró un comportamiento de Meridor contrario al del tercer periodo (Tabla 4). Su similitud con Jaboque fue la más alta (51.9%) y con Santa María del Lago el porcentaje estuvo entre los mayores (38.8%). Por otro lado, se encontró que la comunidad de diatomeas más diferente con respecto a la de los demás humedales fue la de Juan Amarillo, que tuvo porcentajes de similitud bajos, en especial con Santa María del Lago (4.4%).

Tabla 4. Valores de similitud de Bray Curtis entre los humedales durante el cuarto periodo de estudio (comienzo de la transición sequía – lluvias - agosto de 2008).

PERIODO 4	Tibanica	Meridor	Jaboque	Juan Amarillo	Santa María	Guaymaral
Tibanica	*	4,8	17,1	7,5	15,5	12,08
Meridor	*	*	51,9	5,1	38,8	8,2
Jaboque	*	*	*	7,1	28,5	23,06
Juan Amarillo	*	*	*	*	4,4	12,4
Santa María	*	*	*	*	*	9,8

4.1.3 Análisis de correspondencia canónica

El análisis de correspondencia canónica (Figura 5), realizado para evaluar la relación entre las especies colectadas y las variables fisicoquímicas que modelaron el comportamiento en los humedales, evidenció las siguientes asociaciones de forma clara:

Las especies más relacionadas con las concentraciones de cloruros altos fueron *Fragilaria acus*, *Eunotia bilunaris*, *Gomphonema truncatum*, cf *Eunotia subarcuatoidea*, *Navicula* sp 7 y *Achnanthes minutissima*. Dentro de las especies con preferencia por ambientes con pH elevados y concentraciones mayores de oxígeno disuelto, se pueden incluir *Cyclotella stelligera*, *Aulacoseira granulata*, *Nitzschia* sp 8, *Gomphonema* cf *olivaceum*, *Navicula* sp 2 y *Nitzschia* sp 6.

El análisis dejó ver gran cantidad de especies asociadas en distinto grado a los fosfatos, el amonio y la DBO, no obstante el ACC revela claramente que especies están más cercanamente relacionadas a cada variable. Estas especies fueron *Gomphonema parvulum*, *Navicula* cf *arvensis*, *Pinnularia* cf *brebissonii*, *Navicula* sp 12, *Hantzschia abundans*, *Gomphonema* sp 5, *Eolimna* sp, *Eolimna* sp 2, *Nitzschia amphibia*, *Gomphonema punae*, *Pinnularia microstauron*, *Navicula* sp 3, *Fragilaria leptostauron*, *Gomphonema pseudoaugur*, *Amphora coffeaeformis*, *Cyclotella meneghiniana*, *Nitzschia* sp 2, *Gomphonema* sp 4, *Fragilaria* cf *pinnata* y *Staurosira mercedes*.

Especies como *Rhopalodia gibba*, *Nitzschia* sp 5, *Nitzschia* sp 2, *Nitzschia* sp 4, *Nitzschia* sp 3 y *Eolimna* sp aparecen preferiblemente en ambientes de baja conductividad y con altos valores de DBO. Por el contrario, *Gomphonema gracile*, *Navicula* sp 1, *Cocconeis placentula*, *Nitzschia amphibia* y *Nitzschia* sp 1 prefieren ambientes de alta conductividad y baja DBO. Con ambientes de alta conductividad se relacionó también *Fragilaria ulna*, y con aguas de valores altos en DBO se encontraron asociadas *Achnanthes* sp 1, *Gomphonema* sp 4, *Gomphonema acuminatum*, *Gomphonema* cf *olivaceum*, *Eolimna* sp 2 y *Amphora coffeaeformis*. Algunas especies asociadas a altos niveles de oxígeno disuelto fueron *Cyclotella meneghiniana*, *Hantzschia abundans*, *Eolimna* cf *subminuscula*, *Navicula* sp 2, *Aulacoseira granulata*, *Nitzschia* sp 5, *Pinnularia microstauron*, *Gomphonema angustatum*, *Achnanthes* sp 2, *Sellaphora* sp y *Pinnularia* cf *subcapitata*.

Otras especies parecen verse favorecidas al ser más abundantes en ambientes con bajos niveles de amonio y nitritos, como fue el caso de *Gomphonema truncatum*, *Gomphonema cf augur* y *Fragilaria ulna*. De manera opuesta, *Gomphonema sp 4*, *Gomphonema angustatum*, *Cyclotella meneghiniana*, *Fragilaria pinnata*, *Nitzschia amphibia*, *Aulacoseira granulata* y *Sellaphora sp* parecen tolerar ambientes con valores altos de estos nutrientes. *Ephitemia adnata* se relaciona, según el análisis, con altos valores de conductividad y *Achnanthes lanceolata* con altos valores de sólidos disueltos.

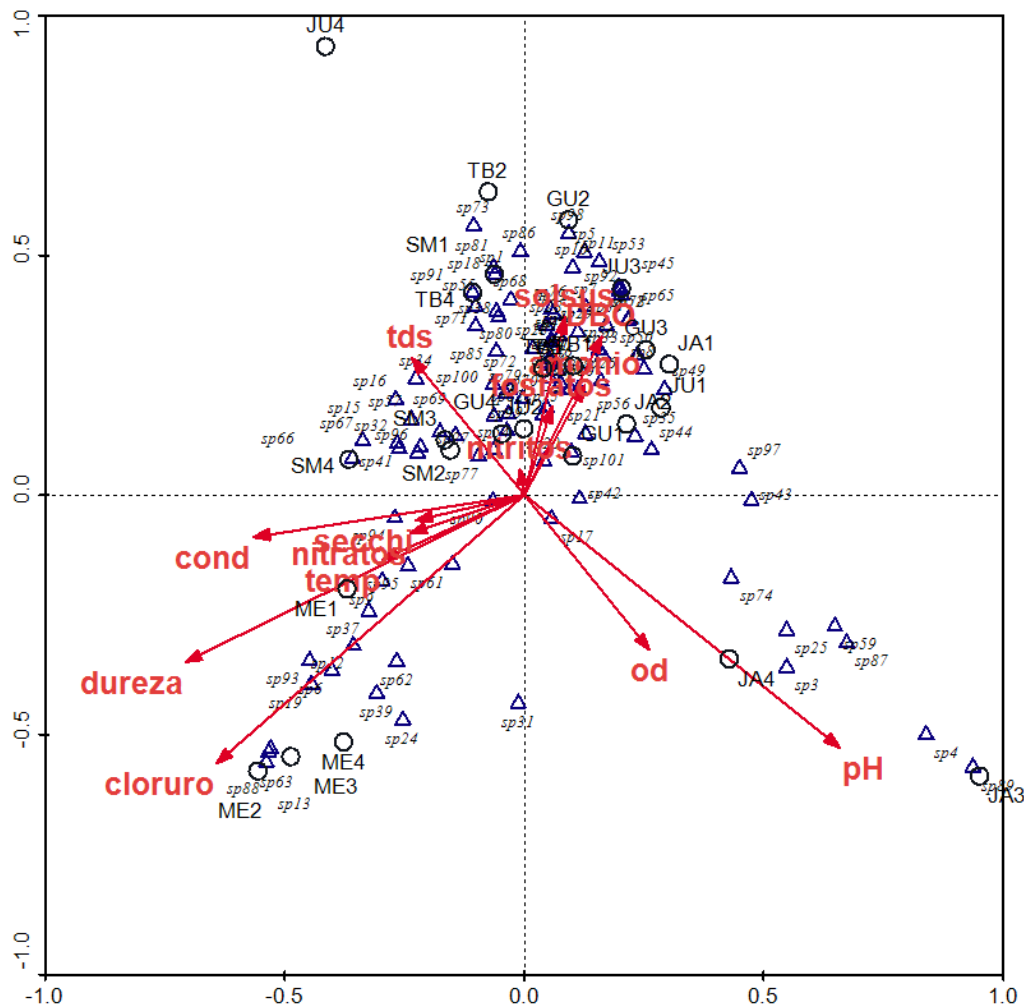


Figura 5. Análisis de correspondencia canónica entre las especies encontradas en el estudio y las variables fisicoquímicas medidas. Los nombres de las especies se registran en la tabla anexa 1.

En la tabla 5 se registran los datos estadísticos del análisis. Allí se puede notar que aunque la correlación entre las especies y el ambiente es alta, la variación en la distribución de las especies explicada por las variables fisicoquímicas no lo es tanto.

Tabla 5. Estadísticos del análisis de correspondencia canónica entre las especies y las variables fisicoquímicas estimadas en el estudio (Noviembre 2007 – Agosto 2008)

Ejes	1	2	3	4
Valores propios	0.567	0.496	0.377	0.311
Correlación especies - Ambiente	0.960	0.981	0.973	0.981
Porcentaje de variación acumulada especies	13.9	26.1	35.4	43.0
Porcentaje de variación acumulada relación ambiente - especies	19.0	35.6	48.2	58.6

4.1.4 Cálculo de óptimos y tolerancias

En las tablas 6 y 7 se registran los óptimos y las tolerancias calculados para las especies que contaron con una frecuencia de aparición superior al 20% en las estaciones muestreadas. En cuanto a los valores óptimos (Tabla 6) puede verse que cada especie presenta combinaciones particulares, de manera que si se observa cada variable fisicoquímica hay especies abarcando una amplia gama de valores como óptimos.

Tabla 6. Valores óptimos calculados para las especies que presentaron una frecuencia de aparición del 20%

ESPECIE / OPTIMO	DBO	FOSFATOS	AMONIO	OXIGENO		PH	CLORUROS	DUREZA
				CONDUCT	DISUELTO			
<i>Achnanthes exigua</i>	18,0	0,1	0,5	256,4	5,4	7,2	16,4	109,1
<i>Achnanthes hungarica</i>	78,8	1,0	14,3	572,2	4,2	7,6	28,3	104,3
<i>Achnanthes lanceolata</i>	24,6	0,2	0,5	864,1	5,3	7,2	51,1	150,2
<i>Achnanthes</i> sp 1	44,2	0,8	5,8	447,5	5,4	7,9	32,0	92,0
<i>Achnanthes</i> sp 2	84,6	0,7	16,5	695,4	4,8	7,7	32,1	119,3
<i>Achnanthidium minutissima</i>	23,7	0,2	1,1	978,7	6,2	7,7	258,7	266,6
<i>Amphora coffeaeformis</i>	39,4	1,1	0,7	657,8	4,9	7,3	49,3	106,5
<i>Anomoeoneis cf sculpta</i>	19,2	0,8	1,4	889,3	3,2	7,2	67,1	122,9
<i>Aulacoseira granulata</i>	20,7	0,3	1,3	181,2	7,9	9,2	20,1	57,7
<i>cf Eolimna</i>	13,3	1,3	0,6	1560,0	1,9	6,8	63,7	165,9
<i>Cocconeis placentula</i>	14,7	0,3	0,7	1057,8	3,6	7,4	240,6	200,3
<i>Craticula ambigua</i>	83,7	0,6	3,0	328,2	3,5	7,4	26,7	97,5
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	47,8	1,0	7,5	578,3	5,3	7,7	57,5	113,7
<i>Cyclotella stelligera</i>	36,0	0,4	1,3	333,1	6,8	8,7	46,8	92,1
<i>Eolimna cf subminuscula</i>	27,2	0,8	0,9	1290,1	3,6	7,2	75,4	170,5
<i>Eolimna cf tantula</i>	28,1	0,7	2,4	600,2	4,7	7,2	87,1	147,9
<i>Eolimna</i> sp	34,4	0,6	1,8	730,2	4,2	7,4	68,2	128,9
<i>Eolimna</i> sp 2	33,1	0,6	1,6	713,9	5,1	7,5	47,2	129,8
<i>Ephitemia adnata</i>	20,8	0,4	0,6	564,8	6,1	7,3	127,4	183,2

<i>Epithemia cf sorex</i>	24,3	0,2	1,1	651,3	7,0	7,4	148,7	216,8
<i>Eunotia bilunaris</i>	13,6	0,5	0,8	1056,3	3,4	7,4	272,2	228,2
<i>Fragilaria acus</i>	20,1	1,6	2,8	1173,4	3,9	7,6	303,1	259,7
<i>Fragilaria cf pinnata</i>	45,5	0,5	4,4	475,3	3,1	7,3	57,3	154,5
<i>Fragilaria leptostauron</i>	36,1	0,7	1,4	371,6	5,7	7,7	48,5	133,8
<i>Fragilaria pinnata</i>	74,5	1,2	3,3	277,7	8,3	8,2	25,9	87,5
<i>Fragilaria ulna</i>	14,2	0,4	0,6	1099,4	3,5	7,4	226,2	208,7
<i>Gomphonema affine</i>	13,1	0,2	0,3	1218,9	3,7	7,6	301,5	241,9
<i>Gomphonema sp 2</i>	28,6	0,3	2,1	1164,9	1,2	7,1	90,2	100,4
<i>Gomphonema sp 3</i>	54,2	0,4	1,5	1204,0	3,8	7,3	172,9	209,5
<i>Gomphonema sp 4</i>	36,2	0,8	3,8	582,5	4,2	7,6	75,6	131,8
<i>Gomphonema sp 5</i>	32,6	0,7	2,7	573,1	3,3	7,4	73,7	152,8
<i>Gomphonema acuminatum</i>	20,8	1,5	2,2	345,3	5,1	8,0	50,4	107,0
<i>Gomphonema angustatum</i>	20,9	0,3	0,8	416,1	5,0	7,3	48,5	142,2
<i>Gomphonema cf olivaceum</i>	23,7	0,5	1,1	265,1	7,2	8,7	25,7	75,6
<i>Gomphonema gracile</i>	21,3	2,4	3,7	572,2	5,4	7,7	93,6	137,8
<i>Gomphonema parvulum</i>	53,2	1,0	6,5	771,3	3,7	7,6	81,0	122,2
<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	54,0	0,8	10,6	718,6	2,6	7,2	45,6	125,9
<i>Gomphonema punae</i>	18,3	0,4	0,8	516,7	4,3	7,6	79,5	152,1
<i>Gomphonema truncatum</i>	15,3	0,3	0,6	1000,0	4,6	7,9	272,2	220,4
<i>Hantzchia abundans</i>	43,2	1,0	5,4	368,7	8,1	8,1	38,2	112,1
<i>Navicula cf leptostriata</i>	25,1	0,3	0,4	240,2	5,7	7,2	16,9	106,1
<i>Navicula sp 1</i>	80,1	2,0	3,0	809,2	1,0	7,1	95,4	116,1
<i>Navicula sp 2</i>	19,7	0,5	1,1	217,1	8,2	9,0	22,0	63,2
<i>Navicula sp 3</i>	70,2	1,1	1,3	459,7	3,9	7,4	45,1	124,6
<i>Navicula sp 5</i>	24,8	0,3	2,6	589,5	6,7	7,6	132,7	182,0
<i>Nitzschia sp 1</i>	37,0	0,8	1,0	580,4	5,4	7,5	83,6	125,2
<i>Nitzschia sp 2</i>	45,6	2,5	8,1	777,1	3,7	7,5	54,1	134,2
<i>Nitzschia sp 3</i>	33,6	0,7	0,7	449,5	4,5	7,4	79,8	142,7
<i>Nitzschia sp 4</i>	26,7	0,7	0,6	309,5	5,9	7,3	35,8	111,3
<i>Nitzschia sp 5</i>	31,7	0,6	1,4	780,0	3,7	7,2	72,1	162,8
<i>Nitzschia sp 6</i>	32,6	0,8	2,1	265,3	7,4	8,8	26,5	72,4
<i>Nitzschia amphibia</i>	22,7	0,4	0,8	969,8	4,4	7,3	78,3	154,1
<i>Nitzschia capitellata</i>	50,1	0,4	7,4	773,9	2,7	7,2	42,1	141,8
<i>Pinnularia brebissonii</i>	54,9	0,6	1,1	377,5	4,1	7,6	42,4	116,4
<i>Pinnularia cf subcapitata</i>	169,6	1,4	1,3	380,8	2,7	7,5	37,0	87,5
<i>Pinnularia maior</i>	99,4	0,6	21,5	589,3	2,8	7,3	34,1	131,1
<i>Pinnularia microstauron</i>	101,9	0,9	11,4	514,1	3,2	7,3	31,3	109,1
<i>Pinnularia viridiformis</i>	112,1	1,1	1,4	498,3	2,6	7,2	44,3	107,7
<i>Rhopalodia gibba</i>	13,6	0,2	0,5	325,5	6,7	7,3	39,7	125,9
<i>Sellaphora pupula</i>	20,8	0,7	1,4	304,8	4,7	7,7	28,7	105,9
<i>Sellaphora sp</i>	48,4	0,6	1,2	306,0	5,8	8,3	38,4	98,4
<i>Stauroneis</i>	44,3	0,7	1,7	256,7	5,8	8,3	24,2	78,9
<i>Surirella</i>	36,0	1,1	0,9	226,0	11,2	8,9	25,1	78,3

Entre las especies a las cuales se calcularon sus tolerancias (Tabla 7) puede decirse que *Aulacoseira granulata* es el taxón que presenta rangos más estrechos en casi todas las variables fisicoquímicas evaluadas. Otras especies que con rangos ajustados para más de dos variables fueron *Gomphonema affine*, *Gomphonema punae*, *Achnanthes exigua*, *Rophalodia gibba*, *Navicula* sp 2, *Achnanthes lanceolata* y *Navicula* cf *leptostriata*.

Tabla 7. Valores de rangos de tolerancia (+/- optimo) calculados para las especies que presentaron una frecuencia de aparición del 20%

ESPECIE / OPTIMO	DBO	FOSFATOS	AMONIO	CONDUCT	OXIGENO DISUELTO	PH	CLORUROS	DUREZA
<i>Achnanthes exigua</i>	13,5	0,4	0,4	37,8	2,5	0,1	5,1	7,9
<i>Achnanthes hungarica</i>	61,7	1,5	16,0	399,1	3,6	0,8	28,0	31,4
<i>Achnanthes lanceolata</i>	7,8	0,2	0,2	652,2	2,0	0,1	39,0	47,3
<i>Achnanthes</i> sp 1	49,3	1,3	11,4	382,3	3,6	1,0	33,1	34,7
<i>Achnanthes</i> sp 2	59,7	0,3	16,5	471,9	4,0	0,8	31,3	44,0
<i>Achnanthidium minutissima</i>	21,6	0,4	2,4	471,7	2,3	0,6	159,4	122,1
<i>Amphora coffeaeformis</i>	24,7	0,6	0,4	616,7	5,1	0,9	36,8	30,5
<i>Anomoeoneis cf sculpta</i>	14,5	0,6	1,0	427,1	4,2	0,7	27,2	32,4
<i>Aulacoseira granulata</i>	15,9	0,1	0,9	56,9	0,9	0,3	12,4	16,8
cf <i>Eolimna</i>	15,4	0,4	0,1	612,4	2,0	0,1	22,5	28,6
<i>Cocconeis placentula</i>	12,3	0,9	1,9	436,5	2,2	0,4	156,3	89,9
<i>Craticula ambigua</i>	86,9	0,6	8,3	110,8	2,7	0,4	10,2	17,4
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	49,6	1,6	12,3	427,7	5,0	0,8	81,8	62,3
<i>Cyclotella stelligera</i>	47,9	0,4	1,8	341,0	2,8	0,9	67,9	91,4
<i>Eolimna</i> cf <i>subminuscula</i>	27,9	0,4	0,9	526,3	3,4	0,6	24,4	41,8
<i>Eolimna</i> cf <i>tantula</i>	42,9	1,4	7,2	468,1	2,3	0,3	122,2	72,0
<i>Eolimna</i> sp	36,3	0,7	5,3	556,7	3,3	0,7	77,6	63,6
<i>Eolimna</i> sp 2	32,5	0,9	5,3	637,5	2,6	0,8	44,0	53,6
<i>Ephitemia adnata</i>	16,8	0,8	1,1	446,5	2,0	0,4	153,8	111,8
<i>Epithemia</i> cf <i>sorex</i>	17,6	0,9	1,5	478,7	1,7	0,5	161,4	136,7
<i>Eunotia bilunaris</i>	12,1	1,4	2,7	405,3	1,7	0,4	148,6	82,4
<i>Fragilaria acus</i>	17,9	3,3	4,8	327,6	2,0	0,3	147,8	86,4
<i>Fragilaria</i> cf <i>pinnata</i>	53,1	0,3	9,7	88,3	1,1	0,2	20,9	35,3
<i>Fragilaria leptostauron</i>	44,4	0,6	2,4	145,4	5,0	0,8	22,2	44,4
<i>Fragilaria pinnata</i>	77,0	0,6	8,7	150,3	6,3	0,9	8,4	12,9
<i>Fragilaria ulna</i>	13,8	0,3	1,0	408,1	1,6	0,4	155,7	73,9
<i>Gomphonema affine</i>	13,7	0,1	0,7	369,0	1,2	0,3	136,0	62,6
<i>Gomphonema</i> sp 2	22,3	0,4	5,6	426,0	2,4	0,8	32,1	33,9
<i>Gomphonema</i> sp 3	54,4	0,5	1,4	451,3	2,9	0,5	155,8	122,9
<i>Gomphonema</i> sp 4	37,3	1,6	7,7	368,1	4,1	0,7	84,2	55,8
<i>Gomphonema</i> sp 5	43,9	1,3	6,7	323,5	1,8	0,6	69,8	53,2
<i>Gomphonema acuminatum</i>	15,3	3,2	4,5	308,0	3,0	0,9	92,9	53,9
<i>Gomphonema angustatum</i>	7,2	0,3	1,1	228,6	3,0	0,4	30,0	38,3

<i>Gomphonema cf olivaceum</i>	16,3	0,7	2,1	318,6	1,9	0,9	30,8	44,5
<i>Gomphonema gracile</i>	13,1	3,7	5,3	401,9	4,5	0,9	129,3	95,2
<i>Gomphonema parvulum</i>	59,5	1,9	11,7	465,9	3,6	0,9	100,1	70,4
<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	60,0	0,3	14,1	263,3	1,8	0,3	30,1	29,0
<i>Gomphonema punae</i>	8,1	0,3	0,3	384,8	2,4	0,7	95,9	61,1
<i>Gomphonema truncatum</i>	20,9	0,8	1,4	499,8	2,1	0,7	159,8	97,3
<i>Hantzchia abundans</i>	45,4	0,9	10,9	271,7	6,0	0,9	27,5	43,6
<i>Navicula cf leptostriata</i>	21,8	0,6	0,2	33,8	2,3	0,3	5,0	7,4
<i>Navicula sp 1</i>	79,1	3,2	4,7	409,0	1,1	0,3	92,4	64,7
<i>Navicula sp 2</i>	7,1	0,4	0,4	218,2	2,9	0,7	16,5	17,3
<i>Navicula sp 3</i>	78,1	1,9	2,7	269,1	3,6	0,5	20,7	38,1
<i>Navicula sp 5</i>	33,1	0,4	7,9	453,1	2,5	0,7	154,5	122,6
<i>Nitzschia sp 1</i>	52,1	1,4	2,1	448,1	5,0	0,8	110,5	63,9
<i>Nitzschia sp 2</i>	40,6	3,8	11,0	536,0	3,3	0,7	41,9	52,6
<i>Nitzschia sp 3</i>	23,1	0,6	1,5	335,8	2,5	0,8	99,4	80,6
<i>Nitzschia sp 4</i>	25,0	0,6	0,5	240,8	3,4	0,6	41,3	41,7
<i>Nitzschia sp 5</i>	30,3	0,5	1,7	501,3	2,4	0,4	43,0	45,2
<i>Nitzschia sp 6</i>	39,9	1,4	5,0	267,3	3,1	0,9	26,0	40,2
<i>Nitzschia amphibia</i>	11,9	0,3	0,6	618,6	2,3	0,6	72,9	66,8
<i>Nitzschia capitellata</i>	52,1	0,5	13,3	565,7	0,7	0,2	35,3	41,4
<i>Pinnularia brebissonii</i>	67,0	0,4	2,2	121,1	2,3	1,0	18,3	45,1
<i>Pinnularia cf subcapitata</i>	62,8	0,3	5,3	85,3	3,8	0,5	7,3	13,8
<i>Pinnularia maior</i>	62,0	0,3	15,8	216,5	1,7	0,2	63,5	71,9
<i>Pinnularia microstauron</i>	70,7	0,7	15,1	223,8	2,5	0,5	18,6	26,6
<i>Pinnularia viridiformis</i>	81,2	0,5	2,0	241,7	1,4	0,3	12,0	33,2
<i>Rhopalodia gibba</i>	8,6	0,2	0,2	241,1	1,4	0,1	59,6	70,8
<i>Sellaphora pupula</i>	13,4	2,0	2,7	127,0	2,6	1,0	13,7	33,9
<i>Sellaphora sp</i>	65,9	0,5	1,6	157,4	3,5	1,0	30,6	51,7
<i>Stauroneis</i>	65,3	1,4	4,3	120,4	2,8	1,0	9,3	27,4
<i>Surirella</i>	45,9	0,5	0,4	252,8	4,4	0,6	13,5	26,4

4.1.5 Estimación de clorofila A

En la figura 6 se registran los promedios en los valores de clorofila A medidos durante el estudio. Los datos dejan ver que las diatomeas periféricas de humedales como Tibanica y Meridor conservaron sus concentraciones relativamente estables entre los periodos climáticos evaluados. En Juan Amarillo se evidenció en el tercer periodo una disminución considerable en dicho pigmento fotosintético, situación similar a la del humedal Jaboque, mientras que en Santa María del Lago se observó una reducción notable de periodo a periodo. Debido a las condiciones de reducción o carencia del espejo de agua y al cambio en los niveles de

inundación en las zonas donde se ubicaron las placas, en Guaymaral no fue posible tener muestras para la determinación de clorofila en ninguno de los periodos estudiados.

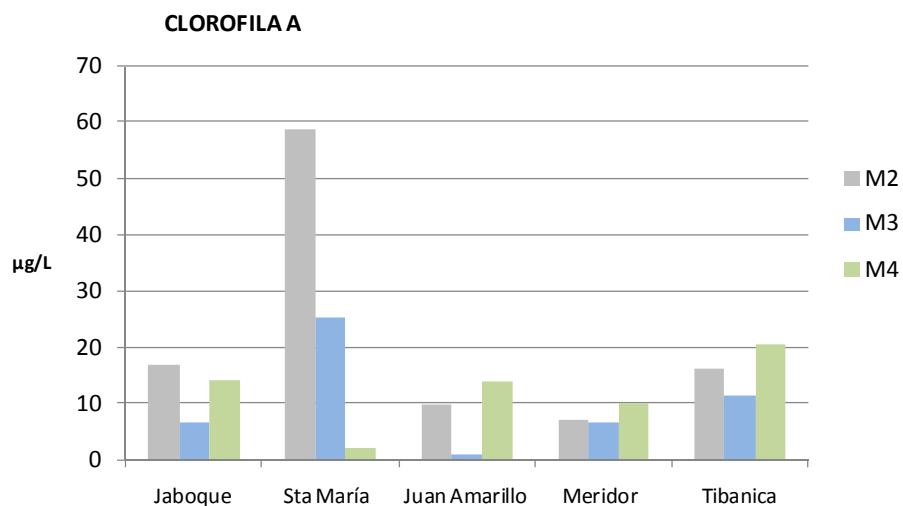


Figura 6. Comportamiento en los humedales de las concentraciones de clorofila A durante los tres últimos periodos de estudio (M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequia - lluvias, M3: Mayo 2008 transición lluvias - sequia, M4: Agosto 2008 – sequia).

4.2 Evaluación fisicoquímica de los humedales

4.2.1 Análisis discriminante

El análisis discriminante, realizado con la totalidad de las 14 variables fisicoquímicas medidas durante el estudio, permitió detectar condiciones particulares en cada uno de los humedales estudiados. Tal segregación se mantiene aún con los cambios en los regímenes climáticos. Según las funciones discriminantes 1 y 2 (que explicaron cerca del 93% de variación de los datos), los humedales más similares en sus atributos fisicoquímicos son Santa María del Lago y Guaymaral, mientras que Meridor y Jaboque se muestran como los más disímiles respecto al grupo. Juan Amarillo y Tibanica parecen tener una condición fisicoquímica cercana a la de Santa María y Guaymaral, pero su separación es evidente (figura 7). Las variables fisicoquímicas que presentaron los mayores coeficientes estandarizados en estas dos funciones fueron los fosfatos, los nitritos, la dureza, los sólidos disueltos totales, la DBO y el pH, lo que revelaría que estas son las variables que permiten hacer una mayor diferenciación entre los humedales.

La significancia estadística del análisis para las cuatro funciones discriminantes usadas en la representación grafica (figura 7) fue del 95.8 %. Los valores Wilks λ calculados para estas funciones fueron en todos los casos menores a 0.048 lo que indica que la variación entre los humedales no explicada por las funciones discriminantes es muy baja.

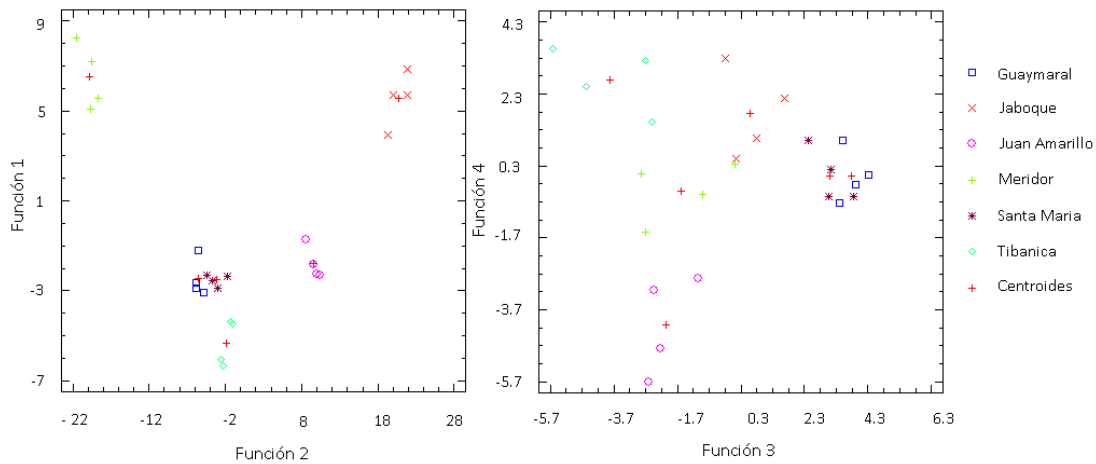


Figura 7. Grafica del análisis de funciones discriminantes realizado con las variables fisicoquímicas medidas en los humedales durante el estudio (Noviembre 2007 – Agosto 2008)

4.2.2 Análisis de componentes principales

Primer periodo (lluvias - noviembre de 2007)

El análisis de componentes principales (ACP, Anexo 2) permitió determinar que durante el primer periodo de muestreo los humedales estudiados se pueden categorizar en tres grupos de atributos fisicoquímicos distintos. Uno de ellos incluye a Meridor y está relacionado principalmente con valores muy altos de dureza y cloruros, en comparación con los otros humedales. Además, Meridor presenta la mayor transparencia y los menores valores de amonio y DBO observados entre los seis humedales.

Con un comportamiento distinto con respecto a Meridor, se encuentran Guaymaral, Juan Amarillo, Santa María del Lago y Jaboque. Estos humedales tuvieron en términos generales valores relativamente bajos de conductividad y de cloruros. Sin embargo entre ellos ocurren diferencias importantes. Juan Amarillo y Santa María del Lago, por ejemplo, presentaron datos muy altos de DBO, en comparación con Jaboque, que tuvo un valor medio y Guaymaral que presentó el segundo registro más bajo. En Juan Amarillo se midió la mayor concentración de

amonio (10 mg/L NH_3), mientras que los otros humedales del grupo tuvieron mediciones inferiores a 1 mg/L NH_3 . En cuanto al oxígeno disuelto, también se presentaron diferencias importantes. Jaboque contó con el mayor dato en este periodo, seguido por Santa María del Lago y Guaymaral. La menor concentración de oxígeno se encontró en Juan Amarillo. Cabe resaltar también que Jaboque fue el humedal con el mayor pH.

Tibanica se encuentra separado de los otros humedales según la gráfica del ACP. Este ecosistema tuvo los mayores registros de conductividad y de sólidos disueltos totales durante el primer periodo, lo cual es coherente con sus concentraciones altas de cloruros y amonio. La transparencia también fue elevada. Los fosfatos en este humedal fueron los más bajos y otras variables presentaron valores medios. Los datos de las variables fisicoquímicas mencionadas anteriormente se registran en la tabla 1 del anexo 3, y las figuras y datos del ACP se presentan en el anexo 2.

Segundo periodo (sequía - febrero de 2008)

Para el segundo periodo el ACP (Anexo 1) mostró una discriminación similar de los humedales con base en sus características fisicoquímicas. Meridor una vez más estuvo asociado con los mayores valores de cloruros, dureza, transparencia y conductividad. Tibanica presentó la conductividad y los sólidos disueltos totales mayores, mientras que la dureza fue la segunda más alta después de Meridor (valores de las variables fisicoquímicas en tabla 2, anexo 3).

Con respecto al periodo anterior, el valor de DBO disminuyó en todos los humedales, a excepción de Guaymaral, siendo esta reducción considerable en Santa María del Lago, Juan Amarillo y Tibanica. Los humedales que tuvieron los mayores datos de DBO fueron Juan Amarillo y Guaymaral. Para Juan Amarillo se destaca además que presentó concentraciones altas de fosfatos, amonio y nitritos.

Durante este periodo seco el pH aumentó con respecto al periodo lluvioso anterior. En Jaboque se mantuvo el pH más alto, mientras que los otros humedales mostraron valores variables. Jaboque además tuvo una concentración de oxígeno disuelto muy alta (8.57 mg/L O_2) en comparación con los otros sistemas, que tuvieron en promedio 2.2 mg/L O_2 . De igual manera, en Jaboque se registró la menor dureza y una DBO intermedia (16 mg/L O_2).

Tercer periodo (transición lluvias – sequía - mayo de 2008)

El ACP de este periodo de transición de época lluviosa a seca (Anexo 2) arrojó una distribución diferente de los humedales. No se conformaron tres grupos, sino cuatro. Meridor continuó con los mayores registros de nitratos, nitritos, cloruros, dureza y conductividad, como se puede ver detalladamente en la tabla 3 del anexo 3. Juan Amarillo y Guaymaral presentaron datos elevados de DBO y fosfatos, pero valores bajos de oxígeno disuelto y transparencia.

Juan Amarillo tuvo un valor muy elevado de amonio en comparación con el promedio de los otros cuerpos de agua, y a la vez presentó la menor concentración de cloruros. Aunque en términos generales durante este periodo la DBO aumentó, esta situación fue particularmente drástica en Guaymaral y Juan Amarillo.

Para Jaboque y Santa María del Lago se destacan los altos datos de oxígeno disuelto y transparencia. Una vez más Jaboque tuvo la mayor concentración de oxígeno y el pH más elevado, que llegó a 9.33. De Tibanica se destaca que presentó, junto con Meridor, los valores más altos de dureza y conductividad, mostrando así un comportamiento distinto a los otros humedales según el ACP.

Cuarto periodo (comienzo de la transición sequía – lluvias - agosto de 2008)

Para el cuarto periodo, en el que se inició el paso de la época seca a la lluviosa, se presentó una configuración similar de los humedales a la del tercer periodo. De nuevo Meridor tuvo un comportamiento particular, asociado principalmente a los mayores registros de dureza y cloruros, y por primera vez a un valor alto de oxígeno disuelto. Durante este periodo Santa María del Lago se destacó por sus menores concentraciones de cloruros, nitratos, amonio, fosfatos y DBO. Por otro lado, Santa María tuvo el mayor valor de transparencia para este periodo con 1.59 mt.

Tibanica una vez más presentó la mayor conductividad, además de datos altos de dureza y cloruros, mientras que su concentración de oxígeno disuelto fue la menor para este periodo. Juan Amarillo se destacó por sus altos valores de amonio, fosfatos y DBO y Jaboque por su elevados pH y oxígeno disuelto, al igual que en los periodos anteriores. Guaymaral se

caracterizó por valores intermedios de los distintos parámetros, como se puede ver en detalle en la tabla 4 del anexo 3.

4.2.3 Comportamiento detallado de las variables fisicoquímicas en el tiempo

Oxígeno disuelto

Como se observa en la figura 8, en Jaboque se encontraron las mayores concentraciones de oxígeno disuelto durante los cuatro muestreos realizados. En el primer periodo presentó el valor más alto (14.4 mg/L O₂). Otros humedales evidenciaron a lo largo del estudio un aumento progresivo en los valores de este gas, con concentraciones variables entre sistemas. Meridor aumentó desde 2.4 mg/L O₂ en el primer periodo hasta 8.36 mg/L O₂ en el cuarto; Juan Amarillo pasó de 0.15 a 5.1 mg/L O₂ y en Tibanica se incrementó de 0.2 a 3.31 mg/L O₂, siendo sin embargo el humedal con condiciones más bajas en oxígeno. Esta tendencia de aumento se vio alterada en Guaymaral, que tuvo la menor medición durante el tercer periodo, y en Santa María del Lago que la tuvo en el segundo. En promedio Santa María fue el tercer humedal con mayores concentraciones de oxígeno disuelto.

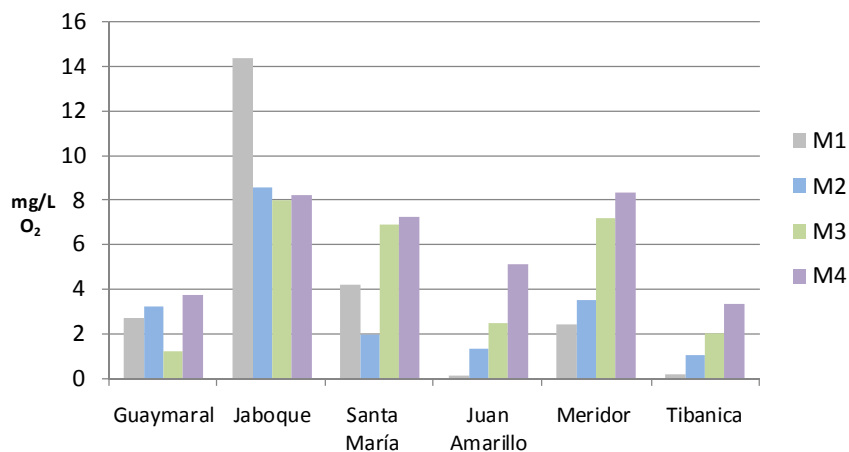


Figura 8. Comportamiento en los humedales de las concentraciones de oxígeno disuelto durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - lluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequía - lluvias, M3: Mayo 2008 transición lluvias - sequía, M4: Agosto 2008 – sequía).

Demanda biológica de oxígeno (DBO)

La DBO evidenció fuertes variaciones dentro y entre los humedales en los periodos climáticos evaluados (figura 9). Jaboque fue la excepción, ya que tuvo un comportamiento estable en los diferentes periodos. Guaymaral por su parte tuvo registros inferiores a los 40 mg/L O₂ durante los periodos 1, 2 y 4. Sin embargo, para el tercer periodo esta variable alcanzó 198 mg/L O₂, siendo este el mayor valor encontrado durante el estudio. Santa María del Lago mostró su mayor DBO en el primer periodo, que luego disminuyó considerablemente en los dos periodos siguientes y que llegó al mínimo valor para este humedal en el tercer periodo. En Juan Amarillo los valores de DBO oscilaron entre datos altos en los periodos 1 y 3 (84 y 147 mg/L O₂ respectivamente), un valor bajo en el segundo periodo (25 mg/L O₂) y un valor medio en el último periodo.

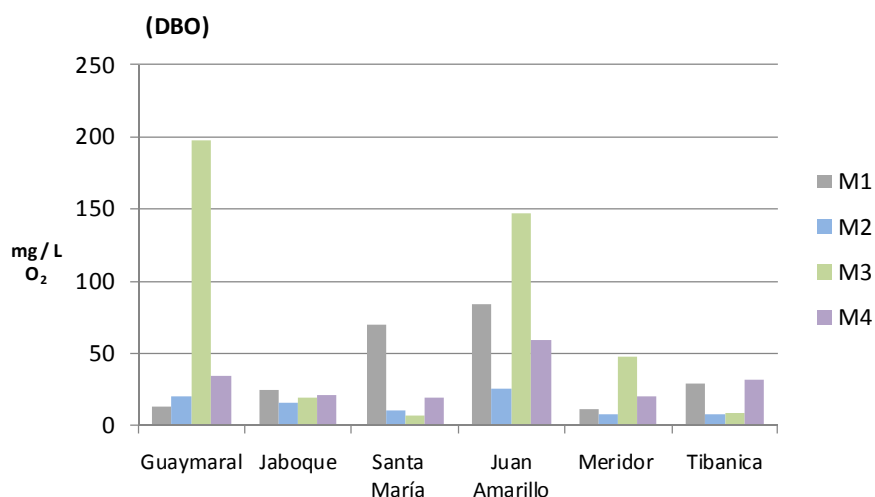


Figura 9. Comportamiento en los humedales de la demanda biológica de oxígeno durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - lluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequia - lluvias, M3: Mayo 2008 transición lluvias - sequia, M4: Agosto 2008 – sequia).

Fosfatos

Juan Amarillo presentó concentraciones comparativamente altas de este nutriente. El mayor registro ocurrió en el segundo periodo con 9.9 mg/L P. En términos generales, Meridor y Jaboque tuvieron concentraciones altas de fósforo en el primer periodo de estudio y disminuyeron hasta llegar a su menor valor en el cuarto periodo. Esta situación fue más marcada en Meridor. Guaymaral mostró un aumento en el fósforo desde el primero hasta el tercer periodo, momento en el cual alcanzó el registro más alto (1.45 mg/L P); para el cuarto

periodo esta variable se redujo a 0.56 mg / L P. En Santa María del Lago este nutriente tuvo menores concentraciones; el valor más alto ocurrió durante el primer periodo (1.6 mg / L P), en el segundo no fue detectable, en el tercero fue bajo (0.21 mg / L P) y en el cuarto se redujo aún más (0.01 mg / L P). Tibanica por su parte tuvo en el primer periodo su menor concentración de fosfatos (0.12 mg / L P) pero aumentó considerablemente en el segundo muestreo(1.4 mg / L P); en los siguientes periodos el fósforo disminuyó (figura 10).

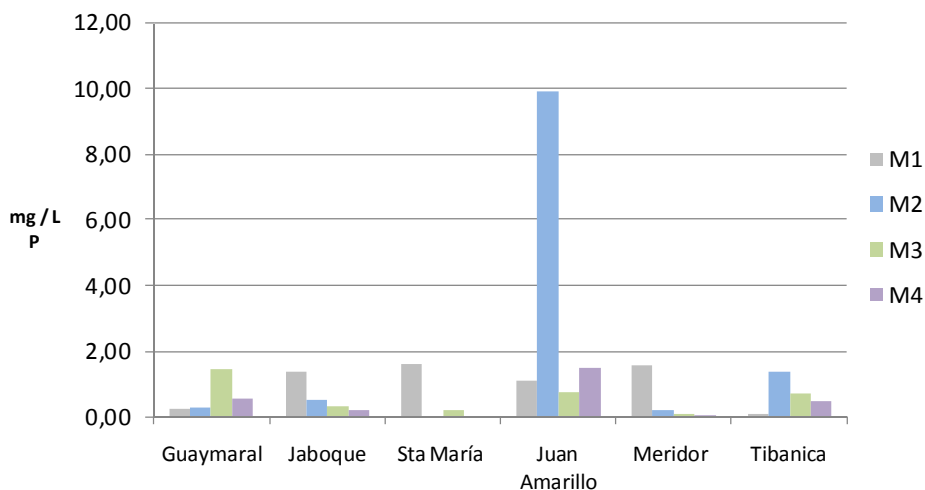


Figura 10. Comportamiento en los humedales de las concentraciones de fosfatos durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - llluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequia - llluvias, M3: Mayo 2008 transición llluvias - sequia, M4: Agosto 2008 – sequia).

Amonio

Las concentraciones de amonio fueron significativamente mayores en todos los periodos en Juan amarillo, sistema que tuvo la concentración más alta en el tercer periodo con 33.84 mg/L NH_3 . Esto contrasta con los otros humedales, en los que en ningún caso se superaron los 4 mg/L NH_3 . Meridor tuvo durante el primer y segundo periodos concentraciones indetectables, pero en el tercer muestreo el amonio llegó a 3.4 mg/L NH_3 . Esta fue la mayor concentración observada aparte de las medidas en el humedal Juan Amarillo. Durante el cuarto periodo la concentración de amonio en Meridor disminuyó a 0.65 mg/L NH_3 . Guaymaral presentó valores cercanos a 1 mg/L NH_3 , a excepción del tercer periodo, en el cual ascendió a 0.36 mg/L NH_3 . Jaboque tuvo su mayor concentración de amonio en el tercer periodo y en los restantes este elemento osciló entre 0.7 y 0.47 mg/L NH_3 . En Santa María del Lago se observaron en términos generales concentraciones inferiores a 0.5 mg/L NH_3 (la excepción fue el tercer muestreo) y en Tibanica se encontró una variación intermitente que tuvo los mayores valores en el primer y

tercer periodos y los menores en el segundo y cuarto muestreos. Tibanica fue en promedio el segundo humedal con mayores concentraciones de amonio (figura 11).

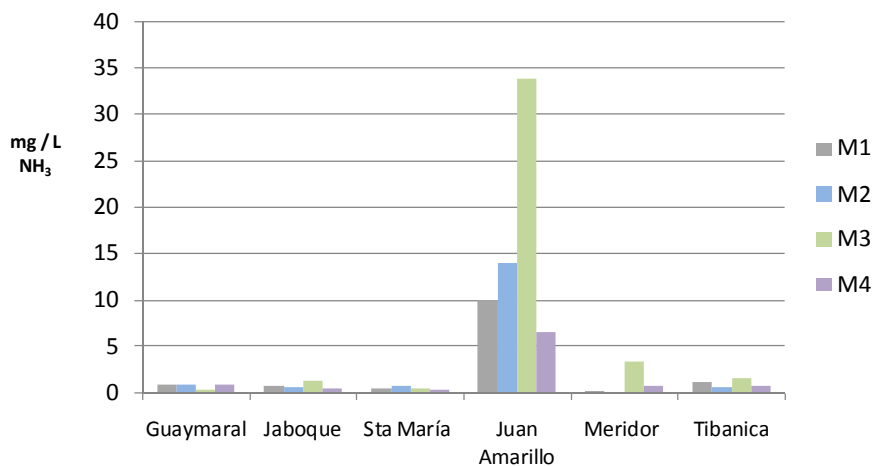


Figura 11. Comportamiento en los humedales de las concentraciones de amonio durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - lluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequia - lluvias, M3: Mayo 2008 transición lluvias - sequia, M4: Agosto 2008 – sequia).

Nitratos

De esta variable se pueden resaltar las altas concentraciones encontradas durante el cuarto periodo en todos los humedales (figura 12). Meridor tuvo el mayor promedio y un aumento constante e importante desde el primer muestreo, con valores que fueron desde 0.04 hasta 3.4 mg/L NO₃. Santa María del Lago, Tibanica y Guaymaral mostraron datos casi idénticos para cada periodo. En estos sistemas las concentraciones fueron imperceptibles en el primer y segundo periodos, aumentaron levemente en el tercer muestreo (0.4 o 0.3 mg/L NO₃) y se incrementaron de forma evidente durante la cuarta visita. Juan Amarillo tuvo una concentración mínima en el primer periodo, un aumento posterior en el segundo, una cantidad no detectable en el tercero y, al igual que en los otros humedales, un aumento notable de nitratos para el cuarto muestreo. En Jaboque se observó un aumento del primer al segundo periodo (0.1 a 0.3 mg/L NO₃), seguido por una disminución en la concentración en el tercer periodo (0.18 mg/L NO₃); al igual que en los otros cuerpos de agua, se repitió el patrón de aumento de nitratos en el cuarto periodo.

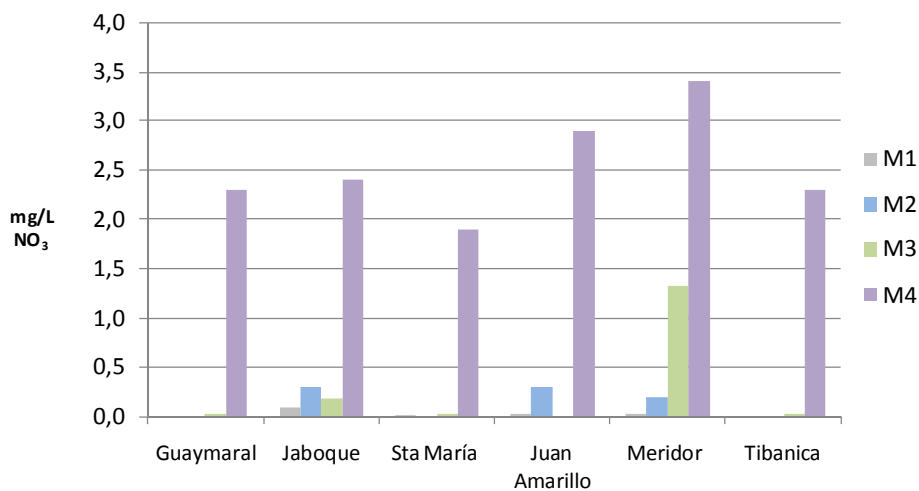


Figura 12. Comportamiento en los humedales de las concentraciones de nitratos durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - llluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequia - llluvias, M3: Mayo 2008 transición llluvias - sequia, M4: Agosto 2008 – sequia).

Nitritos

Las concentraciones de nitritos fueron muy variables entre periodos y entre humedales. Juan Amarillo evidenció durante el segundo periodo la mayor cantidad de nitritos medida en el estudio (7 mg/L NO_2). Este dato estuvo muy distanciado de los mayores valores medidos en los otros humedales, que no excedieron 1 mg/L NO_2 . Debido a que los máximos valores encontrados no permiten ver gráficamente los datos menores, las concentraciones de nitritos solo se muestran en las tablas del anexo 3.

Tibanica fue el único humedal que no presentó un pico máximo tan alto en comparación con los otros ecosistemas; su promedio fue de 0.002 mg/L NO_2 . Le siguió Guaymaral con un promedio de 0.008 mg/L NO_2 y la mayor concentración en el cuarto periodo (0.029 mg/L NO_2). En los muestreos primero, segundo y cuarto Meridor tuvo concentraciones inferiores a 0.004 mg/L NO_2 y alcanzó su máximo de 0.103 mg/L NO_2 en el tercer periodo; su promedio fue de 0.027 mg/L NO_2 . Jaboque no superó los 0.006 mg/L NO_2 en el primer, tercer y cuarto muestreos, pero tuvo un máximo de 0.3 mg/L NO_2 en el segundo periodo; su promedio fue de 0.079 mg/L NO_2 . Durante el segundo periodo Santa María del Lago tuvo una concentración de 1 mg/L NO_2 , pero en los otros muestreos sus concentraciones de nitritos fueron menores a 0.007 mg/L NO_2 .

pH

A excepción de Jaboque, que durante todo el estudio mostró valores de pH muy cercanos a 9, todos los humedales tuvieron valores con tendencia a la neutralidad (figura 13).

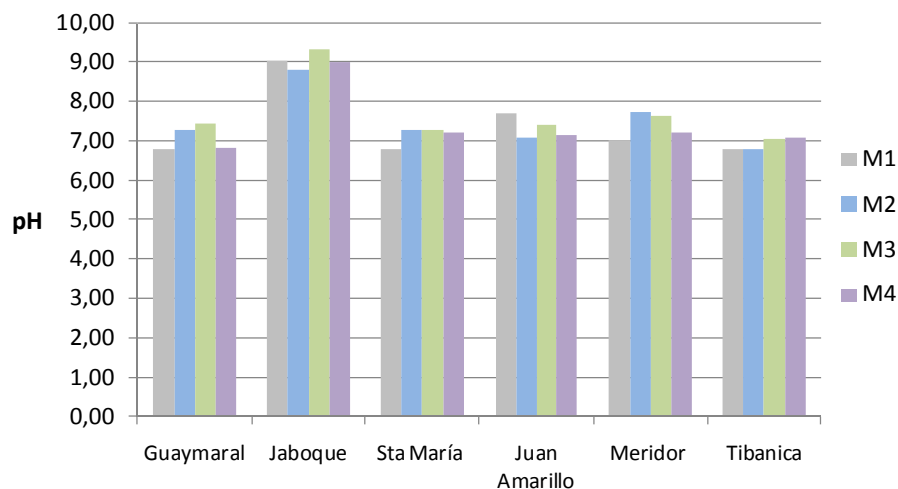


Figura 13. Comportamiento en los humedales del pH durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - lluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequía - lluvias, M3: Mayo 2008 transición lluvias - sequía, M4: Agosto 2008 – sequía).

Transparencia

Los mayores promedios de transparencia se encontraron en Meridor y Santa María del Lago (1.41 y 1.31 mt respectivamente). En Santa María se encontró un aumento en los valores a lo largo del estudio, contrario a lo ocurrido en Meridor, cuyos registros de transparencia disminuyeron. Esta situación que fue drástica en Meridor para el tercer periodo de estudio, pero fue seguida por un aumento en la transparencia para el último muestreo. En Tibanica y Jaboque también se observó una tendencia hacia la disminución de la transparencia, con valores mayores en Tibanica. En Juan Amarillo los datos fueron variables, pero tendieron a ser mayores durante el primer y tercer periodos y menores en el segundo y cuarto muestreos. La menor transparencia (0.2 mt) se midió en Juan Amarillo (figura 14). En Guaymaral no se realizó la medición de transparencia debido a que las zonas de espejo de agua en la zona en que se realizó el muestreo fueron mínimas y en ningún caso superaron los 15 cm de profundidad.

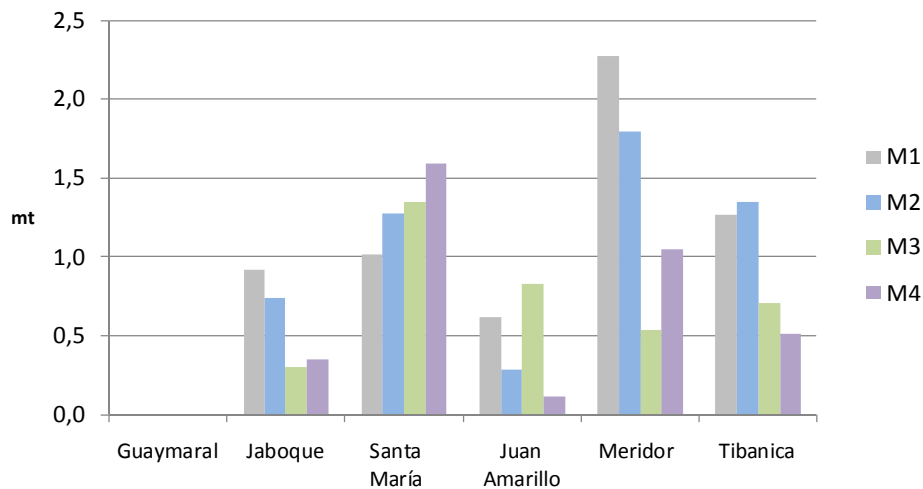


Figura 14. Comportamiento en los humedales de la transparencia durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - lluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequía - lluvias, M3: Mayo 2008 transición lluvias - sequía, M4: Agosto 2008 – sequía).

Sólidos suspendidos

En la figura 15 se registra el comportamiento de esta variable. Santa María del lago presentó concentraciones mínimas durante los periodos segundo y tercero (<0.0025 mg/L) y valores imperceptibles en los muestreos primero y cuarto. Jaboque tuvo igualmente valores bajos que fueron disminuyendo paulatinamente. Lo contrario ocurrió en Tibanica y Juan Amarillo, humedales en que se observó una tendencia hacia el aumento en la concentración de sólidos suspendidos. En Meridor se encontraron concentraciones relativamente constantes que fueron mayores en los muestreos primero y cuarto. Los valores más altos en cada periodo se registraron en Guaymaral, que fue el único humedal en el cual se hallaron concentraciones superiores a 0.1 mg/L. En dicho ecosistema se alcanzó una concentración particularmente alta en el segundo periodo (0.8 mg/L).

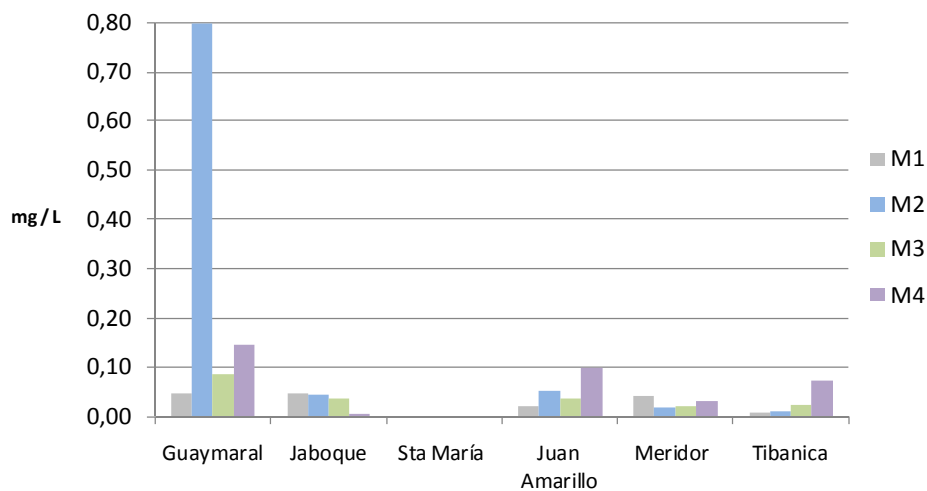


Figura 15. Comportamiento en los humedales de los sólidos suspendidos durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - lluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequía - lluvias, M3: Mayo 2008 transición lluvias - sequía, M4: Agosto 2008 – sequía).

Conductividad

Como se observa en la figura 16, los sistemas Guaymaral, Jaboque y Santa María del Lago mantuvieron constantes o cercanos sus valores entre los diferentes periodos. Jaboque fue el humedal con el menor promedio de conductividad ($166.6 \mu\text{s}$). En Juan Amarillo se encontró un aumento progresivo que fue más evidente del primer al segundo muestreo; el promedio de conductividad en Juan Amarillo fue de $539 \mu\text{s}$. En Meridor se registraron los mayores valores de conductividad en el segundo y tercer periodo; el promedio en Meridor fue de $1168 \mu\text{s}$. En Tibanica se observaron en general las conductividades más altas, a excepción del tercer periodo. El comportamiento de este parámetro en Tibanica osciló entre mediciones menores en el primer y tercer periodo y registros altos en el segundo y cuarto; el promedio de conductividad en Tibanica fue de $1351 \mu\text{s}$.

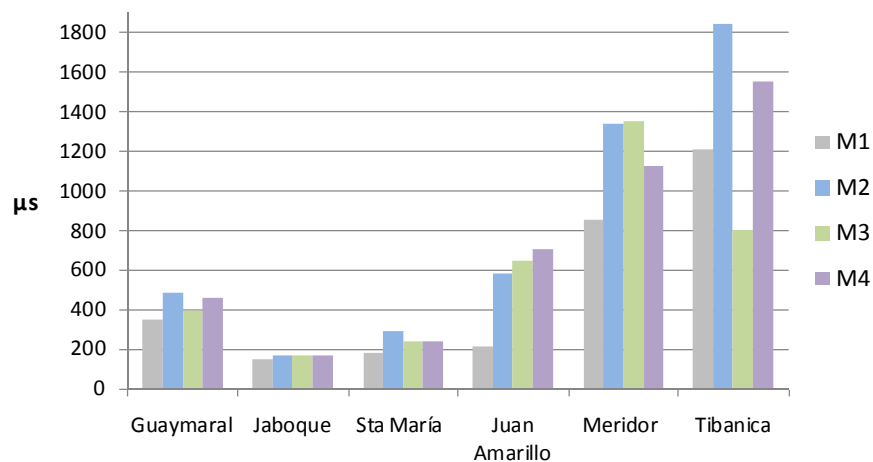


Figura 16. Comportamiento en los humedales de la conductividad durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - lluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequia - lluvias, M3: Mayo 2008 transición lluvias - sequia, M4: Agosto 2008 – sequia).

Dureza

Meridor presentó en todos los periodos los mayores promedios de dureza, que alcanzaron su máximo valor (394 mg/L CaCO_3) durante el tercer periodo. La dureza en este ecosistema fue significativamente más alta en comparación a la de los otros humedales. Tibanica tuvo también valores altos, particularmente durante el segundo y cuarto periodos. Este comportamiento fue similar al registrado en Guaymaral y Santa María del Lago, aunque en estos últimos cuerpos de agua los valores fueron menores. En el caso de Santa María hubo mayor constancia en la dureza. Jaboque mostró los datos de dureza más bajos del estudio y tuvo un comportamiento poco variable entre periodos. En Juan Amarillo la concentración aumentó considerablemente del primer al segundo periodo y posteriormente disminuyó durante los siguientes muestreos. La figura 17 resume estos comportamientos de la dureza en los humedales estudiados.

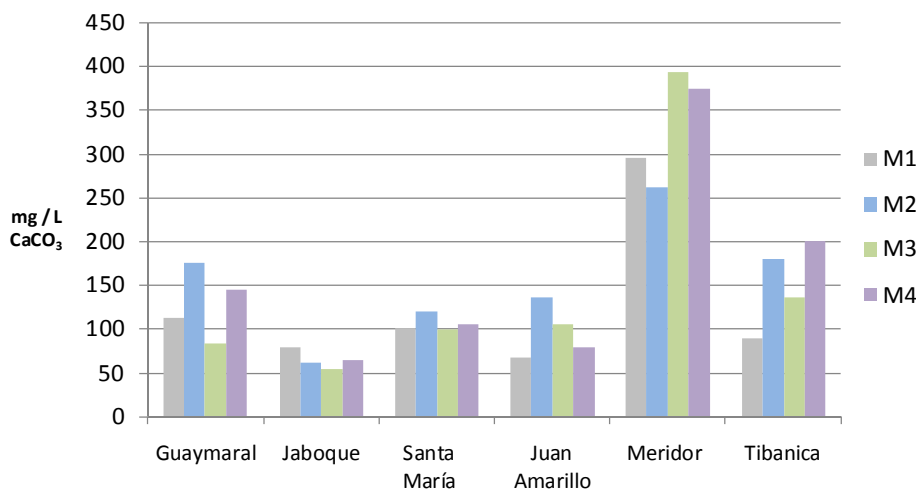


Figura 17. Comportamiento en los humedales de la dureza durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - llluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequia - llluvias, M3: Mayo 2008 transición llluvias - sequia, M4: Agosto 2008 – sequia).

Cloruros

Esta variable alcanzó sus mayores concentraciones en todos los humedales durante el tercer periodo (figura 18). Específicamente en Meridor se midió la cantidad más elevada de cloruros, con un promedio de 345.2 mg/L Cl⁻. Este valor fue notablemente mayor al de los otros humedales. Tibanica mostró el segundo mayor promedio (103 mg/L Cl⁻) con registros superiores a 100 mg/L Cl⁻ durante los muestreos primero y tercero e inferiores a este valor en el segundo y cuarto periodos. Jaboque y Santa María del Lago tuvieron los menores promedios (28 y 38 mg/L Cl⁻ respectivamente) y Guaymaral y Juan Amarillo mostraron comportamientos similares, caracterizados por un aumento constante hasta el tercer periodo, al cual siguió un descenso en el último muestreo. Los promedios en estos dos últimos cuerpos de agua fueron 57.6 y 55.7 mg/L Cl⁻ respectivamente, lo que correspondió a humedales con conductividades intermedias.

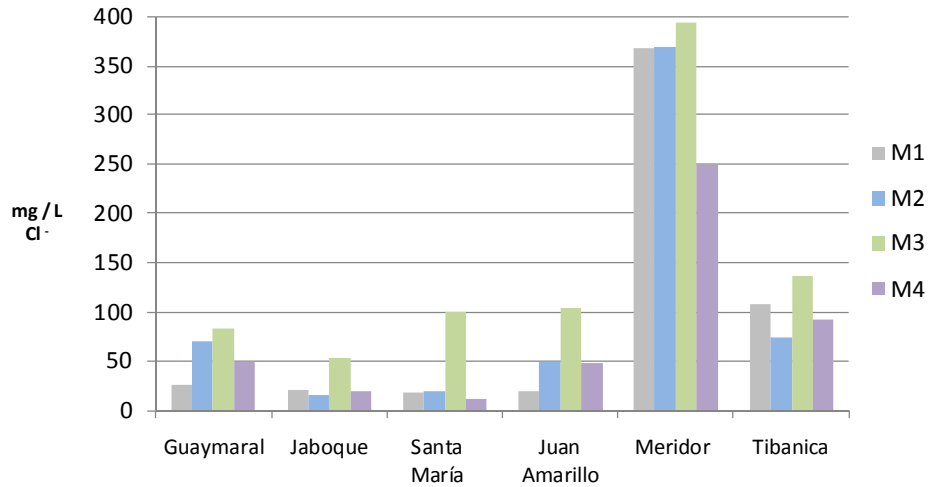


Figura 18. Comportamiento en los humedales de los cloruros durante el estudio (M1: Noviembre de 2007 - lluvias, M2: Febrero y Marzo 2008 - transición sequia - lluvias, M3: Mayo 2008 transición lluvias - sequia, M4: Agosto 2008 – sequia).

En resumen, los datos fisicoquímicos de los humedales estudiados muestran que estos ecosistemas presentan condiciones que permiten clasificarlos como sistemas heterogéneos cada uno con atributos particulares, siendo así Meridor un humedal caracterizado por los altos valores de cloruros, dureza, conductividad y bajas concentraciones de nutrientes; Jaboque por sus altos valores de pH y oxígeno disuelto además de bajos promedios de conductividad; Juan Amarillo por sus muy elevadas concentraciones de amonio y fosfatos; Santa María del Lago por sus bajas concentraciones de nutrientes y alta transparencia; Guaymaral por su ausencia constante de una columna de agua y repentinos aumentos significativos en variables como sólidos suspendidos, fosfatos y DBO; por último Tibanica, con valores medios en casi todas las variables, tuvo registros de cloruros y conductividad ligeramente altos en comparación con los restantes humedales.

4.3 Las diatomeas perifíticas en la indicación de la calidad del agua

En este capítulo se presentan los resultados de la construcción de los distintos índices basados en la comunidad de diatomeas perifíticas. En primer lugar se incluye el índice de diatomeas al nivel de especie. Posteriormente se muestra un índice similar pero elaborado para el nivel taxonómico de género. Finalmente se presenta el índice sapróbico fundamentado en la DBO.

4.3.1 Índice para el nivel de especie o IDHB (Índice de Diatomeas para Humedales Bogotanos)

Con base en los datos del IDHB transformados a porcentaje se construyó una escala que permite clasificar el estado limnológico de cada humedal (Tabla 8). Los puntajes calculados para cada uno de ellos en los periodos estudiados se pueden ver en la Figura 19, en la que se puede notar que el humedal que presenta mayores condiciones de deterioro es Juan Amarillo. En dos de los cuatro muestreos evidenció malas condiciones limnológicas, catalogándose como un humedal severamente contaminado. En el otro extremo están Santa María del Lago y Meridor, que tuvieron periodos en los cuales su calidad de aguas fue indicadora de aceptables condiciones limnológicas. Para los muestreos tres y cuatro Santa María del Lago mostró incluso condiciones limnológicas óptimas, indicadoras de un nivel ligero de contaminación.

Tabla 8. Escala de clasificación según el IDHB para los humedales evaluados.

IDBH (%)	INTERPRETACIÓN	IMPLICACIONES
>38	Ligeramente contaminado	Humedal con óptimas o buenas condiciones limnológicas
36 - 38	Moderadamente contaminado	Humedal con aceptables condiciones limnológicas
33 - 36	Fuertemente contaminado	Humedal con regulares condiciones limnológicas
<33	Severamente contaminado	Humedal con malas o deficientes condiciones limnológicas

Para Jaboque el índice determinó que sus condiciones limnológicas varían entre aceptables y regulares, lo que señala niveles de contaminación que van de moderados a fuertes. Guaymaral presentó una categorización similar, aunque en el tercer periodo se catalogó como severamente contaminado. Por su parte, durante todo el estudio Tibanica tuvo condiciones limnológicas regulares, indicadoras de una contaminación fuerte.

La clasificación general de los humedales durante el estudio según el IDHB se resume en la tabla 9. Allí se puede observar que ningún humedal se clasifica como un ambiente con óptimas o buenas condiciones limnológicas. Los humedales mejor clasificados, y que por tanto se pueden catalogar como los de mejor calidad del agua, fueron Meridor y Santa María del Lago, teniendo este último un valor ligeramente más alto. Jaboque fue el tercer humedal en la escala y se clasificó como un cuerpo de agua fuertemente contaminado. En esta categoría lo acompañan Guaymaral y Tibanica. Como se señaló atrás, Juan Amarillo es según el IDHB el humedal que posee peores condiciones limnológicas y el que está más severamente contaminado.

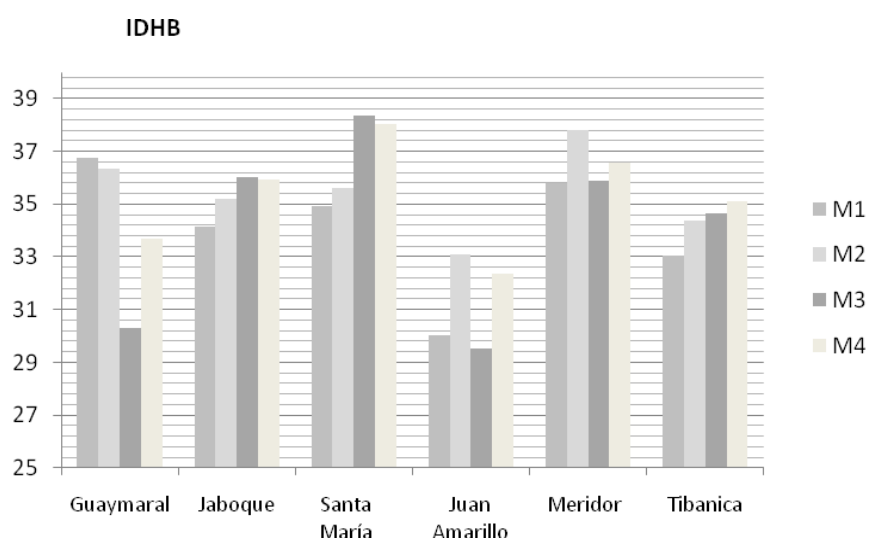


Figura 19. Puntaje del IDHB para los humedales en cada periodo evaluado. M = muestreo

Tabla 9. Clasificación general (promedio) para los humedales estudiados según el IDHB.

HUMEDAL	IDHB Promedio	Interpretación con base en las Diatomeas
TIBANICA	34,29	Regula res condiciones limno lógicas
MERIDOR	36,51	Aceptables condiciones limnológicas
JABOQUE	35,33	Regula res condiciones limno lógicas
JUAN AMARILLO	31,24	Ma las condiciones limno lógicas
SANTA MARIA	36,74	Aceptables condiciones limnológicas
GUAYMARAL	34,27	Regula res condiciones limno lógicas

Con el fin de conocer la relación entre los valores de calificación de los humedales según el IDHB y los datos fisicoquímicos, se realizó una prueba de correlación de Pearson que dejó ver que el IDHB tiene altas correlaciones negativas con los valores IP de cada estación ($r: -0.78$), con la DBO ($r: -0.76$) y con el amonio ($r: -0.62$). Por otra parte los valores IP tuvieron una mayor correlación positiva con el amonio ($r: 0.63$), los nitritos ($r: 0.59$), los fosfatos (0.68) y la DBO (0.68); los valores de otras variables se registran en la tabla 10. Se puede ver entonces que las variables relacionadas con la carga de nutrientes son las que determinan la condición de deterioro de los humedales capitalinos, dentro de las cuales la materia orgánica (medida como DBO) tiene una alta influencia. Puede considerarse por tanto que la DBO es un buen indicador del estado de contaminación orgánica de estos cuerpos de agua.

Tabla 10. Tabla de correlaciones de Pearson entre el IDHB y las variables fisicoquímicas evaluadas durante el estudio. Los valores en la diagonal inferior (sombreados) corresponden a los valores de correlación y en la diagonal superior a la probabilidad.

	IDHB	IP.st	Cond	Sóldis	OD	pH	Cloruros	Dureza	Amonio	Nitritos	Nitratos	fosfatos	DBO
IDHB	0,00	0,00	0,86	0,72	0,05	0,72	0,15	0,11	0,00	0,54	0,53	0,16	0,00
IP.st	-0,79	0,00	0,77	0,90	0,02	0,41	0,42	0,36	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00
Conduc	0,04	-0,06	0,00	0,00	0,13	0,04	0,00	0,00	0,88	0,80	0,41	0,87	0,51
Sóldis	-0,08	0,03	0,84	0,00	0,26	0,03	0,04	0,00	0,82	1,00	0,08	0,96	0,86
OD	0,41	-0,47	-0,32	-0,24	0,00	0,00	1,00	0,96	0,25	0,34	0,11	0,29	0,21
pH	0,08	-0,18	-0,43	-0,45	0,69	0,00	0,53	0,16	0,79	0,61	0,92	0,51	0,79
Cloruros	0,30	-0,17	0,60	0,43	0,00	-0,13	0,00	0,00	0,42	0,68	0,54	0,63	0,40
Dureza	0,34	-0,19	0,66	0,62	0,01	-0,30	0,89	0,00	0,52	0,87	0,17	0,71	0,33
Amonio	-0,62	0,64	-0,03	0,05	-0,24	-0,06	-0,17	-0,14	0,00	0,16	0,61	0,12	0,01
Nitritos	-0,13	0,59	-0,05	0,00	-0,20	-0,11	-0,09	-0,03	0,30	0,00	0,62	0,00	0,69
Nitratos	0,13	-0,20	0,18	0,36	0,34	-0,02	0,13	0,29	-0,11	-0,11	0,00	0,51	0,68
fosfatos	-0,29	0,68	-0,04	-0,01	-0,22	-0,14	-0,10	-0,08	0,33	0,94	-0,14	0,00	0,78
DBO	-0,76	0,69	-0,14	-0,04	-0,26	-0,06	-0,18	-0,21	0,50	-0,08	-0,09	0,06	0,00

Los valores de polución de cada taxón con base en los cuales se desarrollo el índice se encuentran registrados en la tabla 11.

Tabla 11. Listado de valores de polución de las especies de diatomeas usadas para la construcción del Índice de diatomeas de los humedales bogotanos (IDHB). Registros altos corresponden a especies más tolerantes a la contaminación y valores menores a especies sensibles.

ESPECIE	VPT	ESPECIE	VPT	ESPECIE	VPT
<i>Achnanthes exigua</i>	3,3	<i>Fragilaria</i> sp 1	3,0	<i>Navicula</i> sp 7	2,7
<i>Achnanthes hungarica</i>	3,4	<i>Fragilaria</i> sp 3	3,0	<i>Navicula</i> sp 8	2,8
<i>Achnanthes lanceolata</i>	2,8	<i>Fragilaria ulna</i>	3,2	<i>Navicula</i> sp 9	3,6
<i>Achnanthes</i> sp 1	3,2	<i>Fragilaria</i> cf <i>leptostauron</i>	2,5	<i>Nitzschia</i> sp 1	3,2
<i>Achnanthes</i> sp 2	3,4	<i>Fragilaria</i> sp 4	3,0	<i>Nitzschia</i> sp 2	3,4
<i>Achnanthes</i> sp 3	3,7	<i>Fragilaria</i> sp 6	3,2	<i>Nitzschia</i> sp 3	3,3
<i>Achnanthidium minutissima</i>	3,3	<i>Frustulia rhomboidea</i>	3,9	<i>Nitzschia</i> sp 4	3,1
<i>Amphora</i> cf <i>montana</i>	3,3	<i>Frustuliasaxonica</i>	2,8	<i>Nitzschia</i> sp 5	3,3
<i>Amphora coffeaeformis</i>	3,3	<i>Gomphonema affine</i>	3,0	<i>Nitzschia</i> sp 6	3,3
<i>Anomoeoneis</i> cf <i>sculpta</i>	3,4	<i>Gomphonema</i> sp 2	3,3	<i>Nitzschia</i> sp 7	3,4
<i>Aulacoseira granulata</i>	3,1	<i>Gomphonema</i> sp 3	3,5	<i>Nitzschia</i> sp 8	3,3
<i>Aulacoseira</i> sp	3,7	<i>Gomphonema</i> sp 4	3,6	<i>Nitzschia</i> sp <i>amphibia</i>	3,1
<i>Caloneis</i> sp	3,8	<i>Gomphonema</i> sp 5	3,4	<i>Nitzschiacapitellata</i>	3,8
cf <i>Bacillaria</i>	3,2	<i>Gomphonema</i> sp 6	4,1	<i>Nitzschia inconspicua</i>	3,4
cf <i>Diadesmis</i>	2,0	<i>Gomphonema</i> sp 7	2,5	<i>Nitzschia pusilla</i>	4,6
cf <i>Eolima</i>	3,1	<i>Gomphonema</i> sp 8	2,7	<i>Nitzschia reversa</i>	3,0
cf <i>Eolima</i> 3	3,2	<i>Gomphonema acuminatum</i>	3,0	<i>Nitzschia</i> sp 11	3,1
cf <i>Eunotia subarcuatoidea</i>	2,6	<i>Gomphonema angustum</i>	3,3	<i>Nitzschia</i> sp 15	3,2
cf <i>kobayasiella</i>	3,4	<i>Gomphonema angustum</i>	3,2	<i>Nitzschia</i> sp 16	3,7
cf <i>Melosira</i>	4,5	<i>Gomphonema</i> cf <i>augur</i>	2,5	<i>Nitzschia</i> sp 17	3,7
cf <i>Nitzschia sigmoidea</i>	4,5	<i>Gomphonema</i> cf <i>clavatum</i>	3,2	<i>Nitzschia</i> sp 18	3,7
<i>Cocconeis placentula</i>	3,3	<i>Gomphonema</i> cf <i>olivaceum</i>	3,2	<i>Nitzschia</i> sp 9	3,3
<i>Cocconeis placentula</i> var <i>euglypta</i>	3,0	<i>Gomphonema gracile</i>	3,3	<i>Nitzschia</i> cf <i>sinuata</i> var <i>delognei</i>	3,0
<i>Craticula ambigua</i>	3,4	<i>Gomphonema parvulum</i>	3,2	<i>Nitzschia</i> sp 10	2,8
<i>Cyclotella</i> cf <i>ocellata</i>	2,5	<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	3,3	<i>Nitzschia</i> sp 12	3,8
<i>Cyclotella meduanae</i>	3,2	<i>Gomphonema punae</i>	2,9	<i>Nitzschia</i> sp 13	4,5
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	3,3	<i>Gomphonema truncatum</i>	3,1	<i>Nitzschia</i> sp 14	3,2
<i>Cyclotella</i> sp	3,8	<i>Gyrosima</i> cf <i>nodiferum</i>	2,0	<i>Pinnularia brebissonii</i>	3,2
<i>Cyclotella stelligera</i>	3,4	<i>Hantzchia abundans</i>	3,6	<i>Pinnularia</i> cf <i>lundii</i>	3,8
<i>Cymbella</i> cf <i>gracilis</i>	2,8	<i>Navicula</i> cf <i>arvensis</i>	3,9	<i>Pinnularia</i> cf <i>subcapitata</i>	3,3
<i>Cymbella minuta</i>	4,6	<i>Navicula</i> cf <i>leptostriata</i>	2,8	<i>Pinnularia gibba</i>	4,3
<i>Cymbella naviculiformis</i>	2,2	<i>Navicula lanceolata</i>	3,0	<i>Pinnularia maior</i>	3,6
<i>Cymbella tumida</i>	3,8	<i>Navicula recens</i>	3,2	<i>Pinnularia microstauron</i>	3,3
<i>Encyonema</i> cf <i>silesiacum</i>	3,1	<i>Navicula</i> sp 1	3,6	<i>Pinnularia</i> sp	3,2
<i>Eolima</i> sp 3	4,6	<i>Navicula</i> sp 10	4,5	<i>Pinnularia</i> sp 1	4,5
<i>Eolima</i> cf <i>subminuscula</i>	3,3	<i>Navicula</i> sp 11	4,5	<i>Pinnularia</i> sp 2	3,8
<i>Eolima</i> cf <i>tantula</i>	3,2	<i>Navicula</i> sp 12	3,8	<i>Pinnularia</i> sp 3 cf <i>brebissonii</i>	3,5
<i>Eolima</i> sp	3,3	<i>Navicula</i> sp 13	4,5	<i>Pinnularia</i> sp 4	2,6
<i>Eolima</i> sp 1	3,3	<i>Navicula</i> sp 14	2,2	<i>Pinnularia</i> sp 5	3,2
<i>Eolima</i> sp 2	3,2	<i>Navicula</i> sp 15	2,0	<i>Pinnularia viridiformis</i>	3,4
<i>Epithemia adnata</i>	3,0	<i>Navicula</i> sp 16	4,6	<i>Rhoicosphenia</i> sp	4,6

<i>Epithemia cf adnata</i>	2,8 <i>Navicula</i> sp 17	3,2	<i>Rhopalodia gibba</i>	2,9
<i>Epithemia cf sorex</i>	3,2 <i>Navicula</i> sp 18	2,9	<i>Sellaphora aff rectangularis</i>	3,2
<i>Eunotia bilunaris</i>	3,2 <i>Navicula</i> sp 19	3,2	<i>Sellaphora pupula</i>	3,1
<i>Eunotia</i> sp 1	2,8 <i>Navicula</i> sp 2	3,1	<i>Sellaphora</i> sp	3,1
<i>Eunotia tridentula</i>	4,5 <i>Navicula</i> sp 20	3,2	<i>Stauroneis</i>	3,3
<i>Fragilaria acus</i>	3,3 <i>Navicula</i> sp 21	3,7	<i>Stausira mercedes</i>	3,3
<i>Fragilaria cf pinnata</i>	3,5 <i>Navicula</i> sp 3	3,4	<i>Surirella</i>	3,4
<i>Fragilaria leptostauron</i>	3,4 <i>Navicula</i> sp 4	3,9	<i>Surirella cf brebissonii</i>	2,6
<i>Fragilaria pinnata</i>	3,6 <i>Navicula</i> sp 5	3,1	<i>Surirella</i> sp 2	3,9
<i>Fragilaria</i> sp 5	4,9 <i>Navicula</i> sp 6	2,7	<i>Tabellaria</i>	2,8

4.3.2 Índice para el nivel de género o IGD (Índice para Géneros de Diatomeas)

La clasificación de los humedales en cada periodo según el IGD se puede ver en la figura 20, donde se observa que Santa María del Lago tuvo las mayores calificaciones alcanzando su mayor valor durante el tercer muestreo. Esto lo cataloga como humedal con aceptables condiciones limnológicas. Meridor tuvo valores similares durante todo el estudio, los cuales siempre fueron superiores a 35 e inferiores a 36, y esto lo ubica como un sistema de regulares condiciones. Tibanica y Jaboque mostraron estimaciones moderadas que fluctuaron entre 34 y 35, lo cual los clasifica como humedales de regulares condiciones. Guaymaral y Juan Amarillo presentaron valores variables que en ambos casos fueron mínimos durante el tercer periodo. El bajo registro de Juan Amarillo permite calificarlo para este muestreo como un humedal de malas o deficientes condiciones.

En la tabla 12 se puede ver la clasificación general según el IGD. Cinco de los seis humedales evaluados presentan regulares condiciones debido a un fuerte nivel de polución, mientras que solo Santa María de Lago es de aceptables condiciones limnológicas al presentar un nivel de polución moderado.

Cabe resaltar que la amplitud de las calificaciones (valor máximo menos valor mínimo) fue menor en el IGD en comparación con el IDHB (IGD: 5.17, IDHB: 8.83). La varianza de los datos fue también mayor para el IDHB (IGD: 0.98, IDHB: 5.74). De lo anterior se puede deducir que el IGD no permite hacer una discriminación suficientemente fina de la condición de contaminación de los humedales.

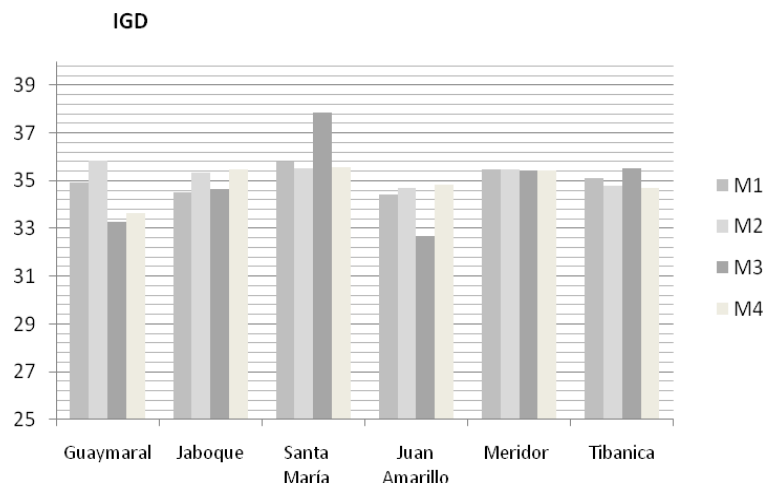


Figura 20. Puntaje del IGD para los humedales en cada periodo evaluado. M= muestreo.

Tabla 12. Clasificación general para los humedales estudiados según el IGD.

HUMEDAL	IGD Promedio	Interpretación con base en los géneros de diatomeas
TIBANICA	35,03	Humedal con regulares condiciones limnológicas
MERIDOR	35,44	Humedal con regulares condiciones limnológicas
JABOQUE	34,99	Humedal con regulares condiciones limnológicas
JUAN AMARILLO	34,15	Humedal con regulares condiciones limnológicas
SANTA MARIA	36,17	Humedal con aceptables condiciones limnológicas
GUAYMARAL	34,41	Humedal con regulares condiciones limnológicas

Los valores de polución para cada género en los cuales se basó el cálculo del IGD se presentan en la tabla 13, en la cual los registros más altos corresponden a los taxones más tolerantes, posiblemente indicadores de un mayor nivel de polución.

Tabla 13. Listado de valores de polución de los géneros de diatomeas usados para la construcción del índice para géneros de diatomeas de los humedales bogotanos (IGD). Registros altos corresponden a taxones más tolerantes a la contaminación y valores menores a taxones sensibles.

GÉNERO	VPT	GÉNERO	VPT	GÉNERO	VPT
<i>Achnanthes</i>	3,2	<i>Cymbella</i>	3,1	<i>Melosira</i>	4,5
<i>Achnantheidium</i>	3,3	<i>Diadlesmis</i>	2,0	<i>Navicula</i>	3,2
<i>Amphora</i>	3,3	<i>Encyonema</i>	3,1	<i>Nitzschia</i>	3,2
<i>Anomoeoneis</i>	3,4	<i>Eolimna</i>	3,2	<i>Pinnularia</i>	3,3
<i>Aulacoseira</i>	3,3	<i>Ephitemia</i>	3,1	<i>Rhoicosphenia</i>	4,6
<i>Caloneis</i>	3,8	<i>Eunotia</i>	3,2	<i>Rhopalodia</i>	2,9
<i>cf Bacillaria</i>	3,2	<i>Fragilaria</i>	3,2	<i>Sellaphora</i>	3,2
<i>cf Kobayasiella</i>	3,4	<i>Frustulia</i>	3,4	<i>Stauroneis</i>	3,3
<i>Cocconeis</i>	3,3	<i>Gomphonema</i>	3,2	<i>Staurosira</i>	3,3
<i>Craticula</i>	3,4	<i>Gyrosima</i>	2,0	<i>Surirella</i>	3,3
<i>Cyclotella</i>	3,2	<i>Hantzchia</i>	3,6	<i>Tabellaria</i>	2,8

La prueba de Pearson mostró que el IGD tuvo correlaciones negativas con los valores IP de cada estación ($r: -0.56$) y con la DBO ($r: -0.66$). Por otra parte, los valores IP tuvieron una mayor correlación positiva con el amonio ($r: 0.64$), los nitritos ($r: 0.59$), los fosfatos (0.68) y la DBO (0.69); los valores de otras variables se registran en la tabla 14.

Tabla 14. Tabla de correlaciones de Pearson entre el IGD y las variables fisicoquímicas evaluadas durante el estudio. Los valores en la diagonal inferior (sombreados) corresponden a los valores de correlación y en la diagonal superior a la probabilidad.

	IGD	IP.st	Cond	Sóldis	OD	pH	Cloruros	Dureza	Amonio	Nitritos	Nitratos	fosfatos	DBO
IGD	0,00	0,00	0,83	0,69	0,28	0,85	0,40	0,42	0,01	0,78	0,85	0,42	0,00
IP.st	-0,56	0,00	0,77	0,90	0,02	0,41	0,42	0,36	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00
Conduc	-0,05	-0,06	0,00	0,00	0,13	0,04	0,00	0,00	0,88	0,80	0,41	0,87	0,51
Sóldis	-0,09	0,03	0,84	0,00	0,26	0,03	0,04	0,00	0,82	1,00	0,08	0,96	0,86
OD	0,23	-0,47	-0,32	-0,24	0,00	0,00	1,00	0,96	0,25	0,34	0,11	0,29	0,21
pH	-0,04	-0,18	-0,43	-0,45	0,69	0,00	0,53	0,16	0,79	0,61	0,92	0,51	0,79
Cloruros	0,18	-0,17	0,60	0,43	0,00	-0,13	0,00	0,00	0,42	0,68	0,54	0,63	0,40
Dureza	0,17	-0,19	0,66	0,62	0,01	-0,30	0,89	0,00	0,52	0,87	0,17	0,71	0,33
Amonio	-0,54	0,64	-0,03	0,05	-0,24	-0,06	-0,17	-0,14	0,00	0,16	0,61	0,12	0,01
Nitritos	-0,06	0,59	-0,05	0,00	-0,20	-0,11	-0,09	-0,03	0,30	0,00	0,62	0,00	0,69
Nitratos	-0,04	-0,20	0,18	0,36	0,34	-0,02	0,13	0,29	-0,11	-0,11	0,00	0,51	0,68
fosfatos	-0,17	0,68	-0,04	-0,01	-0,22	-0,14	-0,10	-0,08	0,33	0,94	-0,14	0,00	0,78
DBO	-0,66	0,69	-0,14	-0,04	-0,26	-0,06	-0,18	-0,21	0,50	-0,08	-0,09	0,06	0,00

Al igual que el IDHB el IGD muestra así que las variables indicadoras de carga de nutrientes son las que más influyen en el valor de los puntajes, principalmente la DBO.

4.3.3 Índice sapróbico o ISHB

El índice sapróbico de diatomeas de los humedales bogotanos (ISHB) se desarrolló con base en los valores sapróbicos establecidos para 74 especies, que fueron las que contaron con una frecuencia de aparición superior al 10% en el estudio. En la medida en que el valor sapróbico de una especie sea menor, su tolerancia a la contaminación orgánica se reduce, por lo cual su presencia indica una mejor condición del sistema. Los valores sapróbicos para las especies de diatomeas de los humedales de Bogotá se registran en la tabla 15.

Tabla 15. Listado de valores sapróbicos de las especies de diatomeas usadas para la construcción del Índice Sapróbico de los humedales bogotanos (ISHB). Registros altos corresponden a taxones tolerantes a altas cargas de materia orgánica.

ESPECIE	VALOR SAPRÓBICO	CONDICION	ESPECIE	VALOR SAPRÓBICO	CONDICION
<i>Achnanthes</i> sp 1	44,8	Polisapróbica	<i>Gomphonema cf olivaceum</i>	24,5	Polisapróbica
<i>Achnanthes</i> sp 2	78,1	Isosapróbica	<i>Gomphonema parvulum</i>	58,5	Isosapróbica
<i>Achnanthes exigua</i>	18,1	Polisapróbica	<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	53,8	Isosapróbica
<i>Achnanthes hungarica</i>	73,3	Isosapróbica	<i>Gomphonema punae</i>	16,0	Polisapróbica
<i>Achnanthes lanceolata</i>	10,2	Polisapróbica	<i>Gomphonema truncatum</i>	20,4	Polisapróbica
<i>Achnanthidium minutissima</i>	29,4	Polisapróbica	<i>Hantzchia abundans</i>	51,7	Isosapróbica
<i>Amphora coffeaeformis</i>	34,0	Polisapróbica	<i>Navicula</i> sp 1	81,1	Isosapróbica
<i>Anomoeoneis cf sculpta</i>	20,1	Polisapróbica	<i>Navicula</i> sp 12	143,0	Isosapróbica
<i>Aulacoseira granulata</i>	23,6	Polisapróbica	<i>Navicula</i> sp 2	19,3	Polisapróbica
<i>Cocconeis placentula</i> cf var <i>euglypta</i>	58,1	Isosapróbica	<i>Navicula</i> sp 3	76,8	Isosapróbica
<i>Cocconeis placentula</i>	17,3	Polisapróbica	<i>Navicula</i> sp 5	27,4	Polisapróbica
<i>Craticula ambigua</i>	96,0	Isosapróbica	<i>Navicula</i> sp 6	16,4	Polisapróbica
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	52,3	Isosapróbica	<i>Navicula</i> sp 7	13,0	Polisapróbica
<i>Cyclotella stelligera</i>	53,7	Isosapróbica	<i>Navicula cf leptostriata</i>	29,4	Polisapróbica
<i>Eolima</i> sp 1	17,7	Polisapróbica	<i>Nitzschia</i> sp 1	41,7	Polisapróbica
<i>Eolima</i> sp 2	30,2	Polisapróbica	<i>Nitzschia</i> sp 2	46,3	Polisapróbica
<i>Eolima</i> sp	35,9	Polisapróbica	<i>Nitzschia</i> sp 3	35,1	Polisapróbica
<i>Eolima cf subminuscula</i>	9,8	Alfa-meso sapróbica	<i>Nitzschia</i> sp 4	31,2	Polisapróbica
<i>Eolima cf tantula</i>	29,8	Polisapróbica	<i>Nitzschia</i> sp 5	37,2	Polisapróbica
<i>Ephitemia adnata</i>	23,5	Polisapróbica	<i>Nitzschia</i> sp 6	44,4	Polisapróbica
<i>Ephitemia cf sorex</i>	26,7	Polisapróbica	<i>Nitzschia</i> sp 7	22,3	Polisapróbica
<i>Eunotia bilunaris</i>	15,2	Polisapróbica	<i>Nitzschia</i> sp 8	20,8	Polisapróbica
<i>Fragilaria acus</i>	27,1	Polisapróbica	<i>Nitzschia</i> sp 9	77,9	Isosapróbica

<i>Fragilaria cf pinnata</i>	57,5	Isosapróbica	<i>Nitzschia amphibia</i>	10,5	Polisapróbica
<i>Fragilaria leptostauron</i>	47,4	Polisapróbica	<i>Nitzschia capitellata</i>	40,9	Polisapróbica
<i>Fragilaria pinnata</i>	67,0	Isosapróbica	<i>Pinnularia cf brebissonii</i>	174,5	Isosapróbica
<i>Fragilaria ulna</i>	14,4	Polisapróbica	<i>Pinnularia brebissonii</i>	53,0	Isosapróbica
<i>Gomphonema sp 2</i>	22,3	Polisapróbica	<i>Pinnularia mayor</i>	88,2	Isosapróbica
<i>Gomphonema sp 3</i>	55,3	Isosapróbica	<i>Pinnularia microstauron</i>	85,5	Isosapróbica
<i>Gomphonema sp 4</i>	50,1	Isosapróbica	<i>Pinnularia sp</i>	14,5	Polisapróbica
<i>Gomphonema sp 5</i>	38,6	Polisapróbica	<i>Pinnularia cf subcapitata</i>	168,8	Isosapróbica
<i>Gomphonema sp 6</i>	75,2	Isosapróbica	<i>Pinnularia viridiformis</i>	83,3	Isosapróbica
<i>Gomphonema sp 8</i>	20,4	Polisapróbica	<i>Rhopalodia gibba</i>	13,6	Polisapróbica
<i>Gomphonema acuminatum</i>	21,3	Polisapróbica	<i>Sellaphora pupula</i>	24,0	Polisapróbica
<i>Gomphonema affine</i>	13,8	Polisapróbica	<i>Sellaphora sp</i>	76,3	Isosapróbica
<i>Gomphonema angustatum</i>	24,7	Polisapróbica	<i>Staurosira mercedes</i>	101,4	Isosapróbica
<i>Gomphonema gracile</i>	20,9	Polisapróbica	<i>Stauroneis</i>	61,1	Isosapróbica

De acuerdo con los resultados de los valores sapróbicos obtenidos, las especies se catalogaron en tres categorías de condición de saprobiedad, según la escala propuesta por Sládeček en 1979 (ver escala en la metodología). Estas categorías fueron: α -mesosaprobiedad, en la que se presentó solo una especie y que se refiere a una condición de aguas polutas no aptas incluso para recreación; polisaprobiedad que incluyó 46 especies y que hace referencia a condiciones de aguas altamente polutas con condiciones microaeróbicas; por último la condición de isosaprobiedad representada por 27 especies y que señala aguas con un muy alto nivel de polución, en las que predominan las condiciones anaeróbicas debido principalmente al aporte de aguas residuales. Ninguna especie tuvo calificaciones de bajo grado de saprobiedad.

Al igual que para el IDHB y el IGD, los valores bajos en la escala de saprobiedad se consideran propios de especies indicadoras de una menor condición de contaminación orgánica. En la figura 21 se registran los puntajes arrojados por el **ISHB** de los humedales en cada periodo evaluado. Se puede ver que el humedal que presenta mejores condiciones es Meridor, que obtuvo los más bajos puntajes en cada periodo. Le sigue de cerca Santa María del Lago, que tuvo los segundos valores más bajos en cada periodo. Muy cerca de Santa María del Lago se ubicó Tibanica, con un comportamiento similar en cada muestreo. Jaboque presentó registros intermedios que durante los muestreos segundo, tercero y cuarto fueron semejantes a los de Tibanica y Santa María del Lago. No obstante, la alta calificación de Jaboque para el primer periodo hizo que su promedio general se alejara del de los otros humedales. Las calificaciones para estos humedales fueron en todos los periodos climáticos propias de aguas con un considerable grado de polución orgánica.

Juan Amarillo y Guaymaral fueron los humedales con los mayores puntajes del índice sapróbico y por lo tanto, los de peores condiciones de contaminación orgánica. Guaymaral presentó valores particularmente altos durante el cuarto periodo y Juan Amarillo en el tercero. Según la escala de calificación, estos dos humedales se catalogarían como cuerpos de agua con un grado muy alto de polución en dichos muestreos, mientras que en los restantes periodos sus calificaciones correspondieron a humedales con un alto grado de polución.

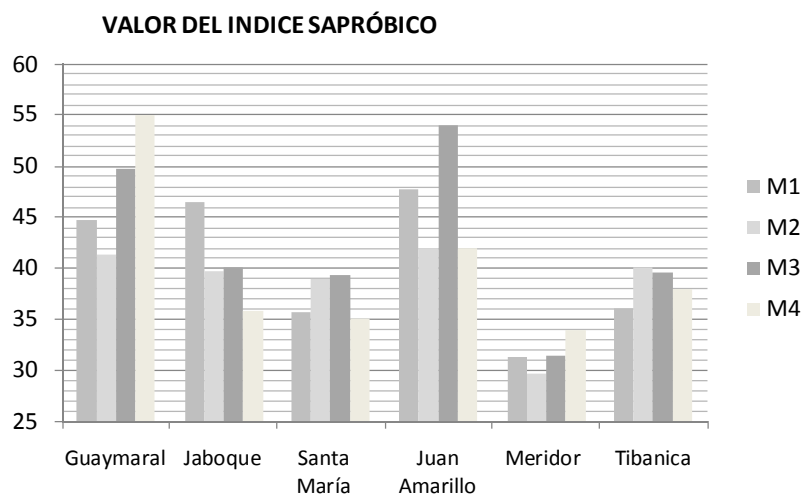


Figura 21. Puntaje del ISHB para los humedales en cada periodo evaluado. M= muestreo.

La clasificación según los promedios del ISHB para cada humedal se registra en la tabla 16. Allí se puede ver que el ISHB agrupa a los seis humedales en una única categoría correspondiente a ecosistemas acuáticos polisapróbicos, es decir que poseen un alto grado de polución. Como puede verse, el ISHB no posee ningún grado de discriminación de las posibles diferencias que se puedan presentar en estos cuerpos de agua.

Tabla 16. Clasificación general para los humedales estudiados según el ISHB.

HUMEDAL	ISHB Promedio	Categoría	Interpretación
TIBANICA	38.4	Polisapróbico	Humedal de aguas con un alto grado de polución
MERIDOR	31.5	Polisapróbico	Humedal de aguas con un alto grado de polución
JABOQUE	40.5	Polisapróbico	Humedal de aguas con un alto grado de polución
JUAN AMARILLO	46.3	Polisapróbico	Humedal de aguas con un alto grado de polución
SANTA MARIA	37.2	Polisapróbico	Humedal de aguas con un alto grado de polución
GUAYMARAL	47.7	Polisapróbico	Humedal de aguas con un alto grado de polución

La prueba de correlación de Pearson (tabla 17) muestra que el ISHB, como se esperaba, tuvo uno de los mayores valores de correlación con la DBO (0.54). No obstante la variable que más se correlacionó con el ISHB fueron los cloruros, que tuvieron una correlación de -0.62. La dureza también tuvo una de las mayores correlaciones con el ISHB (-0.52).

Tabla 17. Tabla de correlaciones de Pearson entre el ISHB y las variables fisicoquímicas evaluadas durante el estudio, los valores en la diagonal inferior (sombreados) corresponden a los valores de correlación y en la diagonal superior a la probabilidad.

	ISHB	Conduc	Sóldis	OD	pH	Cloruro	Dureza	Amonio	Nitritos	Nitratos	fosfatos	DBO
ISHB	0,00	0,08	0,30	0,46	0,98	0,00	0,01	0,02	0,84	0,56	0,54	0,01
Conduc	-0,37	0,00	0,00	0,13	0,04	0,00	0,00	0,88	0,80	0,41	0,87	0,51
Sóldis	-0,22	0,84	0,00	0,26	0,03	0,04	0,00	0,82	1,00	0,08	0,96	0,86
OD	-0,16	-0,32	-0,24	0,00	0,00	1,00	0,96	0,25	0,34	0,11	0,29	0,21
pH	-0,01	-0,43	-0,45	0,69	0,00	0,53	0,16	0,79	0,61	0,92	0,51	0,79
Cloruros	-0,62	0,60	0,43	0,00	-0,13	0,00	0,00	0,42	0,68	0,54	0,63	0,40
Dureza	-0,52	0,66	0,62	0,01	-0,30	0,89	0,00	0,52	0,87	0,17	0,71	0,33
Amonio	0,49	-0,03	0,05	-0,24	-0,06	-0,17	-0,14	0,00	0,16	0,61	0,12	0,01
Nitritos	0,04	-0,05	0,00	-0,20	-0,11	-0,09	-0,03	0,30	0,00	0,62	0,00	0,69
Nitratos	-0,13	0,18	0,36	0,34	-0,02	0,13	0,29	-0,11	-0,11	0,00	0,51	0,68
fosfatos	0,13	-0,04	-0,01	-0,22	-0,14	-0,10	-0,08	0,33	0,94	-0,14	0,00	0,78
DBO	0,54	-0,14	-0,04	-0,26	-0,06	-0,18	-0,21	0,50	-0,08	-0,09	0,06	0,00

DISCUSIÓN

Como producto principal de este trabajo se presenta el IDHB o índice de diatomeas para evaluar el estado de los humedales bogotanos. Este índice evidenció un buen desempeño ya que permitió determinar la calidad de agua de los humedales que fueron incluidos en el estudio. Mediante el IDHB se pudo realizar una clara discriminación de estos ecosistemas acuáticos, la cual en términos generales estuvo de acuerdo con lo que se esperaría según los datos reportados sobre el estado general de los mismos. Tal información comparativa se encuentra en un completo estudio, publicado recientemente por la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá (Van der Hammen 2008). El presente trabajo constituye así una de las primeras iniciativas de aplicación de herramientas de bioindicación para evaluar este tipo de ecosistemas en la región andina del país, con base en las diatomeas como organismos indicadores. Adicionalmente, se ofrece un catálogo de las especies encontradas con información sobre algunas de las características halladas en este estudio.

A continuación se discuten los tres ejes principales sobre los cuales se desarrolló este trabajo: el ambiente fisicoquímico, las características de las comunidades de diatomeas de los humedales y la valoración del estado de los humedales con base en los índices propuestos.

El ambiente fisicoquímico de los humedales Bogotanos

Las mediciones realizadas en este estudio de las variables fisicoquímicas evidenciaron, mediante técnicas estadísticas multivariadas, que hay cierta heterogeneidad entre los humedales estudiados. Tales diferencias se deben a las variaciones en sus características fisicoquímicas. Una mirada a las particularidades de cada humedal permite establecer que estas diferencias podrían ser ocasionadas principalmente por el tipo de agua que recibe cada cuerpo de agua (residuales, lluvias, de quebradas, subterráneas), lo cual es un factor determinante en las características de este tipo de ecosistemas (Moore, 2006)

Meridor y Santa María del Lago son humedales ombrotáficos, que no reciben aportes de aguas residuales y en general están alimentados solo por aguas lluvias. Adicionalmente, en Meridor es probable que existan aportes de aguas subterráneas, lo que explicaría sus altos valores de cloruros y dureza, que son similares a los encontrados en aguas de este origen en cercanías del humedal (Tenjo) (Garzón 2006). Las concentraciones de estos iones son muy

superiores a lo establecido por la norma Colombiana, que indica como valor límite para los cloruros 250 mg/L y para la dureza 160 mg/L. En este estudio se encontró para Meridor una concentración promedio de 345 mg/L de cloruros y de 331.5 mg/L de dureza. En el caso de Santa María del Lago las concentraciones para ambas variables se mantuvieron por debajo de lo que indica la norma.

Una característica que es común a estos dos humedales es que, comparados con los otros sistemas evaluados, tuvieron concentraciones de nutrientes bajas, a excepción del primer periodo estudiado correspondiente a la época de lluvias. En esta época los dos humedales tuvieron una concentración de fosfatos alta, que para Meridor podría estar relacionada con el posible lavado de los terrenos circundantes, los cuales incluyen algunos pequeños cultivos y pastos en ganadería.

Los restantes humedales son reotróficos, es decir, están sujetos a las variaciones de los cuerpos de agua que los alimentan, los cuales en todos los casos acarrean una alta carga de material orgánico y de desechos industriales. Estas condiciones, además de favorecer la proliferación de algas, aceleran procesos como la sedimentación, que es natural en este tipo de ecosistemas (Moore 2006), pero que puede considerarse negativa desde un punto de vista estético o social. Debe recordarse que precisamente los usos recreativos y educativos constituyen uno de los principales enfoques desde los cuales resultan de interés este tipo de ecosistemas para las entidades encargadas de su manejo en la ciudad de Bogotá.

Otro de los efectos del proceso de eutrofización o aporte excesivo de nutrientes, es el favorecimiento de la proliferación de las comunidades algales y de algunas plantas macrófitas, situación que puede generar en algunos casos condiciones anaeróbicas en el cuerpo de agua que traen como consecuencia la producción de compuestos que emiten olores desagradables (Moore 2006). Esta situación se observó permanentemente en Juan Amarillo, Tibanica y en algunos periodos en Guaymaral; Jaboque por su parte no presentó en la zona de muestreo estas coberturas densas de macrófitas y tampoco se evidenciaron olores desagradables.

En Juan Amarillo se observó particularmente un aumento en las concentraciones de amonio hasta el tercer periodo y de fosfatos del segundo al tercer periodo, lo que coincide con la observación en campo de una rápida expansión de *Eichornia crassipes* en el humedal. Una situación similar se presentó en Tibanica, donde la zona de espejo de agua observada en el

primer muestreo fue reemplazada paulatinamente a través del estudio por densos tapetes de *E. crassipes*. Los avances de esta especie se han atribuido al aumento en las concentraciones de nutrientes y traen consigo otras consecuencias para las comunidades de acuáticas de los humedales, como la reducción del flujo de agua, el impedimento de la penetración de la luz y la desoxigenación del sistema (Cronk y Fennessy 2001).

Según las concentraciones de amonio Guaymaral, Jaboque, Santa María del Lago y Tibanica fueron mesotróficos. Igualmente lo fue Meridor, a excepción del tercer periodo donde su concentración fue mayor a 2 mg / L, lo cataloga en este periodo como humedal eutrófico. Juan Amarillo fue eutrófico en todos los muestreos. Esta clasificación se basa en la escala propuesta por Esteves (1998) y referida por Roldán y Ramírez (2008).

Una variable indicadora de la carga de materia orgánica en un sistema es la demanda biológica de oxígeno (Wetzel y Likens 1991), que corresponde a la cantidad de oxígeno requerido para la degradación de dicha materia orgánica. En este estudio se encontró que los mayores valores se presentaron en Juan Amarillo y Guaymaral. En Juan Amarillo esto puede deberse a la gran concentración de nutrientes que ya ha sido mencionada. En Guaymaral, además de este exceso de nutrientes, la no existencia de una columna de agua puede hacer aun más crítica la escasez de oxígeno, por lo que no es sorprendente que los valores de DBO lleguen a ser tan altos (Branco 1984).

A partir de los valores promedio de transparencia, Juan Amarillo y Jaboque pueden catalogarse como eutróficos, mientras que Meridor, Santa María del Lago y Tibanica se clasificarían como mesotróficos. Sin embargo, si se discriminan los valores de cada periodo climático, Tibanica en dos periodos y Meridor en uno serían eutróficos, Santa María del lago siempre estaría en la categoría de mesotrofia y Meridor en dos periodos correspondería a un cuerpo de agua oligotrófico, según la clasificación propuesta en Roldán y Ramírez (2008).

Como se observa cada variable independientemente ofrece resultados distintos sobre el estado de trofia de cada humedal. Es en este sentido que una aproximación multimétrica permite abarcar una mayor gama de posibilidades, ya que la limitación a una sola variable puede conducir a interpretaciones que puedan llegar a ser erróneas (Alley 2007).

De esta manera, la evaluación en conjunto de las variables fisicoquímicas medidas (además de la heterogeneidad evidenciada según los métodos de análisis estadístico multivariado que ya se mencionó) parecería revelar que todos los humedales evaluados presentan distintos grados de eutrofia. Esto se hace más evidente por las concentraciones de nutrientes y por algunos atributos físicos en humedales como Juan Amarillo, Tibanica y Guaymaral. Adicionalmente, Guaymaral parece ser un humedal en condiciones críticas por su avanzado estado de sedimentación. Jaboque por su parte no presenta valores extremos en sus concentraciones de nutrientes y sus atributos físicos son también intermedios. Finalmente, según las variables fisicoquímicas Santa María del Lago y Meridor parecerían ser los humedales de mejores condiciones; no obstante en Meridor sus concentraciones de cloruros y dureza hacen de él un humedal particular y alejado fisicoquímicamente de los restantes sistemas evaluados.

La comunidad de diatomeas perifíticas de los humedales Bogotanos

La dinámica de la comunidad de diatomeas perifíticas de cada humedal tuvo un comportamiento particular y no puede establecerse un patrón general que permita predecir su comportamiento. Como se verá a continuación, cada sistema muestra características propias de su comunidad de diatomeas que parecen depender de diversos factores, distintos en cada caso.

La evaluación de atributos como la diversidad y la riqueza no parece arrojar patrones claros de organización de las comunidades de diatomeas perifíticas de los humedales. Se observaron algunas tendencias en Tibanica, Meridor y Jaboque, donde se detectó un descenso en los valores de diversidad hasta el tercer periodo, seguido por un ligero aumento en este valor en el cuarto periodo, pero en general los resultados no son consistentes. Esta amplia variación en los resultados numéricos y cualitativos de las comunidades de diatomeas perifíticas de los humedales bogotanos puede indicar que cada ecosistema presenta unas condiciones suficientemente particulares que lo diferencian de los demás. También se podría deber a factores que no se midieron en este estudio, tales como fenómenos individuales y estocásticos de cada humedal (variaciones en las descargas de contaminantes, parámetros fisicoquímicos no contemplados, actividades de recuperación), los cuales podrían ser los causantes de la variabilidad espacial y temporal.

Algunos estudios han encontrado que en zonas o cuerpos de agua donde *Eichornia crassipes* es muy abundante, las poblaciones como las del zooplancton presentan disminución en su riqueza y abundancia, favoreciendo así comunidades como la fitoplanctónica y la perifítica (Chukwuka y Uka 2007). Esto se debe en parte a que un aumento en la cantidad de macrófitas provoca una mayor disponibilidad de áreas que pueden ser colonizadas por el perifiton. Esto explicaría el caso de Guaymaral, que en principio podría considerarse como un ambiente es hostil para las diatomeas debido principalmente a la escasez generalizada de agua, pero que mostró la mayor diversidad del estudio en el tercer periodo, cuando el valor de DBO fue el mayor registrado. En Guaymaral entonces las comunidades perifíticas pueden verse altamente favorecidas por la alta y variada oferta de sustratos aportados por las plantas acuáticas, lo cual aumenta considerablemente el establecimiento de comunidades más diversas (Stevenson *et al.* 1996). Por otra parte, por las condiciones ya mencionadas de ausencia de una columna de agua, la competencia con comunidades como la fitoplanctónica disminuiría y la depredación por parte del zooplancton y de los macroinvertebrados sería mínima. Además, las diatomeas no se parecen verse afectadas por las variaciones de luz (Roldán y Ramírez 2008), de manera que la sombra que provocan las macrófitas tendría poco efecto sobre la comunidad.

Además, en Guaymaral se observó un comportamiento de la diversidad acorde con las concentraciones de fosfatos. Conforme aumentaron las concentraciones de fosfatos en el humedal, aumentaron los valores de diversidad; en el cuarto periodo, cuando la concentración disminuyó, también la diversidad lo hizo. Esto podría indicar, como lo señalan Roldán y Ramírez (2008), que el fósforo es un elemento determinante en Guaymaral y que aunque sus concentraciones son altas, este puede ser un elemento clave en este humedal.

Cuando los valores de DBO y amonio fueron máximos en Juan Amarillo se presentó la mayor diversidad en este sistema. Este hecho puede indicar que las especies de diatomeas de este humedal están adaptadas a las condiciones estresantes de Juan Amarillo. Pareciera que al presentarse el disturbio ocasionado por las cargas de nutrientes, se favorece el establecimiento de comunidades más diversas. Algunos estudios han encontrado que el número de especies se incrementa si el disturbio es moderado y disminuye si las modificaciones son extremas (Fore y Grafe 2002). Otros trabajos señalan que el aporte de nutrientes por aguas de descarga, principalmente en forma de nitrógeno amoniacal, favorece el aumento de la diversidad y la uniformidad en la comunidad en comparación con sistemas de menor carga de nutrientes (Marcus, 1980). Odum (1975) sugiere que si un sistema con alta

diversidad es perturbado, el estrés puede disminuir la diversidad, pero si un sistema de baja diversidad es perturbado, la perturbación puede incrementar la diversidad, aunque no existe claridad sobre los mecanismos que generan una respuesta u otra.

Meridor y Santa María del Lago mostraron la mejor calidad de aguas. A pesar de esto, Meridor tuvo los menores valores de riqueza y diversidad durante el estudio, y aunque sus concentraciones de nutrientes fueron comparativamente bajas, sus altos valores de cloruros y dureza pudieron haber sido determinantes para hacer que la baja diversidad y la riqueza fueran tan bajas en este cuerpo de agua. No obstante, por sus condiciones de menor carga de nutrientes y materia orgánica, se puede considerar como un sistema de referencia para los demás humedales distritales.

Desde otra perspectiva, la poca variación en los valores de diversidad, riqueza y dominancia en Santa María del Lago serían indicadores de una relativa “estabilidad” en este sistema, lo cual puede deberse, entre otras cosas, a que este humedal no está sujeto a las variaciones de un río o quebrada que lo alimente. En consecuencia, la posibilidad de eventos de perturbación debidos al aporte de aguas de origen antrópico se ve reducida en Santa María, situación que sí es determinante y evidente en los restantes humedales. En este aspecto, Meridor parece estar en las mismas condiciones de Santa María.

Podría esperarse que la composición de la comunidad de diatomeas de Meridor fuera significativamente diferente, ya que tuvo características fisicoquímicas particularmente diferentes a las de los otros humedales. No obstante Meridor fue junto con Jaboque, uno de los humedales con menor número de especies únicas. Incluso en algunos de los periodos de muestreo los análisis de similitud basados en la composición de especies mostraron un mayor porcentaje de semejanza con humedales como Guaymaral y Juan Amarillo. Estos resultados parecen señalar que las diatomeas de los humedales bogotanos son bastante cosmopolitas y que sus variaciones se dan más por cambios en las abundancias que en la composición de especies.

La concentración de cloruros es quizá el parámetro que más influye en la distribución de los organismos acuáticos, por cuanto estos tienen que vencer la presión osmótica por ellos ejercida (Roldán y Ramírez, 2008). Aguas con alta salinidad y por ende con elevada conductividad, presentan por lo regular alta productividad en términos de biomasa, pero baja

diversidad de especies. En otras palabras, las altas diversidades se corresponden a menudo con bajas conductividades, principalmente si la alta conductividad está relacionada con un alto contenido de sales, como parece ser el caso de Meridor.

Como se mencionó anteriormente, puede decirse que las comunidades de diatomeas perifíticas de los humedales distritales están compuestas en gran parte por especies de amplia distribución. Además de ser bajo el número de especies restringidas a un único humedal, el cálculo de las tolerancias evidenció un amplio rango para la mayoría de especies. Los valores óptimos y las tolerancias calculados para la mayoría de especies indicarían que las diatomeas evaluadas serían poco útiles como bioindicadoras, al menos como entidades individuales, ya que lo óptimo en la indicación biológica es emplear taxones que posean rangos estrechos de tolerancia (Jorgensen *et al.*, 2005). No obstante, como se discutirá más adelante, cuando se considera el conjunto de especies (la comunidad total de diatomeas), sí es posible obtener una indicación que refleje las condiciones fisicoquímicas de los humedales. Algunas pocas especies sí parecen tener condiciones estenotípicas, aspecto que se tratará a continuación.

Una de las especies que podría ser una buena indicadora es *Aulacoseira granulata* debido a que presentó valores óptimos, asociados a bajos registros de conductividad, fosfatos, amonio y dureza. Su valor óptimo de oxígeno disuelto estuvo por encima del promedio general. Además, los rangos de tolerancia calculados para *A. granulata* con respecto a estas mismas variables fueron estrechos, característicos de una especie estenotípica.

Achnanthydium minutissimum por su parte, podría considerarse como una especie indicadora de condiciones de moderada calidad del agua, ya que fue un taxón importante en Meridor. En este humedal *A. minutissimum* presentó altos porcentajes de abundancia relativa, principalmente en los periodos tercero y cuarto, en los que casi el 50% de las valvas contadas pertenecieron a esta especie. En Santa María del Lago (con aceptable calidad del agua) también tuvo abundancias significativas. Además, sus valores óptimos en cuanto a nutrientes fueron bajos.

Achnanthydium minutissimum se ha reportado como una de las especies más resistentes a la eutrofización dentro del género. No obstante, no alcanza abundancias muy altas en ambientes muy eutróficos (Ponader y Potapova, 2007), lo cual coincidiría con lo observado en este

estudio, donde si bien se halló en todos los humedales, solo fue importante en aquellos que podrían considerarse como menos eutróficos.

Especies como *Achnanthes exigua*, que se considera como sensible a la polución (Ponader y Potapova, 2007), tuvo abundancias mayores en Santa María del Lago en comparación con los otros humedales. No obstante, en ambientes que se considerarían no tan contaminados como Meridor, la especie no se colectó.

En el otro extremo (especies euritípicas), se puede mencionar el caso de *Gomphonema parvulum*. Esta es una especie que ha sido registrada como tolerante a la polución (Prygiel y Coste, 2000). En el presente estudio mostró abundancias mayores en humedales como Tibanica, Jaboque, Juan Amarillo y Guaymaral, los de aguas más contaminadas. La especie se encontró también en los otros humedales, pero sus porcentajes relativos y sus abundancias fueron menores.

Como observación interesante, se encontró una tendencia de las especies *Epithemia sorex* y *Epithemia adnata* a aparecer simultáneamente. En estudios posteriores se podría evaluar si este evento representa una asociación consistente. Por otra parte, en el futuro deberá también trabajarse en los aspectos taxonómicos de algunos grupos de difícil o dudosa determinación taxonómica. Esto será necesario para ciertas morfoespecies de los géneros *Navicula*, *Nitzschia* y *Eolimna*, que por el momento no se han llevado hasta especie. Una recomendación similar ha sido propuesta por Ponader y Potapova (2007), quienes señalan que es necesario crear claves taxonómicas locales, ya que la literatura disponible para la determinación taxonómica está muy restringida a la de la flora diatomológica europea.

Los valores de clorofila (relativamente bajos) indican que las comunidades perifíticas de los humedales de Bogotá no son tan productivas como se esperaría. Las comunidades de ambientes con altos valores de dureza o cloruros (aguas duras) se consideran muy productivas, pero esta mayor productividad está generalmente dada por unas pocas especies que se han adaptado a estas condiciones (Roldán y Ramírez, 2008). En este caso, los sistemas más mineralizados (Meridor y Tibanica) no fueron los de mayor concentración de clorofila, lo que indica que otras variables están involucradas en la productividad de las algas perifíticas. Santa María del Lago tuvo la mayor cantidad de clorofila posiblemente por la mayor diversidad de diatomeas. Sin embargo, en términos generales las concentraciones medidas permiten

establecer que los ecosistemas acuáticos evaluados son eutróficos según la clasificación de Esteves (1988).

Valoración de los humedales Bogotanos mediante los índices de diatomeas

En este trabajo se realizaron tres aproximaciones para la evaluación de la calidad del agua de los humedales capitalinos mediante índices de diatomeas. Una de estas propuestas es el índice Sapróbico para los humedales Bogotanos o ISHB, el cual agrupó a todos los humedales bajo la categoría de polisapróbicos, o sistemas con un alto grado de polución. Aunque este resultado está de acuerdo con los datos de la evaluación fisicoquímica realizada, no ofrece una discriminación apropiada y más precisa de la calidad del agua de los humedales, que como se vio, presentan características que indican heterogeneidad entre ellos. Por esta razón el ISHB no parece ser la mejor opción para evaluar los humedales capitalinos. Una de las posibles causas de este resultado, es que este índice se basa en una única variable fisicoquímica, la demanda biológica de oxígeno, que si bien presentó variaciones importantes entre humedales y entre periodos climáticos, no se vieron reflejadas en los valores de polución de las especies. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que todos los humedales estudiados tienen en mayor o menor grado altas cargas de materia orgánica, por lo cual no hay una diferenciación clara entre sistemas oligosapróbicos y polisapróbicos.

También se construyó el índice para el nivel de género o IGD, según el cual cinco de los seis humedales presentan condiciones limnológicas regulares. El humedal no incluido en este grupo fue Santa María del Lago, que se catalogó como sistema con condiciones limnológicas aceptables. De esta manera se tiene una situación similar a la presentada con el ISHB, es decir, bajo poder de discriminación. Aunque los resultados son acordes con el estado trófico de los humedales, el IGD no consigue una precisión suficientemente fina de la evaluación de la calidad del agua de los humedales, a pesar de la aproximación multimétrica de esta propuesta.

La propuesta que parece más sensible es la del IDHB o índice a nivel de especie para los humedales Bogotanos. Mediante una aproximación multimétrica, este IDHB permitió discriminar los humedales estudiados en categorías que variaron entre sistemas de ligera a severamente alterados en los distintos periodos climáticos evaluados. Sin embargo, las calificaciones en algunos humedales no fueron constantes en el tiempo. Este fue el caso de Guaymaral, que en los cuatro periodos estudiados obtuvo calificaciones correspondientes a

tres categorías distintas: condiciones aceptables, regulares y malas. Tibanica fue el único humedal que en todos los periodos se mantuvo como sistema de condiciones regulares, al poseer un nivel de degradación fuerte (aportes de aguas residuales). Por otra parte Meridor, el humedal que se escogió por sus características de poca intervención antrópica como sistema de comparación, fue catalogado por el IDHB como sistema con condiciones entre aceptables y regulares, correspondientes a una polución entre moderada y fuerte. Este fue un resultado distinto al esperado, ya que Santa María del Lago fue el humedal de mejores condiciones según el IDHB, al ser el único que se catalogó durante dos periodos climáticos como de condiciones óptimas, con un nivel de polución apenas ligero. Esta situación fue contraria a la de Juan Amarillo, que de acuerdo con el IDHB, fue el de peores condiciones dentro de los humedales estudiados, debido a su nivel de polución severo. Por último Jaboque se catalogó como un humedal de condiciones aceptables a regulares por sus niveles de polución entre moderadas y fuertes.

Como se observa, esta categorización de los humedales obtenida con el IDHB es más precisa y resulta, en algunos aspectos, similar a una clasificación reciente realizada por parte de la Secretaria Distrital del Ambiente, la cual tiene en cuenta atributos distintos a la calidad del agua (Van der Hammen *et al.*, 2008). Dicho estudio se basó en características físicas y bióticas y estableció un potencial de rehabilitación, según el cual, de los humedales estudiados en la presente investigación, los de peores a mejores condiciones son: Tibanica, Guaymaral, Juan Amarillo, Jaboque y Santa María del Lago. Esta clasificación y la obtenida con el IDHB difieren principalmente en la categorización de Juan Amarillo y Tibanica, que para la presente investigación son cuerpos de agua de condiciones limnológicas malas y regulares, respectivamente. No obstante, esta diferencia puede atribuirse a los criterios de evaluación utilizados en ese trabajo, que como ya se mencionó, involucraron variables no relacionadas con la calidad del agua. De las comunidades bióticas solo emplearon las macrófitas como criterio de valoración, sin incluir otros grupos como algas u otros organismos directamente relacionados con la calidad del agua.

Según Van der Hammen *et al.* (2008), los humedales ubicados hacia zonas más centrales de la ciudad presentan mayores tiempos de intervención y por tanto su estado es más crítico. Si esta condición se cumpliera, Jaboque sería el humedal más degradado de los humedales estudiados, seguido por Juan Amarillo y Santa María del Lago. Como humedales menos degradados estarían Tibanica y Guaymaral por encontrarse en la frontera del crecimiento

urbano. Según el IDHB esta condición no se cumple. Santa María del Lago, que debería ser uno de los más degradados, presentó el mayor puntaje, y Guaymaral y Tibanica que serían humedales más conservados, estuvieron entre los tres ambientes con menos puntaje y por tanto con peores condiciones limnológicas. Estas diferencias entre lo esperado y lo observado se pueden atribuir a las actividades de recuperación que se han llevado a cabo en Santa María del Lago y Jaboque, las cuales han tenido efectos positivos sobre la calidad del agua de estos ecosistemas. Otros humedales como Guaymaral y Tibanica continúan sufriendo un proceso muy acelerado de degradación, por lo cual se encuentran muy contaminados a pesar de estar alejados del centro de la ciudad.

En cuanto a la situación presentada en Meridor, su baja calificación puede atribuirse a sus concentraciones elevadas de cloruros y dureza, que como ya se mencionó, están en un rango muy por encima de la normal. Esto se refleja en los valores de polución calculados para las especies y por tanto en la calificación del IDHB que lo categorizan apenas como un humedal de condiciones limnológicas aceptables.

Cabe recordar que si bien parece que las variables relacionadas con la carga de nutrientes son las modeladoras de las comunidades de diatomeas en los humedales, el IDHB es un índice de calidad de aguas que da la misma importancia a todas las variables fisicoquímicas consideradas. Por lo tanto, cuando una variable cualquiera está muy alejada del valor permisible, el IDHB podría mostrar resultados de baja calidad. En consecuencia, la interpretación del IDHB estará afectada por los criterios de calidad utilizados. No será lo mismo basar la calificación en los requisitos para consumo humano que en los establecidos para uso agropecuario, por ejemplo.

El concepto de calidad del agua se ha fundamentado principalmente en la composición del agua debida a la concentración de múltiples sustancias químicas que determinan su potencialidad de uso o no uso para distintos fines. Según los usos, se han fijado criterios o concentraciones límites que permiten definir el grado de "bondad" de cualquier tipo de agua (Branco, 1984). Este trabajo se basó en la evaluación de calidad del agua a partir de la norma colombiana para consumo humano (Decreto 1594 de 1984), en función de la cual se evaluó la comunidad de diatomeas de cada uno de los humedales. Sin embargo, la relación existente entre la calidad del agua encontrada según el IDHB y algunos atributos de la comunidad, no necesariamente muestra condiciones que podrían considerarse desfavorables desde un punto

de vista de salud del ecosistema o para la comunidad de diatomeas. Esta situación queda comprobada en humedales como Guaymaral y Juan Amarillo que tuvieron el mayor número de especies en el estudio y presentaron en algunos periodos valores altos de diversidad, en comparación con humedales considerados como de mejores condiciones.

Del conjunto de diatomeas que conforman la comunidad perifítica de los humedales de Bogotá, se destacan algunas especies por sus valores de polución altos (VPT mayores a 4), como *Nitzschia sigmaidea*, *Cymbella minuta*, *Eunotia tridentula*, *Melosira varians*, *Nitzschia pusilla*, *Pinnularia gibba* y *Rhoicosphenia* sp. Al parecer estas especies están asociadas a cargas elevadas de materia orgánica y de nutrientes en el agua. Dichos taxones son muy cosmopolitas (Kelly *et al.*, 2005; Lane y Brown, 2007) y por lo general son altamente tolerantes a la eutroficación y a condiciones de elevada saprobiedad. Por el contrario, las especies que tuvieron los VPT más bajos (iguales o menores a 2.5, *Diadsmis* sp, *Cyclotella cf ocellata*, *Cymbella naviculiformis*, *Fragilaria cf leptostauron*, *Gomphonema cf augur* y *Gyrosigma cf nodiferum*) parecen ser sensibles a condiciones de contaminación muy fuerte y prefieren ambientes mesotróficos. Las asignaciones de sensibilidad y tolerancia a la contaminación para las especies mencionadas son muy similares a las halladas en otros trabajos sobre indicación con diatomeas, como los de Muscio (2002) y Kelly (2003). Esto demuestra que la metodología empleada en el presente estudio para asignar los VPT es adecuada y coherente.

Una de las críticas que se plantea para este tipo de evaluaciones multimétricas es que los límites de calificación de cada categoría establecida son más entidades matemáticas que situaciones ecológicas reales. Sin embargo, en este trabajo se halló una buena correspondencia entre las características medidas en campo y las valoraciones obtenidas con el IDHB. Tales correspondencias se reflejaron de cierta manera en las correlaciones entre el IDHB y las variables fisicoquímicas, según las cuales el índice se asocia estadísticamente a bajos valores de DBO y amonio y altos registros de oxígeno disuelto.

De todo lo anterior, es posible concluir que el IDHB presenta un buen desempeño como herramienta evaluadora de las condiciones limnológicas de los humedales bogotanos. No obstante, hay que tener en cuenta que una de las características de un buen bioindicador es que debe ser aplicable en áreas geográficas extensas y en el mayor número de ambientes ecológicos posible (Jorgensen *et al*, 2005). Por ello, el IDHB podría fortalecerse realizando más muestreos en los humedales trabajados, evaluando distintas zonas de los humedales o

incluyendo hábitats tentativamente diferentes, complementando con datos sobre otros humedales distritales y eventualmente contemplando datos de humedales de la sabana de Bogotá ajenos al Distrito Capital.

CONCLUSIONES

- El IDHB o índice de diatomeas para los humedales bogotanos, se presenta como la mejor opción para establecer la calidad del agua de estos ambientes, ya que permitió realizar una discriminación en varias categorías de los ecosistemas estudiados. En contraste, el índice sapróbico y el índice a nivel de género agruparon a los humedales en dos únicas categorías, por lo que no tuvieron un buen grado de segregación.
- Según el IDHB, los humedales estudiados van desde aquellos de condiciones limnológicas aceptables (Meridor y Santa María del Lago), hasta los de condiciones malas (Juan Amarillo), pasando por los de características regulares (Jaboque, Tibanica y Guaymaral). Solo en ciertos periodos (transiciones climáticas) Santa María del Lago alcanzó condiciones limnológicas óptimas.
- Los humedales evaluados son heterogéneos fisicoquímicamente y presentan distintos grados de eutrofización. Las diferencias se deben principalmente al tipo de agua que alimenta estos sistemas. Así, Santa María del Lago y Meridor se presentan como los humedales de mejor calidad de aguas al no ser receptores de aguas transportadores de altas cargas orgánicas, mientras que los humedales restantes muestran una dinámica dependiente de aguas con alta carga orgánica y de desechos, que los lleva a niveles de eutrofia críticos.
- Las medidas de diversidad, riqueza y composición de las comunidades de diatomeas perifíticas en los humedales evaluados no muestran un patrón claro de agrupamiento espacial ni temporal. Esto parece indicar que cada sistema tiene una dinámica particular cuyos variables determinantes no se midieron a la escala abordada en este estudio. Igualmente, dicha carencia de patrones definibles sería un reflejo de procesos estocásticos que parecen afectar a cada cuerpo de agua de manera diferente.
- Aunque se encontraron algunas especies con rangos de tolerancia estrechos, en términos generales las comunidades de diatomeas de los humedales bogotanos están compuestas por especies de amplio espectro, que toleran y aparentemente se ven favorecidas por altas concentraciones de nutrientes. Esta es la razón para que los humedales con peor calidad del agua presenten comunidades más diversas.

- La aproximación multimétrica permitió hacer una discriminación más confiable de la calidad del agua de los humedales estudiados, ya que considera un conjunto de parámetros fisicoquímicos. Por lo tanto, la mayoría de las variables fisicoquímicas valoradas se incluyeron en la construcción del IDHB, especialmente aquellas establecidas en la norma sobre calidad del agua para consumo humano. No obstante, los parámetros relacionados con la carga de nutrientes fueron las más determinantes en la diferenciación entre los humedales, mientras que otros como la temperatura y la transparencia no se consideraron por no estar en la norma de calidad.

RECOMENDACIONES

- Una de las características que se considera debe tener una buena herramienta de bioindicación es su aplicabilidad en extensas áreas geográficas y en el mayor número posible de ambientes ecológicos. Por lo tanto se recomienda la ampliación del índice propuesto en este trabajo mediante el estudio de los otros 13 humedales distritales. El uso del IDHB se debe limitar a la evaluación exclusivamente de los ecosistemas de humedal de la zona andina de Colombia y no de otro tipo de ambientes (ríos, embalses, lagos) ni de otras regiones del país.
- Una vez ampliada la base de datos con información autoecológica de las diferentes especies que componen las comunidades de diatomeas, podrá considerarse la inclusión en el IDHB de la abundancia de las especies involucradas.
- El IDHB muestra que los humedales de mejores condiciones son los que no tienen aportes de aguas residuales. Por lo tanto, una recomendación fundamental es la eliminación de tales aportes en todos los humedales distritales. Esta acción seguramente provocará un mejoramiento sustancial de las condiciones limnológicas de estos ecosistemas.
- El IDHB permitiría realizar monitoreos periódicos de los humedales para valorar las acciones de restauración que se implementen en estos ambientes. Se recomienda hacer estos monitoreos y emplear el IDHB por lo menos cada seis meses.
- A fin de esclarecer si hay patrones de organización de las comunidades de diatomeas perifíticas en los humedales bogotanos, se recomienda hacer muestreos más detallados en el tiempo, por lo menos con una frecuencia mensual. Estos muestreos deberían además abarcar más áreas de cada humedal de manera que se tenga una mejor representación espacial de la comunidad.

BIBLIOGRAFÍA

ALLEY, E. 2007. Water quality control handbook. Mc Graw Hill handbooks. WEF PRESS FOR THE Water quality professional.

ALMEIDA, S y GIL, C. 2001. Ecology of freshwater diatoms from the central region of Portugal. *Cryptogamie, Algol.*, 22(1): 109-126.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPF) (1995). Standard methods for examination of water and wastewater. 19th edition, Victor Graphics, Baltimore, USA.

ANDRADE, G .1998. Los humedales del altiplano de Cundinamarca y Boyacá. Ecosistemas en peligro de desaparecer. En: Una aproximación a los humedales de Colombia. Fondo FEN Colombia, Comité Colombiano de la UICN. Bogotá.

BELLINGER, B; COCQUYT, C y O'REILLY, C. 2006. Benthic diatoms as indicators of eutrophication in tropical streams. *Hydrobiologia* 573: 75-87.

BIGGS, B; STEVENSON, R y LOWE, R. 1998. A habitat matrix conceptual model for stream periphyton. *Arch. Hydrobiol* 143, 21 – 56.

BRANCO, S. 1984. Limnología sanitaria, estudio de la polución de aguas continentales. Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos. Programa regional de desarrollo científico y tecnológico. Washington, D.C.

CANTER, H Y LUND, J. 1995. Freshwater algae, Biopress Limited.

CASTELLANOS, L y DONATO, J. 2004. Disturbios naturales y sucesión de diatomeas en un río andino (Tota, Boyaca, Colombia). *Acta Biológica Colombiana*, Vol. 9 No2.

CHUKWUKA, K; UKA, U. 2007. Effect of water hyacinth infestation on the physico-chemical characteristics of AWBA reservoir, Ibadan, South-West, Nigeria. *J. Biol. Sci.*, 7: 282-287.

CRONK, J; FENNESSY, M 2001. *Wetland plants, biology and ecology*. Lewis Publishers.

DIAZ-QUIROS, C y RIVERA-RONDON, C. 2004. Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. *Caldasia* 26 (2): 381-394.

EAAB (empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá) y Conservación Internacional. *Humedales Bogotanos, síntesis del estado actual de los humedales*. Colección técnica del acueducto. Grafiq editores LTDA.

EEM (EVALUACION DE LOS ECOSISTEMAS DEL MILENIO) 2005. *Los Ecosistemas y el Bienestar Humano: Humedales y Agua*. Informe de Síntesis World Resources Institute, Washington, DC. Copyright © World Resources Institute.

FALKOWSKI, P. 2004. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science* 305: 354-364.

FORE, Y y GRAFE, C 2002. Using diatoms to assess the biological condition of large rivers in Idaho (U.S.A). *Freshwater Biology* 47, 2015-2037.

GARZON, G 2006. *Plan de Restauración y manejo ambiental para las Lagunas de Meridor*. Informe Final. Asociación propietarios de Meridor.

GRIFFITH, M; HILL, B; HERLIHY, A; KAUFMANN, P 2002. Multivariate analysis of periphyton assemblages in relation to environmental gradients in Colorado rocky mountain streams. *J. Phycol.* 38:83-95.

HERING, D; BÖHMER, J; HAASE, P; SHAUMBURG. 2004. New methods for assessing freshwaters in Germany. *Limnologica* 34, 281-282.

HILLEBRAND, H; SOMMER, U. 2000. Diversity of benthic microalgae in response to colonization time and eutrophication. *Aquatic Botany* 67, 221–236.

JIANG, J 2006. Development of a new biotic index to assess freshwater pollution. *Environmental Pollution* 139: 306-317.

JIANG, J; SHEN, Y 2003. Development of a biotic index using the correlation of protozoan communities with chemical water quality. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 37:777-792.

JORGENSEN, S; CONSTANZA, R; XU, F 2005. Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health. CRC Press.

KALFF, J. 2002. *Limnology*. Prentice Hall. Estados Unidos. p 247, 341.

KARR, J. 1999. Defining and measuring river health. *Freshwater Biology*. 41: 221-234.

KARTHICK, B y RAMACHANDRA, T. Diatoms: Stream monitoring and ecological studies. Energy and wetlands research group, Centre for Ecological Sciences.

KELLY M. 2003. Short term dynamics of diatoms in an upland stream and implications for monitoring eutrophication. *Environ Pollut*, 125(2): 117 - 122.

KOOISTRA, W; MEDLIN, L. 1996. Evolution of the diatoms (Bacillariophyta), a reconstruction of their age from small subunit rRNA coding regions and the fossil record. *Molecular phylogenetic Evolution*. 6, 391-407.

KRAMMER, K y LANGE-BERTALOT, H. 1986. *Sesswasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae, teil 1: Naviculaceae*. Gustav Fischer Verlag.

KRAMMER, K y LANGE-BERTALOT, H. 1991. *Sebwasserflora von Mitteleuropa. 3 teil: centricales, fragilariceae, eunotiaceae*. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart.

LANGE-BERTALOT, H 1995. *Iconographia diatomologica*, Volume. 1. Taxonomy. Koeltz Scientific Books.

LANGE-BERTALOT, H 1998. *Iconographia diatomologica*, Volume 5. Tropical diatoms of South America I. Koeltz Scientific Books.

LANGE-BERTALOT, H 2000. *Iconographia diatomologica*, Volume 9. Diatoms of the Andes. Koeltz Scientific Books. A.R.G Ganter Verlag K.G.

LANGE-BERTALOT, H 2007. *Iconographia diatomologica*, Volume 18. Tropical diatoms of South America II. Koeltz Scientific Books. A.R.G Ganter Verlag K.G.

LANGE-BERTALOT, H. 1995. *Iconographia diatomologica*, annotated diatoms micrographs. Vol. 1. Taxonomy. Koeltz Scientific Books.

LOBO, E; CALLEGARO, V y BENDER, E. 2002. Utilização de algas diatomáceas epilíticas como indicadores da qualidade da água em rios e arroios da região hidrográfica do Guaíba, RS, Brasil. EDUSINC. Santa Cruz do Sul.

MARCUS, M. (1980). Periphytic community response to chronic nutrient enrichment by a reservoir discharge. *Ecology*, 61 (2) 387 – 399.

MARGALEF, R. 1967. Las algas inferiores. en: *Ecología Marina*. Fundación la Salle de Ciencias Naturales. Caracas. pp: 230-272.

MARTINEZ, L y DONATO, J. 2003. Efectos del caudal sobre la colonización de algas en un río de alta montaña tropical (Boyacá-Colombia). *Caldasia*; 25(1):337-354.

MAUSETH, J. 1995. *Botany, an introduction to plant biology*. Capítulo 21. Algae and the origin of eukaryotic cells. Class Bacillariophyceae, diatoms.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2002. Manejo de humedales, memorias de curso de entrenamiento. República de Colombia, Ministerio del medio ambiente, Ramsar. Bogotá.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE-INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT. 1999. Humedales Interiores de Colombia: Bases Técnicas para su Conservación y Uso Sostenible.

MITSCH, W (1994) Global wetlands: old world and new. Elsevier. Amsterdam.

MOORE, P (2006). Wetlands, biomes of the earth. Chelsea House Publishers.

MUSCIO, C (2002). The Diatom Pollution Tolerance Index: Assigning Tolerance Values. City of Austin - Watershed Protection & Development Review Department.

ODUM, E. 1972. Ecología. Interamericana. México. 639 p.

ODUM, E. 1975. Diversity as a function of energy flow, en: Unifying concepts in ecology. Junk Publishers.

PONADER, K; POTAPOVA, M. 2007. Diatoms from the genus *Achnantheidium* in flowing waters of the Appalachian Mountains (North America): Ecology, distribution and taxonomic notes. Limnologica, doi:10.1016/j.limno.

POTAPOVA, M y CHARLES, D. 2007. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States. Ecological Indicators 7, 48 – 70.

PRYGIEL, J y COSTE, M (Coord). 2000. Guide methodologique pour la mise en ceuvre de l'Indice Biologique Diatomées. Norme AFNOR. NF T 90-354. Europe, France.

RAMIREZ, A y PLATA – DIAZ, J. 2008. Diatomeas perifíticas en diferentes tramos de dos sistemas loticos de alta montaña (Paramo de Santurbán, Norte de Santander, Colombia) y su relación con las variables ambientales. Acta Biológica Colombiana, vol 13 No 1, 199-216.

ROLDAN, G y RAMIREZ, J. (2008) Fundamentos de Limnología Neotropical. Segunda edición. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín.

ROLDAN, G. 1992. Fundamentos de Limnología Neotropical. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín.

ROUND, F; CRAWFORD, R. 1990. The Diatoms, biology and morphology of the genera, Cambridge University Press.

SCHUELER, T (1987), Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs, Met Council of Govern, Washington, D.C.

SLÁDEČEK, V. 1979. Continental Systems for the Assessment of river Eater Quality. Chapter 3 in: BILOGICAS Indicators of Water Quality. Edited by James, A and Evinson, L. John Wiley & Sons.

STEVENSON, R; BOTHWELL, M y LOWE.R. 1996. Algal Ecology. Academic press. Elsevier. USA.

TONT, S. 1976. Short period climatic fluctuations on diatom biomass. Science, New series, Vol.194, No 4268. 942-944.

TORO, J; SCHUSTER, J; KUROSAWA, J; ARAYA, E y CONTRERAS, M. 2003. Diagnostico de la calidad del agua en sistemas lóticos utilizando diatomeas y macroinvertebrados bénticos como bioindicadores Río Maipo (Santiago de Chile). Memorias XVI Congreso Chileno en Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. 1-11.

UICN. 2002. Conservación de humedales. Un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias. Patrick J Dugan, coordinador del programa de humedales (Editor). p 17.

VAN DER HAMMEN, T; STILES, G; ROSSELLI, L; CHISACÁ, M; CAMARGO, G, GUILLOT, G; USECHE, Y RIVERA, D (Editores). 2008. Protocolo de restauración y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos. Dirección de planeación y gestión ambiental , oficina de ecosistemas estratégicos y biodiversidad. Secretaria Distrital de Ambiente (SDA)

VASCONCELOS, V. 2006. Eutrophication, toxic cyanobacteria and cyanotoxins: when ecosystems cry for help. Limnetica, 25 (1-2): 425-432

VAZQUEZ, G; CASTRO, G; GONZALEZ, I; PEREZ, R y CASTRO, T. 2006. Bioindicadores como herramientas para determinar la calidad del agua. *ContactoS* 60, 41 – 48.

VIS, C; HUDON, C; CATTANCO A, PINEL-ALLOUL, B. 1998. Periphyton as an indicator of water quality in the St Lawrence River (Québec, Canada). *Environmental pollution* 101, 13-24

WETZEL, R y LIKENS, G.1991. *Limnological Analyses*, second edition, Springer – Verlag, New York.

WINTER, J y DUTHIE, H. 2000. Stream epilithic, epipellic and epiphytic diatoms: habitat fidelity and use in biomonitoring. *Aquatic ecology* 34: 345-353.

ANEXOS

Anexo 1.

Nombres de las especies relacionadas en el Análisis de Correspondencia Canónica (Figura 3)

sp 1	<i>Cyclotella meduanae</i>	sp 54	<i>Achnanthes lanceolata</i>	sp 107	<i>Eolimna cf tantula</i>
sp 2	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	sp 55	<i>Achnanthes sp 1</i>	sp 108	<i>Eolimna sp</i>
sp 3	<i>Cyclotella stelligera</i>	sp 56	<i>Achnanthes sp 2</i>	sp 109	<i>Eolimna sp 1</i>
sp 4	<i>Cyclotella cfoellata</i>	sp 57	<i>Achnanthes sp 3</i>	sp 110	<i>Eolimna sp 2</i>
sp 5	<i>Cyclotella sp</i>	sp 58	<i>Cocconeis placentula</i>	sp 111	<i>Eolima sp 3</i>
sp 6	<i>cf Melosira</i>	sp 59	<i>Cocconeis placentula cf var euglypta</i>	sp 112	<i>cf Eolimna</i>
sp 7	<i>Aulacoseira granulata</i>	sp 60	<i>Achnantheidium minutissima</i>	sp 113	<i>cf Eolimna 3</i>
sp 8	<i>Aulacoseira sp</i>	sp 61	<i>cf Diademsis</i>	sp 114	<i>Gyrosima cf nodiferum</i>
sp 9	<i>Fragilaria acus</i>	sp 62	<i>Frustulia rhomboides</i>	sp 115	<i>Stauroneis</i>
sp 10	<i>Fragilaria leptostauron</i>	sp 63	<i>Frustulia saxonica</i>	sp 116	<i>Craticula ambigua</i>
sp 11	<i>Fragilaria pinnata</i>	sp 64	<i>Sellaphora pupula</i>	sp 117	<i>Amphora coffeaeformis</i>
sp 12	<i>Fragilaria ulna</i>	sp 65	<i>Sellaphora aff rectangularis</i>	sp 118	<i>Amphora cf montana</i>
sp 13	<i>Fragilaria cf pinnata</i>	sp 66	<i>Sellaphora sp</i>	sp 119	<i>cf Bacillaria</i>
sp 14	<i>Fragillaria cf leptostauron</i>	sp 67	<i>Pinnularia brebissonii</i>	sp 120	<i>Hantzchia abundans</i>
sp 15	<i>Fragilaria sp 1</i>	sp 68	<i>Pinnularia gibba</i>	sp 121	<i>Nitzschia amphibia</i>
sp 16	<i>Fragilaria sp 3</i>	sp 69	<i>Pinnularia maior</i>	sp 122	<i>Nitzschia capitellata</i>
sp 17	<i>Fragillaria sp 4</i>	sp 70	<i>Pinnularia microstauron</i>	sp 123	<i>Nitzschia inconspicua</i>
sp 18	<i>Fragilaria sp 5</i>	sp 71	<i>Pinnularia viridiformis</i>	sp 124	<i>Nitzschia pusilla</i>
sp 19	<i>Fragillaria sp 6</i>	sp 72	<i>Pinnularia cf lundii</i>	sp 125	<i>Nitzschia reversa</i>
sp 20	<i>Staurosira mercedes</i>	sp 73	<i>Pinnularia cf subcapitata</i>	sp 126	<i>Nitzschia sp 1</i>
sp 21	<i>Tabellaria</i>	sp 74	<i>Pinnularia sp</i>	sp 127	<i>Nitzschia sp 2</i>
sp 22	<i>Eunotia bilunaris</i>	sp 75	<i>Pinnularia sp 1</i>	sp 128	<i>Nitzschia sp 3</i>
sp 23	<i>Eunotia tridentula</i>	sp 76	<i>Pinnularia sp 2</i>	sp 129	<i>Nitzschia sp 4</i>
sp 24	<i>cf Eunotia subarcuatooides</i>	sp 77	<i>Pinnularia sp 3 cf brebissonii</i>	sp 130	<i>Nitzschia sp 5</i>
sp 25	<i>Eunotia sp 1</i>	sp 78	<i>Pinnularia sp 4</i>	sp 131	<i>Nitzschia sp 6</i>
sp 26	<i>Rhoicosphenia sp</i>	sp 79	<i>Pinnularia sp 5</i>	sp 132	<i>Nitzschia sp 7</i>
sp 27	<i>Anomoeoneis cf sculpta</i>	sp 80	<i>Caloneis sp</i>	sp 133	<i>Nitzschia sp 8</i>
sp 28	<i>Cymbella minuta</i>	sp 81	<i>Navicula lanceolata</i>	sp 134	<i>Nitzschia sp 9</i>
sp 29	<i>Cymbella naviculiformis</i>	sp 82	<i>Navicula recens</i>	sp 135	<i>Nitzschia sp 10</i>
sp 30	<i>Cymbella tumida</i>	sp 83	<i>Navicula cf arvensis</i>	sp 136	<i>Nitzschia sp 11</i>
sp 31	<i>Cymbella cf gracilis</i>	sp 84	<i>Navicula cf leptostriata</i>	sp 137	<i>Nitzschia sp 12</i>
sp 32	<i>Encyonema cf silesiacum</i>	sp 85	<i>Navicula sp 1</i>	sp 138	<i>Nitzschia sp 13</i>
sp 33	<i>Gomphonema acuminatum</i>	sp 86	<i>Navicula sp 2</i>	sp 139	<i>Nitzschia sp 14</i>
sp 34	<i>Gomphonema angustatum</i>	sp 87	<i>Navicula sp 3</i>	sp 140	<i>Nitzschia sp 15</i>
sp 35	<i>Gomphonema angustum</i>	sp 88	<i>Navicula sp 4</i>	sp 141	<i>Nitzschia sp 18</i>
sp 36	<i>Gomphonema affine</i>	sp 89	<i>Navicula sp 5</i>	sp 142	<i>Nitzschia sp 16</i>
sp 37	<i>Gomphonema gracile</i>	sp 90	<i>Navicula sp 6</i>	sp 143	<i>Nitzschia sp 17</i>
sp 38	<i>Gomphonema parvulum</i>	sp 91	<i>Navicula sp 7</i>	sp 144	<i>Nitzschia cf sinuata var de lognei</i>
sp 39	<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	sp 92	<i>Navicula sp 8</i>	sp 145	<i>Nitzschia sigmoidea</i>
sp 40	<i>Gomphonema punae</i>	sp 93	<i>Navicula sp 9</i>	sp 146	<i>Ephitemia adnata</i>

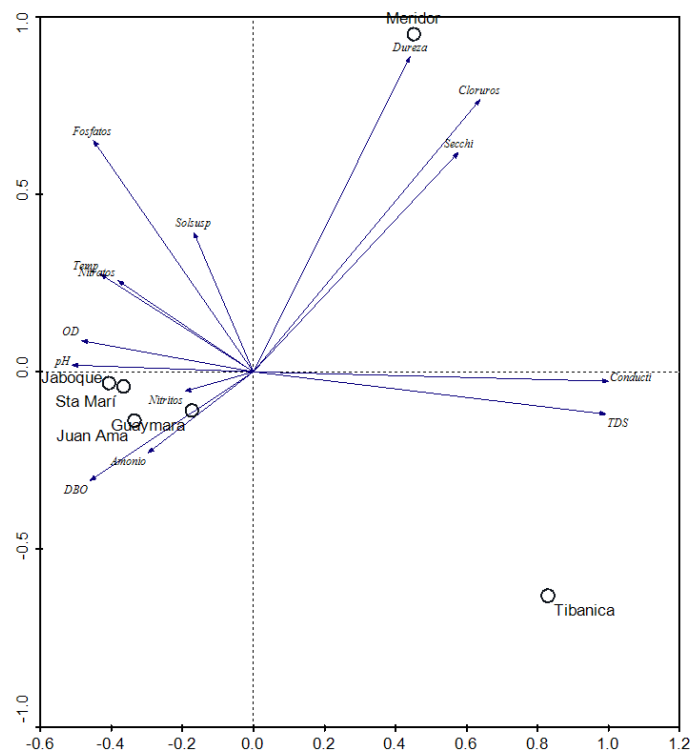
sp 41	<i>Gomphonema truncatum</i>	sp 94	<i>Navicula sp 10</i>	sp 147	<i>Ephitemia cf adnata</i>
sp 42	<i>Gomphonema cf augur</i>	sp 95	<i>Navicula sp 11</i>	sp 148	<i>Epithemia cf sores</i>
sp 43	<i>Gomphonema cf clavatum</i>	sp 96	<i>Navicula sp 12</i>	sp 149	<i>Rhopalodia gibba</i>
sp 44	<i>Gomphonema cf olivaceum</i>	sp 97	<i>Navicula sp 13</i>	sp 150	<i>Surirella</i>
sp 45	<i>Gomphonema 2</i>	sp 98	<i>Navicula sp 14</i>	sp 151	<i>Surirella cf brebissonii</i>
sp 46	<i>Gomphonema 3</i>	sp 99	<i>Navicula sp 15</i>	sp 152	<i>surirella sp 2</i>
sp 47	<i>Gomphonema 4</i>	sp 100	<i>Navicula sp 16</i>	sp 153	<i>cf kobayasiella</i>
sp 48	<i>Gomphonema 5</i>	sp 101	<i>Navicula sp 17</i>	sp 154	<i>sp 1</i>
sp 49	<i>Gomphonema 6</i>	sp 102	<i>Navicula sp 18</i>	sp 155	<i>sp 2</i>
sp 50	<i>Gomphonema 7</i>	sp 103	<i>Navicula sp 19</i>	sp 156	<i>sp 5</i>
sp 51	<i>Gomphonema 8</i>	sp 104	<i>Navicula sp 20</i>	sp 157	<i>sp 6</i>
sp 52	<i>Achnanthes exigua</i>	sp 105	<i>Navicula sp 21</i>	sp 158	<i>sp 7</i>
sp 53	<i>Achnanthes hungarica</i>	sp 106	<i>Eolimna cf subminuscula</i>	sp 159	<i>sp 3</i>

Anexo 2. Resultados de los análisis de componentes principales

Periodo 1

Ejes	1	2	3	4
Eigenvalues	0.932	0.065	0.003	0.001
Variación acumulada	93.2	99.7	99.9	100.0

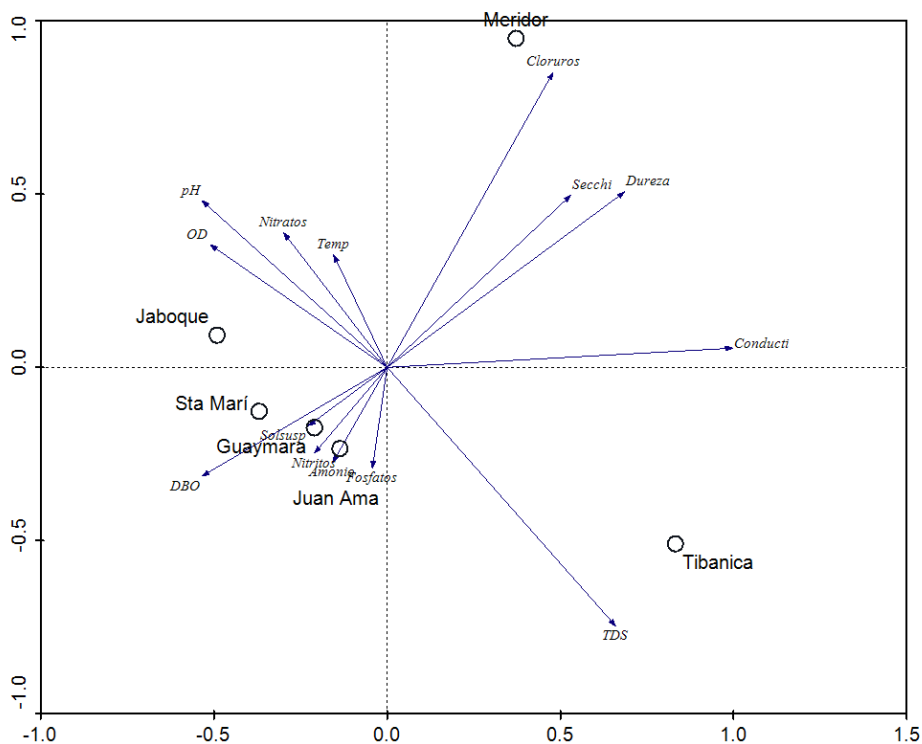
	Componentes			
	1	2	3	4
Temperatura	0,32	0,24	-0,25	-0,14
TDS	-0,34	-0,004	-0,13	-0,34
Conductividad	-0,35	0,03	-0,14	-0,32
Oxígeno disuelto	0,22	0,3	0,31	0,11
pH	0,36	0,17	-0,06	-0,29
Cloruros	-0,25	0,33	-0,27	-0,07
Dureza	-0,23	0,34	-0,19	0,07
Transparencia	-0,18	0,33	-0,38	0,07
Sólidos suspendidos	0,06	0,29	0,35	-0,34
Nitratos	0,25	0,37	0,09	-0,08
Nitritos	0,34	-0,06	-0,24	-0,33
Amonio	0,22	-0,24	-0,34	-0,32
Fosfatos	0,17	0,29	-0,27	0,47
DBO	0,21	-0,29	-0,36	0,24



Periodo 2.

Ejes	1	2	3	4
Eigenvalues	0.953	0.039	0.007	0.000
Variación acumulada	95.3	99.3	100.0	100.0

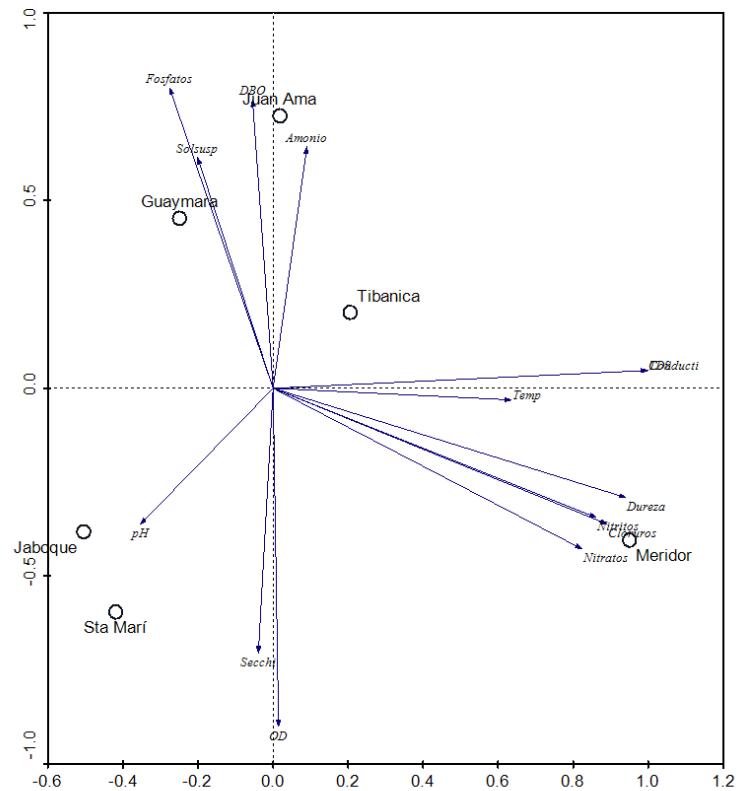
	Componentes			
	1	2	3	4
Temperatura	0,28	0,28	0,19	0,31
TDS	-0,06	-0,36	-0,11	0,37
Conductividad	0,17	-0,37	0,18	-0,01
Oxigeno disuelto	0,1	0,44	-0,04	-0,11
pH	0,11	0,45	0,046	-0,13
Cloruros	0,21	-0,12	0,28	-0,53
Dureza	0,16	-0,33	0,11	-0,46
Transparencia	0,35	-0,09	0,34	0,1
Sólidos suspendidos	-0,09	-0,04	-0,53	-0,37
Nitratos	-0,15	0,28	0,41	-0,19
Nitritos	-0,38	-0,03	0,28	0,04
Amonio	-0,4	-0,05	0,25	-0,005
Fosfatos	-0,38	-0,07	0,29	0,02
DBO	-0,41	0,11	-0,09	-0,17



Periodo 3.

Ejes	1	2	3	4
Eigenvalues	0.947	0.032	0.018	0.003
Variación acumulada	94.7	97.9	99.7	100.0

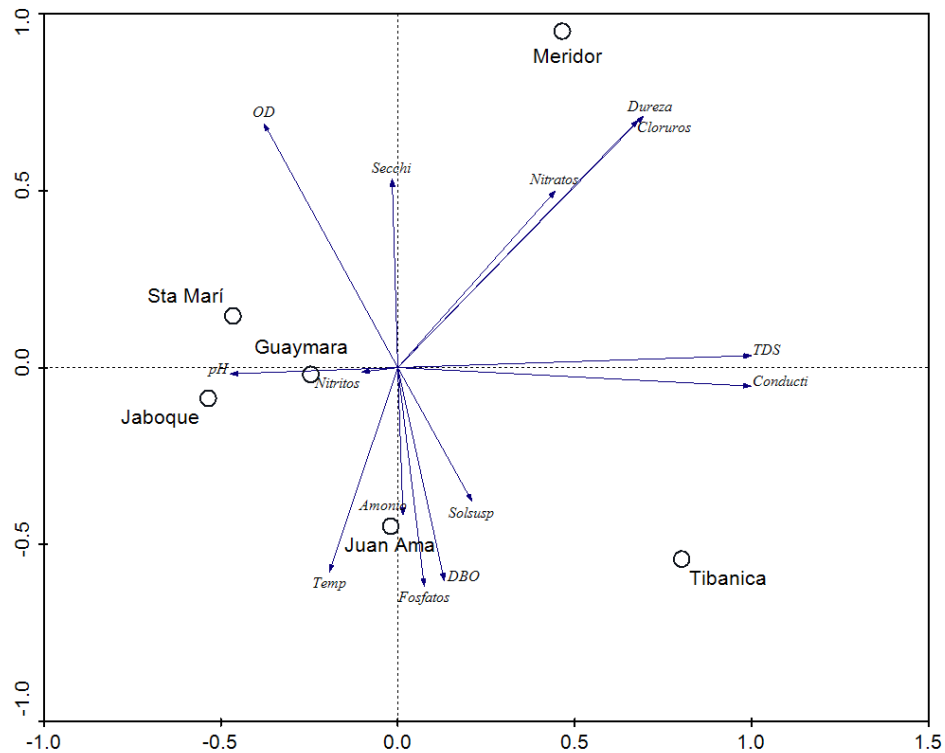
	Componentes			
	1	2	3	4
Temperatura	0,26	-0,01	0,45	0,26
TDS	0,32	-0,26	0,07	-0,05
Conductividad	0,32	-0,26	0,07	-0,05
Oxígeno disuelto	0,19	0,36	-0,28	0,21
pH	-0,04	0,2	-0,51	0,43
Cloruros	0,35	-0,13	-0,18	-0,09
Dureza	0,36	-0,15	-0,06	-0,08
Transparencia	0,13	0,38	0,27	-0,34
Sólidos suspendidos	-0,22	-0,35	-0,31	-0,08
Nitratos	0,35	-0,09	-0,25	0,006
Nitritos	0,35	-0,14	-0,19	0,034
Amonio	-0,03	-0,2	0,33	0,69
Fosfatos	-0,27	-0,34	-0,0002	-0,22
DBO	-0,16	-0,47	-0,05	0,09



Periodo 4.

Ejes	1	2	3	4
Eigenvalues	0.965	0.027	0.006	0.001
Variación acumulada	96.4	99.3	99.9	100.0

	Componentes			
	1	2	3	4
Temperatura	0,18	0,21	0,45	0,22
TDS	-0,005	-0,43	0,1	0,3
Conductividad	0,019	-0,42	0,09	0,35
Oxigeno disuelto	-0,32	0,14	0,27	-0,36
pH	-0,14	0,3	0,22	-0,21
Cloruros	-0,17	-0,41	0,12	-0,25
Dureza	-0,21	-0,41	0,002	-0,13
Transparencia	-0,34	0,01	0,064	0,3
Sólidos suspendidos	0,35	-0,17	-0,27	-0,15
Nitratos	-0,006	-0,3	0,32	-0,49
Nitritos	0,16	0,005	-0,52	-0,3
Amonio	0,35	-0,014	0,32	-0,11
Fosfatos	0,42	-0,026	0,19	-0,04
DBO	0,42	-0,058	0,16	-0,01



Anexo 3. Valores de las distintas variables fisicoquímicas medidas durante el estudio.

Tabla 1. Valores de las distintas variables fisicoquímicas medidas durante el primer periodo del estudio (Noviembre de 2007).

	Guaymaral	Jaboque	Santa María	Juan Amarillo	Meridor	Tibanica
Temperatura del agua (°C)	16,5	20,8	17,9	20,3	18,95	17,1
TDS (mg/L)	200	81,00	106	127	438,5	709
Conductividad (µs)	352	153,2	186,9	214	855,5	1210
Oxígeno Disuelto (mg/L)	2,65	14,40	4,2	0,15	2,4	0,2
pH	6,8	8,00	6,8	7,71	7	6,8
Cloro libre y total (mg/L)	<0,1	<0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1
Cloruros (mg/L Cl ⁻)	26,5	22	19	20	368	108
Dureza (mg/L CaCO ₃)	114	80	100,7	69	295	91
Transparencia Secchi (cm)	0	91	102	62	226	126
Sólidos suspendidos (mg/L)	0,047	0,047	0	0,0206	0,042	0,0091
Nitratos (mg/L NO ₃)	0,01	0,1	0,02	0,03	0,04	0,01
Nitritos (mg/L NO ₂)	0,002	0,006	0,003	0,024	0,002	0,003
Amonio (mg/L NH ₃)	0,95	0,7	0,4	10	0,01	1,2
Fosfatos (mg/L fosforo)	0,25	1,4	1,6	1,1	1,55	0,12
DBO	13	24	70	84	11	29

Tabla 2. Valores de las distintas variables fisicoquímicas medidas durante el segundo periodo del estudio (Febrero – Marzo de 2008).

	Guaymaral	Jaboque	Santa María	Juan Amarillo	Meridor	Tibanica
Temperatura del agua (°C)	15,7	22,5	21,3	16,5	20,1	19,1
TDS (mg/L)	375	117,80	274,5	408	117,8	819
Conductividad (µs)	485	168,8	294	585	1339	1840
Oxígeno Disuelto (mg/L)	3,19	8,57	1,94	1,3	3,5	1,05
pH	7,3	8,82	7,3	7,06	7,74	6,8
Cloro libre y total (mg/L)	0	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,2
Cloruros (mg/L Cl ⁻)	70	16	21	50	369	74
Dureza (mg/L CaCO ₃)	176	62	120	136	262	179
Transparencia Secchi (cm)	0	73	128	29	180	135
Sólidos suspendidos (mg/L)	0,7967	0,0456	0,0025	0,0524	0,0197	0,0113
Nitratos (mg/L NO ₃)	0	0,3	0	0,3	0,2	0
Nitritos (mg/L NO ₂)	0	0,3	1	7	0	0
Amonio (mg/L NH ₃)	1	0,6	0,7	14	0	0,6
Fosfatos (mg/L fosforo)	0,3	0,5	0	9,9	0,2	1,4
DBO	20	16	10	25	8	8

Tabla 3. Valores de las distintas variables fisicoquímicas medidas durante el tercer periodo del estudio (Mayo de 2008).

	Guaymaral	Jaboque	Santa María	Juan Amarillo	Meridor	Tibanica
Temperatura del agua (°C)	17	17,4	18,7	19,3	19,3	18,7
TDS (mg/L)	280	117,8	168	447	938	550
Conductividad (µs)	395	173,9	241	648	1351	804
Oxígeno Disuelto (mg/L)	1,23	7,94	6,88	2,43	7,21	2,04
pH	7,43	9,33	7,28	7,42	7,63	7,04
Cloro libre y total (mg/L)	0	<0.1	<0.1	<0.1	0,3	0,1
Cloruros (mg/L Cl ⁻)	39	19	25	10	440	61
Dureza (mg/L CaCO ₃)	84	54	100	105	394	137
Transparencia Secchi (cm)	0	30,5	135	8,33	54,8	71
Sólidos suspendidos (mg/ml)	0,08751	0,03932	0,0011	0,038	0,0218	0,02485
Nitratos (mg/L NO ₃)	0,04	0,18	0,03	n.d	1,33	0,03
Nitritos (mg/L NO ₂)	0,004	0,006	0,002	0,008	0,103	0,001
Amonio (mg/L NH ₃)	0,36	1,39	0,48	33,84	3,4	1,62
Fosfatos (mg/L fosforo)	1,45	0,34	0,21	0,77	0,1	0,71
DBO	198	19	7	147	48	9

Tabla 4. Valores de las distintas variables fisicoquímicas medidas durante el cuarto periodo del estudio (Agosto de 2008).

	Guaymaral	Jaboque	Santa María	Juan Amarillo	Meridor	Tibanica
Temperatura del agua (°C)	16,4	20,2	19,3	22,2	17,1	19
TDS (mg/L)	320	119,1	166	482	861	1063
Conductividad (µs)	463	170,5	241	709	1128	1553
Oxígeno Disuelto (mg/L)	3,74	8,22	7,28	5,1	8,36	3,31
pH	6,83	8,98	7,24	7,16	7,21	7,06
Cloro libre y total (mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0,1	<0.1
Cloruros (mg/L Cl ⁻)	50	20	12	48	250	92
Dureza (mg/L CaCO ₃)	145	64	105	80	375	200
Transparencia Secchi (cm)		35	159	12	105	52
Sólidos suspendidos (mg/L)	0,1462	0,0067	0	0,0997	0,0316	0,07349
Nitratos (mg/L NO ₃)	2,3	2,4	1,9	2,9	3,4	2,3
Nitritos (mg/L NO ₂)	0,029	0,004	0,007	0,006	0,004	0,004
Amonio (mg/L NH ₃)	0,98	0,47	0,29	6,5	0,65	0,69
Fosfatos (mg/L fosforo)	0,56	0,22	0,01	1,5	0,05	0,47
DBO	34	21	19	59	20	32

