



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**POSGRADO EN CIENCIAS  
BIOLÓGICAS**

**Instituto de Ecología**

**“Calidad del agua como elemento integrador  
para la rehabilitación del río Magdalena,  
Distrito Federal”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS  
(BIOLOGIA AMBIENTAL)**

**P R E S E N T A**

**Yani Laura Monges Morán**

**Directora de tesis: Dra. Marisa Mazari Hiriart**

México, D. F

Marzo, 2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimientos**

- Al posgrado de Ciencias Biológicas de la UNAM, por abrirme sus puertas en esta gran universidad y darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado, así como por el apoyo económico y facilidades otorgadas sin las cuales no hubiera sido posible el alcance de esta meta.
- Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada y otros apoyos durante mis estudios de Maestría, sin los cuales no hubiera sido posible la realización de este proyecto,
- Al Comité tutorial por brindar incondicionalmente sus conocimientos, por su apoyo y colaboración durante todo el desarrollo del tema para que este llegara a su culminación con los resultados esperados.

Agradezco a la UNAM por ser para mi no solo una de las mejores universidades del mundo sino la mejor, por sus valores académicos, éticos y por ser laica y gratuita, gracias por abrirme tus puertas nuevamente, por sembrarme la esperanza en mi búsqueda por el crecimiento, el aprendizaje y aportar una semilla en este mundo de adversidades y guerras.

Agradezco al programa de posgrado de la Maestría en Restauración Ecológica, por el apoyo económico para: la compra de materiales de laboratorio, viáticos, así como para salidas a campo y material didáctico.

Al macroproyecto: “Manejo de ecosistemas y desarrollo humano en la cuenca del río Magdalena, D.F.”, por el apoyo económico otorgado para la compra de materiales y reactivos de laboratorio.

A la Dra. Marisa Mazari por su invitación al proyecto río Magdalena y brindarme su apoyo incondicional a lo largo del desarrollo de este, empleando sus conocimientos, experiencia y profesionalidad en cada problema a enfrentar.

Al Dr. Enrique Cantoral por su gran apoyo académico durante todo el desarrollo de este trabajo, gracias por tu amistad, por orientarme y tu disposición en cualquier momento, así como por enseñarme nuevos caminos.

Al Dr. Luis Zambrano por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo, por ayudarme aterrizar las ideas sobre el análisis estadístico. Gracias por tus comentarios.

Al Dr. Carlos Díaz por su gran apoyo y asesoría con el análisis de los datos, por tus valiosas aportaciones sin las cuales no hubiera llegado a su fin este trabajo. Gracias por tu paciencia y tu gran sentido del humor que me hicieron aplicar la estadística no solo a este trabajo sino a la vida misma. Gracias por tu disposición en todo momento.

Al Dr. Javier Álvarez por la revisión exhaustiva de este trabajo, así como por sus aportaciones a este trabajo.

A la Unidad de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencias, UNAM, bajo la dirección de la Dra. Ruth Cecilia Vanegas, por el préstamo de sus instalaciones y el equipo, así como al gran apoyo del M. en C. Manuel Hernández por su gran apoyo en laboratorio y asesoría para la determinación de sólidos, gracias por tu amistad y tu orientación siempre con la mejor disposición.

Al Laboratorio de Inmunología Molecular Microbiana de la Facultad de Medicina, UNAM, bajo la dirección de la Dra. Yolanda López Vidal por las determinaciones microbiológicas a nivel género y especie.

Al Dr. Javier Carmona por el préstamo del equipo de laboratorio para medir la velocidad de corriente, por su amistad, su amabilidad y disponibilidad en cualquier momento.

Al Dr. Antonio Ordóñez por su apoyo en trabajo de campo, y por ser mi guía y un gran amigo. Gracias por todo tu apoyo, por orientarme en momentos de crisis, por darme esperanza y ganas de seguir adelante, por enseñarme a luchar ante las adversidades. Muchas gracias Toño.

A la M. en C. Miriam Bojorge García, por tu incondicional apoyo en el proyecto gracias por tu amistad y tu orientación en la estadística suerte en tu próximos grados de doctora y madre.

A la M. en C. Verónica Aguilar, por tu amistad y tu incondicional apoyo en el desarrollo cartográfico de este estudio.

A la M. en C. y técnica académica Irma Acosta, por tu amistad y gran apoyo en campo y laboratorio así como en momentos difíciles, gracias por llegar en el momento justo cuando más te necesitaba. Gracias por tu cariño, amistad y compañía en mis dos tesis.

A Geo y Luzma por su gran paciencia y apoyo incondicional durante toda la maestría. Por su eficiencia, puntualidad, amistad y buen ánimo en todo momento. Gracias

A mis amig@s: Dulce, Elvia, Andres, Genghis, Jaime, Irais. Los cuales aunque han seguido caminos diferentes, siguen cimentando cada paso de mi vida y siempre los llevo conmigo.

A mi generación y compañer@s de la maestría por compartir experiencias inolvidables: Mary, Caro, Wolke, Sonia, Diego, Miriam.

A mi familia: Mamá, Papá, Elias, Héctor, Lalo, Elena, Silvia, Tere, Miguel, Adrian y Beti por ser mis ejemplos a lo largo de mi vida y darme la oportunidad de crecer a su lado y adquirir conocimientos en base a sus experiencias de vida, así como por seguir

apoyándome en estos tiempos difíciles. A mis sobrinos Andres, Helena, Alex, Emiliano y Daniela por ser una esperanza para este mundo.

A ti Marco por tu apoyo en campo y laboratorio sin el cual no hubiera sido posible la realización de este trabajo, gracias por estar siempre a mi lado, por tu gran apoyo en momentos de crisis, por tu paciencia y fe en mi, pero sobre todo por tu amor. Gracias y recuerda que tu también puedes y ahora te toca a ti.

**Cuando el río crece es porque desde hace tiempo se han estado acumulando en las montañas los torrentes...**

**Y cuando los ríos se desbordan, los ríos ya no tienen regreso...**

**(más que bajo Tierra)**

## INDICE

Agradecimientos	<i>i</i>	
Resumen	<i>ii</i>	
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>	
1.1 Importancia de la subcuenca del río Magdalena	1	
1.2 Degradación del río Magdalena		3
1.3 Calidad del agua	4	
1.3.1 Físicoquímicos como indicadores	5	
1.3.2 Microorganismos como indicadores	6	
1.4. Estudios sobre calidad del agua en el río Magdalena	9	
1.5 Rehabilitación	10	
<b>2. Objetivos</b>	<b>12</b>	
2.1 Objetivo general	12	
2.2 Objetivos particulares	12	
<b>3. Área de estudio</b>	<b>13</b>	
<b>4. Método</b>	<b>16</b>	
4.1 Diseño Experimental	16	
4.2 Análisis de parámetros físicoquímicos	18	
4.3 Análisis de parámetros bacteriológicos	19	
4.4 Análisis estadístico	20	
<b>5. Resultados</b>	<b>22</b>	
5.1 Parámetros físicoquímicos	22	
5. 2 Parámetros bacteriológicos	28	
5.2.1 Identificación de bacterias	31	
<b>6. Discusión</b>	<b>35</b>	
6.1 Parámetros físicoquímicos	36	
6.1.1 Eutroficación	43	
6. 2 Parámetros bacteriológicos	45	
6.2.1 Identificación de bacterias	48	
<b>7. Conclusiones</b>	<b>52</b>	
<b>8. Recomendaciones para rehabilitación</b>	<b>54</b>	
Referencias	58	
Apéndice	67	
Anexos	69	
Anexo I. Fórmula para calcular la descarga del río		
Anexo II. Tabla de posible origen de contaminación de CF/EF		

## **RESUMEN**

La subcuenca del río Magdalena forma parte de la cuenca de México, a través de ella fluye uno de los ríos más importantes de la ciudad de México, ya que aún aporta aproximadamente 0.28% del agua que se consume en la ciudad de México. Este proyecto de investigación se enfocó en la evaluación de la calidad del agua del río Magdalena con el fin de conocer el grado de degradación y con base en esto proponer acciones concretas de rehabilitación tomando en cuenta las necesidades locales. Se realizaron tres muestreos cubriendo el ciclo anual 2007: época de secas-fría, época de lluvias y época de secas-templada, en seis sitios representativos del río (S1, S2, S3, S4, S5 y S6). Se determinaron parámetros físicos, químicos y bacteriológicos.

Los resultados muestran que el río Magdalena presenta buena calidad del agua en la zona alta, apta para la conservación de la vida acuática de acuerdo con la NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1997). Sin embargo, se observa que existe una degradación gradual de la calidad del agua del río Magdalena, conforme éste entra en contacto con actividades humanas (S4 y S5), pero sobre todo en la zona urbana (S6). En general se puede observar que los resultados, muestran el mismo patrón de todas las variables, resumiéndose en dos tendencias: mayores valores en la época seca, e incremento en los valores de todos los parámetros, en la zona baja del río como resultado del efecto de las actividades humanas.

Específicamente, los mayores valores de fósforo total (1.04 mg/L), nitrógeno total (3.8 mg/L), amonio (0.7 mg/L), nitratos (0.08 mg/L), de coliformes fecales (65,8546 UFC) y enterococos fecales (41,298 UFC), se encontraron en la zona baja correspondientes a los tres últimos sitios de la parte baja del río Magdalena (S4, S5 y S6), sobrepasando los límites establecidos de protección para la vida acuática (CNA, 2005; DOF, 2007). De manera global, los resultados indican una fuerte contaminación en la zona baja del río, por lo que se puede decir que no son seguras en esta zona las actividades recreativas y menos el consumo humano, debido al posible riesgo para la salud de la población local y los visitantes. Esto se debe principalmente a la descarga de aguas residuales domésticas en esta zona sin previo tratamiento. Por lo anterior, se plantean estrategias de rehabilitación del río Magdalena principalmente en tres secciones: en la parte alta (sitios de muestreo S1, S2 y S3), donde la degradación del río es menor y esta influenciada por factores como ganadería y agricultura, en la parte baja del río que corresponde a las zonas dentro del bosque que tienen contacto con actividades humanas (S4 y S5), y en la zona urbana (S6) siendo ésta la zona que requiere mayor rehabilitación.



## **ABSTRACT**

As a part of Mexico's watershed, the Magdalena River flows into it being one of the most important rivers in Mexico City since as of this date it still contributes with approximately 0.28% of the total water consumption of Mexico City. The main objective of this research project was the assessment of the water quality of the Magdalena river in order to determine to what degree the water quality has deteriorated and, based on these facts, to recommend concrete rehabilitation steps to be taken, always taking into account the local needs. Three samplings were carried out covering the annual 2007 cycle: dry-cold, season, rainy season and tempered-dry season. These samplings took place at six representative locations of the river: S1, S2, S3, S4, S5 and S6. Physical, chemical and bacteriological parameters were determined.

The results obtained show that the Magdalena river carries good-quality water in its high, appropriate for the preservation of aquatic life in accordance with the NOM-001-ECOL-1996 (DOF 1997). However, a gradual water-degradation has been observed through the river as long as it flows while penetrating those areas with human activity (S4 and S5) and mostly at the (S6) urban area. In general terms, it can be observed that the results show the same outlines of all variables, consisting of two main tendencies: greater values during the dry season and a value increase in all parameters at the lower area of the river as a result of a heavier population and a greater participation of human activities.

Specifically, high values of total phosphorous (1.04 mg/L), total nitrogen (3.8 mg/L), ammonium (0.7 mg/L), nitrates (0.08 mg/L), faecal coliform (65,8546 UFC) and faecal enterococcus (41,298 UFC) have been reported in the last three sites at the lower part of the Magdalena river (S4, S5 and S6) exceeding the established protection limits for aquatic life (CNA 2005, DOF 2007). In general, the results obtained indicate a strong pollution at the lower area of the river, therefore it can be said that recreational activities are far from being safe in this area, especially for human consumption of water, due to the high potential health-risks all these facts represent for both, local population and visitors. All the above is due to the domestic residual and waste waters discharged at this area with no previous treatment at all. Due to the above, some strategies have been planned to rehabilitate the Magdalena River and restore its good condition, mainly in three sites: the higher area of the river (sampling sites S1, S2 and S3) where its degradation is less and is influenced by agriculture and livestock, the lower part of the river that corresponds to the forest areas which are in contact with human activities (S4 and S5), and the urban area (S6) which is the one that needs a greater effort..

## **1. INTRODUCCION**

El agua es un elemento indispensable para la vida. En el mundo el volumen total de agua es de aproximadamente 1,390 millones de km<sup>3</sup>, de los cuales solo el 0.26% del agua es directamente utilizable por la especie humana (Shiklomanov, 1993, 1999). Es decir, menos del 1% del agua dulce en el mundo esta disponible para el ser humano y los ecosistemas naturales (Andrade y Navarrete, 2004). Dentro de este 1% se encuentran los sistemas lóticos (ríos, arroyos, riachuelos, etc.), los cuales se caracterizan por tener un flujo unidireccional de agua y una gran heterogeneidad espacial y temporal (Giller y Malmqvist, 1998).

Los ríos son sistemas acuáticos con una alta diversidad, donde la combinación de variables espaciales y temporales ejerce una fuerte influencia sobre la distribución, interacción y adaptación de los organismos (Scarsbrook y Townsend, 1993). Estos sistemas además son importantes porque forman parte de los ecosistemas naturales y proveen al ser humano una serie de servicios gratuitos o beneficios que la humanidad obtiene de los ecosistemas que se conocen como servicios ecosistémicos (Millennium Ecosystem Assessment, 2003), como parte de éstos se puede mencionar la regulación del clima, la calidad del agua y el abastecimiento del vital líquido para los asentamientos humanos.

En México, los ríos han sido poco estudiados a pesar de ser sistemas importantes desde el punto de vista ecológico, económico y social. Sin embargo, como producto de los problemas asociados con la degradación de estos sistemas, recientemente se observa un creciente interés por conocer y proteger estos ambientes (Norris y Hawkins, 2000). Tal es el caso de la importancia que se la ha dado recientemente al río Magdalena, al ser uno de los ríos que aún existen de manera natural en la ciudad de México.

### **1. 1 Importancia del río Magdalena**

La subcuenca del río Magdalena forma parte de la cuenca de México, se caracteriza por una gran riqueza de especies debido a su ubicación, como parte del Eje

Neovolcánico Transversal, el cual es uno de los principales centros de endemismos y riqueza de algunos grupos como son los mamíferos (Romero y Velázquez, 1999), así como una gran diversidad florística (Ávila-Akerberg, 2002) y la mayor diversidad de mariposas en toda la cuenca de México (Luis, 1985). Además es una de las principales áreas de excedente hídrico en el Distrito Federal (Mazari-Hiriart, 2000). En el presente trabajo se le denomina cuenca del río Magdalena por su caracterización hidrológica, aún cuando se trata de una subcuenca de la cuenca de México.

En particular, los bosques de la cuenca del río Magdalena son importantes por los servicios ecosistémicos que provee como protección de cuencas hidrográficas y control de inundaciones, captura y almacén de carbono debido a que sus bosques almacenan un promedio de 50 toneladas de carbono por hectárea, así como también es la herencia cultural, ya que sus pobladores han estado ligados a esta zona desde la época prehispánica (Jujnovsky, 2006). De hecho, una de las principales causas del florecimiento agrícola e industrial del pueblo de la Magdalena Contreras fue la presencia del río Magdalena, ya que las labores productivas desarrolladas como obrajes, ladrilleras, explotación de carbón y huertas se encontraban en función y aprovechamiento del río, así la utilización de las aguas del mismo fue causa de numerosos conflictos desde esa época (Ontiveros, 1980). Por lo que ésta zona es importante ecológica, social y económicamente.

El río Magdalena nace en la Sierra de las Cruces dentro de la “Zona Protectora Forestal Cañada de Contreras” (Ávila-Akerberg, 2002), se localiza al suroeste del Distrito Federal, y se encuentra ubicado la mayor parte en la delegación Magdalena Contreras (78%) y en las partes más altas abarca una sección de las delegaciones Álvaro Obregón (5%) y Cuajimalpa (17%). Tiene una longitud desde su nacimiento hasta su incorporación al drenaje de 22km, de los cuales entre 10 y 11 se encuentran en el suelo urbano y el resto en el suelo de conservación (Almeida-Leñero, 2007).

El río Magdalena fue uno de los ríos más caudalosos y largos que abastecía de agua a los actuales Viveros de Coyoacán y también alimentó al río Churubusco. Actualmente es uno de los ríos más importantes de la ciudad de México, ya que es el único río permanente que aún aporta 200 lps de agua

superficial, o sea aproximadamente un 0.28% del agua que se requiere en la ciudad de México.

De acuerdo con estimaciones de Jujnovsky (2006), escurren 20 millones de m<sup>3</sup> de agua anualmente del río Magdalena, lo cual equivale a un gasto de 0.63 m<sup>3</sup>/s. El cauce del río tiene una longitud total de 21,600 m, de los cuales sólo 11,000 m se encuentran dentro en los bosques de la subcuenca (Álvarez, 2000; Jujnovsky, 2006). Cabe mencionar que el agua del río en su parte alta es de buena calidad, motivo por el cual es de primordial importancia en el abastecimiento de agua para uso y consumo humano en la zona sur del Distrito Federal (Jujnovsky, 2003; Bojorge-García, 2006). Sin embargo, solamente una tercera parte del caudal se aprovecha y el resto se desperdicia vía el sistema de drenaje capitalino (Cisneros, com. personal).

Además un alto porcentaje (70%) del agua que se consume en el Distrito Federal proviene del subsuelo y se sabe que los bosques de la Cañada de Contreras aportan parte de esta recarga, por lo que dicha zona contribuye de manera importante a la infiltración del agua de lluvia que alimenta al sistema del acuífero de la cuenca de México (CNA, 2005).

## **1.2 Degradación del río Magdalena**

A pesar de su importancia y de que una parte de la cuenca del río Magdalena está localizada en zona de reserva ecológica, el acelerado y desorganizado crecimiento urbano de la Ciudad de México, aproximadamente 8.5 millones de habitantes (GDF, 2005), ha promovido la degradación de la cuenca y por consecuencia del río Magdalena en los últimos años.

Dicha degradación en la zona alta de la cuenca es causada principalmente por erosión del suelo, deforestación, pérdida de la cubierta vegetal, tala clandestina, actividades agropecuarias, en la parte media por asentamientos irregulares, turismo no regulado y descargas de aguas residuales producto de puestos de comida, y en la zona baja de la cuenca debido esencialmente a descargas de aguas residuales de origen urbano que son vertidas al mismo sin previo tratamiento.

Lo anterior, es ocasionado principalmente por la falta de un suministro de agua adecuado, y de redes de distribución de agua o recolección de agua residual, casi inexistentes en esta zona. Y por desgracia esto va en aumento

debido al incremento de asentamientos irregulares, afectando seriamente los bosques de la cuenca que facilitan la recarga de agua. De acuerdo al censo de 1997, casi la mitad de las viviendas están establecidas en asentamientos irregulares y carecen de drenaje, por lo que sus descargas de aguas residuales representan un riesgo de contaminación para el río y para los acuíferos, así como para la salubridad de los habitantes, éste es el caso de los asentamientos Ladera de Sayula, Cazulco y Segundo Dinamo que avanzan sobre el área natural protegida y los bosques de la Cañada de Contreras (GDF, 2000).

### **1.3 Calidad del agua**

El término “calidad del agua” se refiere a las condiciones de pureza o de alteración del agua (Turk *et al.*; 1973). Sin embargo, cuando se habla de calidad del agua se debe tener claro que se hace en función del uso o actividad que se planea dar al líquido; ya sea para uso y consumo humano, para uso industrial, para riego agrícola, piscicultura y recreación (Angelier, 2003). Por ello, no es posible hablar de una buena o mala calidad, sino que cada actividad, requiere una calidad de agua específica (Pérez-Ortiz, 2005). En México, el uso prioritario es para el consumo humano, pero también se utiliza en la industria, agricultura, el sector pecuario, como generadora de electricidad y para el uso y desarrollo de complejos turísticos (Mazari-Hiriart, 2008).

La cantidad y la calidad del agua varían tanto espacial como temporalmente y de ellas depende la disponibilidad del recurso. La alteración de la calidad del agua, reduce el volumen disponible para uso y consumo humano, así como para su uso por poblaciones animales, vegetales, y de manera general, para el funcionamiento de los ecosistemas. La calidad del agua es un factor determinante de la salud pública y de la salud de los ecosistemas, que restringe la oferta de agua y su distribución potencial para los diferentes usos (Carabias *et al.*, 2006), por eso es muy importante su estudio.

### 1.3.1 Físicoquímicos como indicadores

Para evaluar la calidad de agua y establecer las condiciones en la que se encuentran los cuerpos de agua se pueden emplear parámetros físicos, químicos y biológicos. A estos parámetros se les denomina “indicadores de la calidad del agua” (Seoánez, 1999). Los parámetros físicoquímicos que se han considerado importantes y son utilizados en diversos países como base para medir la calidad del agua son el pH, la temperatura, la conductividad, el oxígeno disuelto, nutrimentos como el nitrógeno y el fósforo, los sólidos totales, suspendidos y disueltos, la velocidad de corriente y la descarga (Q) del río (Callow y Petts, 1992; Allan, 1996). Entre éstos uno de los más estudiados en los ríos o sistemas lóticos es la descarga (Q), la cual se refiere al volumen del agua que fluye por unidad de tiempo a través de una sección transversal del canal del río (Hauer y Lamberti, 2006); este factor afecta principalmente la disponibilidad de nutrientes en el sistema.

En general la fuente principal de los nutrientes hacia los cuerpos acuáticos son: la lluvia, los escurrimientos y los procesos biogeoquímicos proveniente de la vegetación y de zonas aledañas (De la Lanza *et al.* 2000). Los nutrientes que se encuentran en los cuerpos de agua son básicamente compuestos nitrogenados (urea, amonio, nitritos y nitratos) y fosfatados (varias formas de fosfatos). La carencia de éstos para el buen desarrollo del fitoplancton, son limitantes primordiales de producción primaria. En aguas templadas se considera al fósforo como el limitante para el desarrollo de los organismos acuáticos (Wetzel, 2001) y en aguas tropicales el nitrógeno suele ser el limitante ya que este no es tan soluble y se encuentra en menor concentración.

Sin embargo, en México es baja la probabilidad de no tener aporte de nutrientes a los cuerpos de agua, así cantidades inusuales de compuestos como el amonio son indicativos de eutrofización o inclusive condiciones anóxicas que pueden ser naturales o inducidas por la actividad humana (Contreras y Kerekes, 1993).

Los compuestos nitrogenados tienen dos tipos de fuentes: una externa o alóctona (importado de otro ecosistema) y otra interna o autóctona (producido dentro del mismo sistema). La primera se refiere a los compuestos inorgánicos disueltos como nitratos o amonio, los cuales son utilizados por las plantas,

mientras que los compuestos de origen autóctono son el resultado de procesos de fijación llevado a cabo por bacterias y algas (Reid y Wood, 1976).

El nitrógeno en forma de amonio se encuentra de forma natural en aguas superficiales y es producto de la hidrólisis de la urea (APHA, 2005); además es producto de desechos domésticos y agrícolas y de procesos industriales (Seoáñez, 1999). Los nitratos son un estado de oxidación final del nitrógeno y es un elemento disponible para los organismos acuáticos (Lampert y Sommer, 1997).

El fósforo total (PT) puede presentarse en los cuerpos acuáticos del arrastre natural de las partes elevadas de una cuenca, y en concentraciones muy elevadas debido a las descargas de aguas residuales domésticas y agrícolas porque son compuestos primordiales de los fertilizantes (APHA, 2005).

### **1.3.2 Microorganismos como indicadores**

Los parámetros biológicos que son considerados como indicadores de la calidad del agua son las bacterias y otros microorganismos porque son los responsables de la transmisión de enfermedades como el cólera, la disentería, y la fiebre tifoidea que afectan de manera significativa la salud humana, éstas enfermedades pueden ser contraídas ya sea por ingestión directa o contaminación de alimentos y en un momento determinado se pueden convertir en epidemias si no hay control del agua para consumo humano y las aguas residuales (Cortez, 2004). En México los problemas de calidad de agua son severos. La principal causa de enfermedades transmitidas por agua son las descargas de agua residual sin previo tratamiento que reciben los cuerpos de agua. Esto determina que en el agua para uso y consumo humano se encuentren problemas recurrentes de presencia de microorganismos patógenos (Jiménez *et al.*, 1998; Carabias *et al.*, 2006).

Entre los microorganismos acuáticos con efecto más relevante por su transmisión de enfermedades sobre la calidad del agua, se encuentran las bacterias (Tchobanoglous y Schroeder, 1987; Campos, 2005). Las bacterias son organismos unicelulares que se multiplican por división celular y su velocidad de reproducción depende de varios factores como son; temperatura, pH y disponibilidad de alimento (Seoáñez, 1999). Por esto, las bacterias son los

organismos más utilizados para fines de evaluación de la calidad del agua (indicadores de la calidad del agua). Específicamente algunos grupos bacterianos, como los coliformes fecales y los enterococos fecales, los cuales son dos grupos de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común (diferentes) e importancia relevante como indicadores de contaminación fecal por descarga reciente de desechos, y a largo plazo son indicadores de la efectividad de programas de control (OMS, 1996; Martins y Facklam, 2003).

Las bacterias coliformes totales, son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo a los humanos. Se caracterizan por ser de forma bacilar, gram negativas, anaerobias facultativas, no forman esporas y fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a 35 °C en 48 horas (APHA, 2005). Son un grupo de bacterias que tradicionalmente se han considerado como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua destinada al consumo humano en razón de que están en los sistemas acuáticos.

Sin embargo, no todos los coliformes son de origen fecal, por lo que desde el punto de vista de la salud pública, existe una diferenciación, de los coliformes totales CT (que comprende la totalidad del grupo) con las coliformes fecales CF (aquellas bacterias de origen intestinal) que permite asegurar con cierto grado de certeza que la contaminación que presenta el agua es de origen fecal (Toranzos, 1996; APHA, 1998; Gerba, 2000; Rose y Grimes, 2007).

Las bacterias coliformes fecales entonces, son un subgrupo de los coliformes totales que fermentan la lactosa a 44.5 – 45.5 °C, son bacterias aeróbicas o facultativas, gram negativas, oxidasa negativas, que producen ácido láctico y gas. En este grupo se encuentran los géneros: *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Citrobacter*, organismos que habitan en el intestino de animales de sangre caliente incluyendo al hombre, por lo que su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente adecuada para uso humano. Por esto, tradicionalmente se las ha considerado como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua destinada al consumo humano (Gerba, 2000; APHA, 2005). Asimismo, su número en el agua es proporcional al grado de contaminación fecal; mientras más coliformes fecales se aíslan del agua, mayor es la descarga de heces.



La presencia de bacterias coliformes fecales en el agua, es un indicio de que puede estar contaminada con aguas residuales u otro tipo de desechos en descomposición. Es decir, se emplea el grupo de bacterias coliformes como indicadores, debido a que reflejan contaminación fecal en agua, ya que están presentes en el intestino de organismos de sangre caliente

Otro grupo que también se utiliza como indicador de la calidad del agua, por ser bacterias que habitan en el intestino de los animales homeotermos, son el grupo de los enterococos fecales (EF). Este grupo de bacterias esféricas son cocos, Gram-positivos, facultativos anaerobios, esto es, que prefieren usar oxígeno, aunque sobreviven bien en su ausencia, típicamente exhiben gamma-hemólisis en agar con sangre de cordero y están frecuentemente asociadas a infecciones clínicas, incluyendo infección urinaria, bacteriemia, endocarditis, diverticulitis y meningitis (Teixeira y Facklam, 2003). Los enterococos se encuentran de manera natural en muchos organismos, incluidos los humanos, como parte de su flora intestinal, y consta de las siguientes especies: *Enterococcus avium*, *E. durans*, *E. faecalis*, *E. faecium* (APHA, 2005). Son microorganismos muy resistentes, pues presentan tolerancia a condiciones ambientales adversas, altas o bajas temperaturas, concentraciones relativamente altas de sales y ácidos, deshidratación, salinidad y luz solar (Gerba, 2000; Campos, 2005).

Las ventajas que presenta el uso de éstos organismos como “indicadores biológicos de la calidad del agua” de acuerdo con De la Lanza *et al.* (2000), es que el muestreo de estos grupos es de acuerdo a un protocolo bien desarrollado que proporciona una respuesta rápida y económica a cambios ambientales tales como la contaminación, básicamente por descargas de aguas residuales. Además son fáciles de identificar y relativamente de fácil determinación, así como económicos para su estudio.

#### **1.4.1 Estudios de calidad del agua en el río Magdalena**

En general, los ríos en México han sido poco estudiados con esta orientación; los ríos en la cuenca de México no escapan a este hecho a pesar de ser sistemas importantes a nivel ecológico y desde el punto de vista social.

Algunos de los estudios para esta zona del país son los realizados por Nomdedeu y López-Ochoterena (1988), quienes trabajaron en el río Magdalena con protozoarios ciliados como indicadores biológicos. Estudios posteriores fueron realizados por Cantoral *et al.* (1998), quienes utilizaron las algas como indicadores de la calidad del agua; Ramirez *et al.* publicaron un estudio florístico de las algas de la zona con datos ambientales de las especies; Bojorge-García (2002) realizó un estudio de la variación estacional de la biomasa de las comunidades algales en el río; y finalmente este mismo autor (Bojorge-García, 2006) utilizó bacterias y diatomeas como bioindicadores en la zona baja del río Magdalena. En estos últimos estudios (Bojorge-García 2002, y Bojorge-García, 2006) en el río Magdalena sobre la calidad del agua, se concluyó que existen comunidades algales y diatomeas que corresponden a la flora original y que permiten caracterizar el río como un sistema de aguas limpias en la parte alta y media de la cuenca. Sin embargo, se presentan cambios importantes en dichas comunidades cuando el río entra a la zona urbana. Con base en estos estudios, se puede decir, que la zona baja del bosque es la más vulnerable al estar expuesta al crecimiento de la mancha urbana y por sufrir impactos por las actividades humanas debido a su cercanía con las zonas habitadas regular e irregularmente.

Derivado de que ninguno de estos estudios mencionados previamente, se enfocaron en un estudio de la determinación de la calidad del agua desde su nacimiento hasta su incorporación en la zona urbana del río. Se decidió abordar el presente estudio con el fin de realizar un estudio completo a lo largo del río Magdalena, a través de la utilización de indicadores físicos, químicos y bacteriológicos, como un diagnóstico ambiental para generar estrategias de rehabilitación del mismo.

## **1.5 Rehabilitación**

Por definición, la meta fundamental de la restauración a nivel de los ecosistemas acuáticos, es regresar al ecosistema a un estado natural previo a la degradación o revertir el deterioro ambiental recuperando la estructura y función del ecosistema original (Bradshaw, 2002; SER, 2002). Sin embargo, en

la mayoría de los casos la composición y estructura de los sistemas pasados es desconocida, y prácticamente es imposible o extremadamente costoso restaurar (Hobbs y Harris, 2001). Esto aunado a la alta dependencia del hombre sobre el recurso agua, obligan a la restauración a modificar las metas en función de las condiciones locales o de las necesidades humanas que existan sobre el recurso agua.

Es entonces cuando se utiliza la rehabilitación, lo que se busca es crear las condiciones adecuadas para que el sistema cumpla con ciertas funciones específicas; en cierto sentido se le puede considerar como una restauración parcial o incompleta (Bonilla, 2007). Es decir, la rehabilitación se diferencia de la restauración, en que en la primera es necesario generar metas claras en función de las condiciones locales o las necesidades sociales para que puedan ser viables, sin ser necesario recuperar la estructura y función del ecosistema original (Livingston, 2006), para poder así generar un enfoque viable sobre los sistemas.

En particular, cuando se plantean las metas de rehabilitación de un río, ésta puede ser de tipo estructural a través de mejorar la vegetación riparia en la que se realizan plantaciones de árboles, arbustos y plantas hidrófilas para asemejar la estructura propia de la vegetación de la ribera del río. También puede ser de carácter funcional, debido a que los ecosistemas acuáticos tienen diversas funciones desde reciclar nutrientes, purificar el agua, aumento y mantenimiento de los flujos de agua, recarga de los mantos acuíferos, provisión de hábitat para la vida silvestre, así como recreación para la gente. Dada la naturaleza de los ríos o sistemas lóticos, la vegetación riparia de éstos sistemas es esencial para la rehabilitación de sus funciones ecológicas. Además, los esfuerzos de rehabilitación de los cuerpos acuáticos tienen la necesidad de ser propuestos a largo plazo, para asegurar las metas y previendo eventos catastróficos (National Academy of Sciences, 1999).

En el caso específico del río Magdalena sería imposible realizar una restauración del sistema a su estado original, ya que existe una gran población que demanda espacios y servicios sobre todo en la parte baja de la cuenca (Bojorge, 2006; Jujnovsky, 2006). Además es necesario revertir los efectos de

la perturbación del río a partir de la ubicación de las zonas del río que pueden ser conservadas y rehabilitadas.

Esto es básicamente debido a que para que se planteen las metas de un proyecto de rehabilitación de un sistema acuático degradado se depende de su nivel de alteración (Linding-Cisneros y Zedler, 2005), por lo cual el objetivo primordial de este estudio es la realización de un diagnóstico de la calidad del agua que presenta el río Magdalena a través de su cauce a fin de conocer el grado de perturbación del río, y con ello se plantea proponer acciones concretas de rehabilitación en el río Magdalena, de forma que se consiga corregir o compensar de modo satisfactorio los problemas originados a causa de la intervención humana, tomando en cuenta las necesidades locales.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar la calidad del agua del río Magdalena a través de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos y diagnosticar su estado, para detectar prioridades de rehabilitación del mismo.

### **2.2 Objetivos particulares**

1. Evaluar las características físicas, químicas y bacteriológicas como indicadores de la calidad del agua en el río Magdalena del río Magdalena.
2. Realizar un diagnóstico ambiental del río Magdalena, para generar una zonificación del mismo.
3. Identificar los principales factores de origen antropogénico que intervienen en la alteración de la calidad del agua del río Magdalena al fin de proponer estrategias de rehabilitación.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Magdalena se localiza en la Sierra de las cruces, en el límite suroeste del D.F. dentro de la cuenca de México. Geográficamente se localiza en 19°15'06" latitud norte y a los 99°17'30" de longitud oeste. Comprende las delegaciones políticas Magdalena Contreras (78%), Álvaro Obregón (5%) y Cuajimalpa (17%), y abarca una superficie aproximada de 3000 hectáreas (Figura 1). El área se define con diversos nombres; por su acuerdo el nombre que recibe es "Zona Protectora Forestal Cañada de Contreras" (DOF, 1932). Según la tenencia de la tierra se le nombra como "Bosques Comunales de la Magdalena Atlitic" (Ávila, 2004). Para fines turísticos se le conoce como "Los Dinamos". En el presente trabajo se le denomina cuenca Magdalena por su caracterización hidrológica, aún cuando se trata de una subcuenca de la cuenca de México.

La cuenca del río Magdalena, es una de las principales áreas de excedente hídrico en el Distrito Federal (Mazari, 2000), donde existe una buena representación de la vegetación templada del país así como una gran diversidad florística (Ávila-Akerberg, 2002). Los suelos, son en su mayoría de tipo Andosol húmico, muy permeables y susceptibles a erosionarse, aunque también hay presencia de otros Andosoles como son mólico y ócrico, así como Litosoles. La textura es de tipo franco, migajón arcilloso arenoso distribuidos por toda la cuenca (Jujnovsky, 2003).

El gradiente altitudinal de la cuenca conlleva a la existencia de dos tipos de clima: desde la parte urbana y hasta los 3,050 m se presenta el clima templado subhúmedo (hasta el tercer dinamo) siendo el de mayor humedad en su tipo, y en la parte más alta entre los 3,100 y 3,800 msnm el clima semi frío (García, 1988).

El verano es fresco y largo con poca oscilación térmica y la temperatura media anual oscila entre 10 y 14 °C, siendo los meses más calientes, abril, mayo y junio, aunque disminuye conforme hay ascenso altitudinal de 13.7 a 5.2 °C. Asimismo la precipitación muestra el efecto contrario, aumenta conforme hay ascenso altitudinal, es cercana a los 1,000 mm. .en la parte baja y hasta 1,500 mm en la zona más alta; la época de lluvias es de mayo a octubre y en

estos meses la precipitación siempre es mayor a la evapotranspiración (Ávila, 2002).

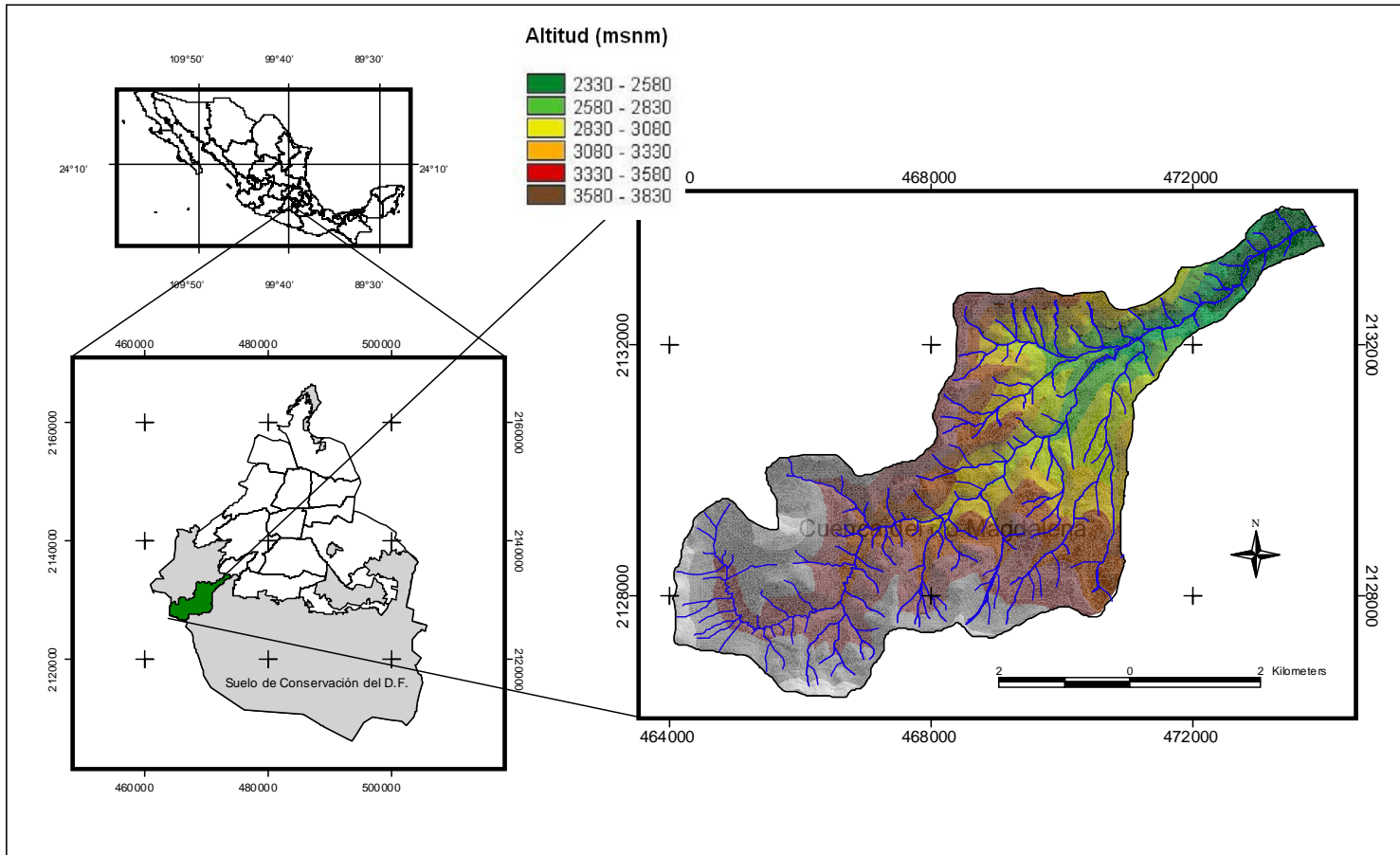


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio. (Modificado de Aguilar, datos no publicados)

La presencia del río Magdalena es una de las características más importantes de la Cañada de Contreras, éste nace a 3,650 m de altitud, y dentro de la cuenca corre a lo largo de un gradiente altitudinal que va de los 3,400 a los 2,570 msnm (Figura 1). Nace de escurrimientos originados en los cerros La Palma, San Miguel, Cochinos y Coconetla, entre los más importantes, a una elevación aproximada de 3,650 msnm., teniendo un curso en dirección Noreste (NE). El río cuenta con un escurrimiento perenne debido a los manantiales que lo alimentan, Cieneguillas, los Cuervos, San Miguel Ceresia, Temascalco, San José, Potrero, Apapaxtla, las Ventanas y los Pericos.

También con base en este gradiente altitudinal, la vegetación de la cuenca muestra así mismo su propio gradiente entremezclado de tres tipos de comunidades (Nava, 2003), la de *Pinus hartwegii* en la parte más alta, la de *Abies religiosa* ubicada en la parte media, y la de bosque mixto localizada en la parte baja (Figura 2).

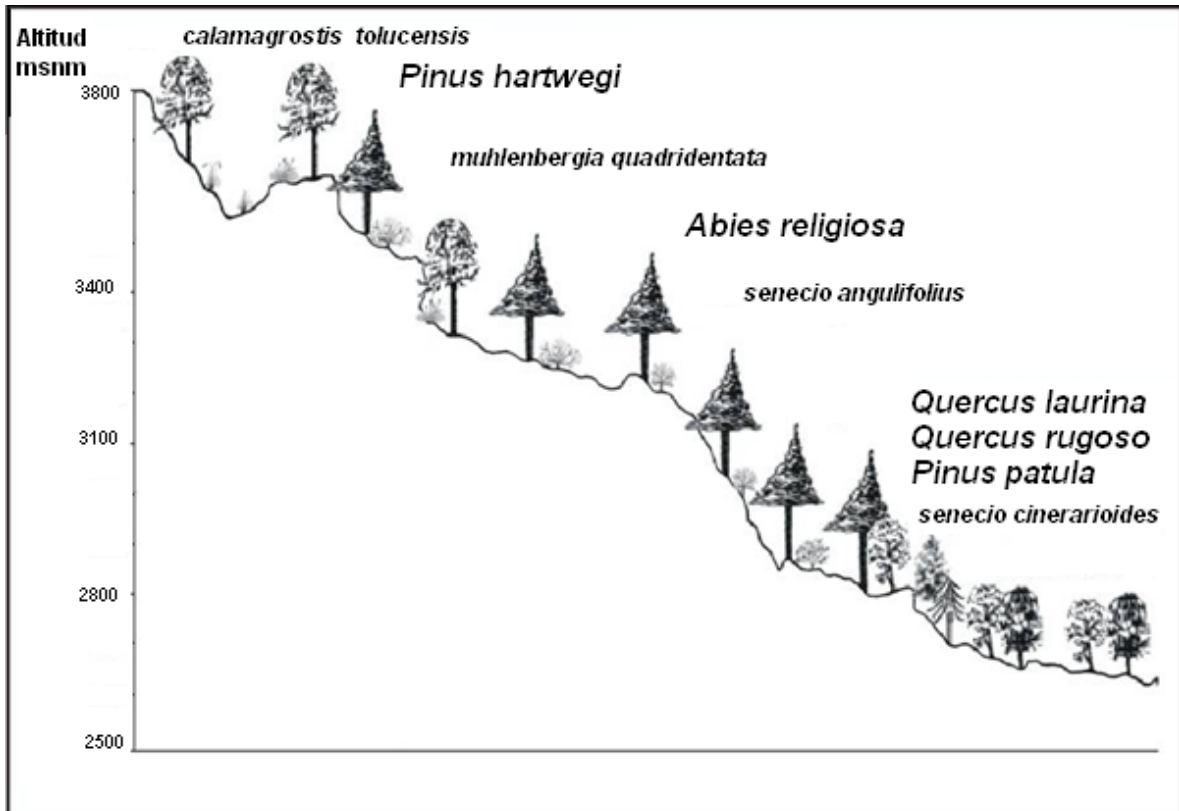


Figura 2. Perfil de la vegetación de la cuenca del río Magdalena (Modificado de Álvarez, 2000)

Hasta el momento se han registrado para el área; 87 familias con 251 géneros y 487 especies de plantas vasculares que representan el 25% de la fitodiversidad de la cuenca de México, o el equivalente al 2.2 % del total de la flora del país (Ávila-Akeberg *et al.* en prensa: 22). Además, se reconocen 40 especies de mamíferos, las cuales pertenecen a 8 órdenes, 16 familias y 29 géneros, siendo 11 especies endémicas de México (Olguin y León, 2007).

En lo que se refiere a la herpetofauna de la zona Olguin y León (2007) registraron 6 especies de anfibios y 10 de reptiles. Olivares y Figueroa (2007) reportaron 109 especies de aves. Villarruel y Cifuentes (2007) registraron 16 familias y 34 especies tan sólo de hongos macroscópicos. Y en lo que se refiere a mariposas diurnas (*Lepidoptera: rophalocera*) que habitan en la zona, Trujano *et al.* (2006) registraron 36 especies y subespecies que se integran en 31 géneros pertenecientes a cinco familias.



## **4. METODO**

### **4.1 Diseño Experimental**

Para llevar a cabo esta investigación se realizaron tres muestreos cubriendo el ciclo anual 2007, esto incluye: la época de secas-fría, época de lluvias y época de secas-templada. El primer muestreo correspondiente a la época de secas-fría, se realizó entre los meses de enero y marzo, el segundo muestreo correspondiente a la época de lluvias se realizó en el mes de julio y el tercer muestreo se realizó a principios de noviembre antes de la época fría de ese mismo año.

Dichos muestreos se realizaron en seis sitios representativos del río, que fueron seleccionados y geoposicionados previamente (GPS 12 Personal Navigator GARMIN, Mod. 99) en salidas de prospección realizadas al sitio. Esta selección de sitios, se realizó con base en las entradas y salidas de agua, así como en la presencia de elementos que pudieran alterar el estado del río como canales de desecho y presencia de actividades humanas (Figura 3).

Los cinco primeros sitios de estudio (S1, S2, S3, S4 y S5), se caracterizan por tener aguas cristalinas ausentes de olor y presencia de vegetación a ambos lados del cauce. Los dos últimos de éstos (S4 y S5), se encuentran río abajo de estanques de truchas y locales de venta de alimentos. El sitio 6 (S6), se encuentra dentro de la zona urbana del poblado La Magdalena, se caracteriza por tener aguas de color café con olor fétido.

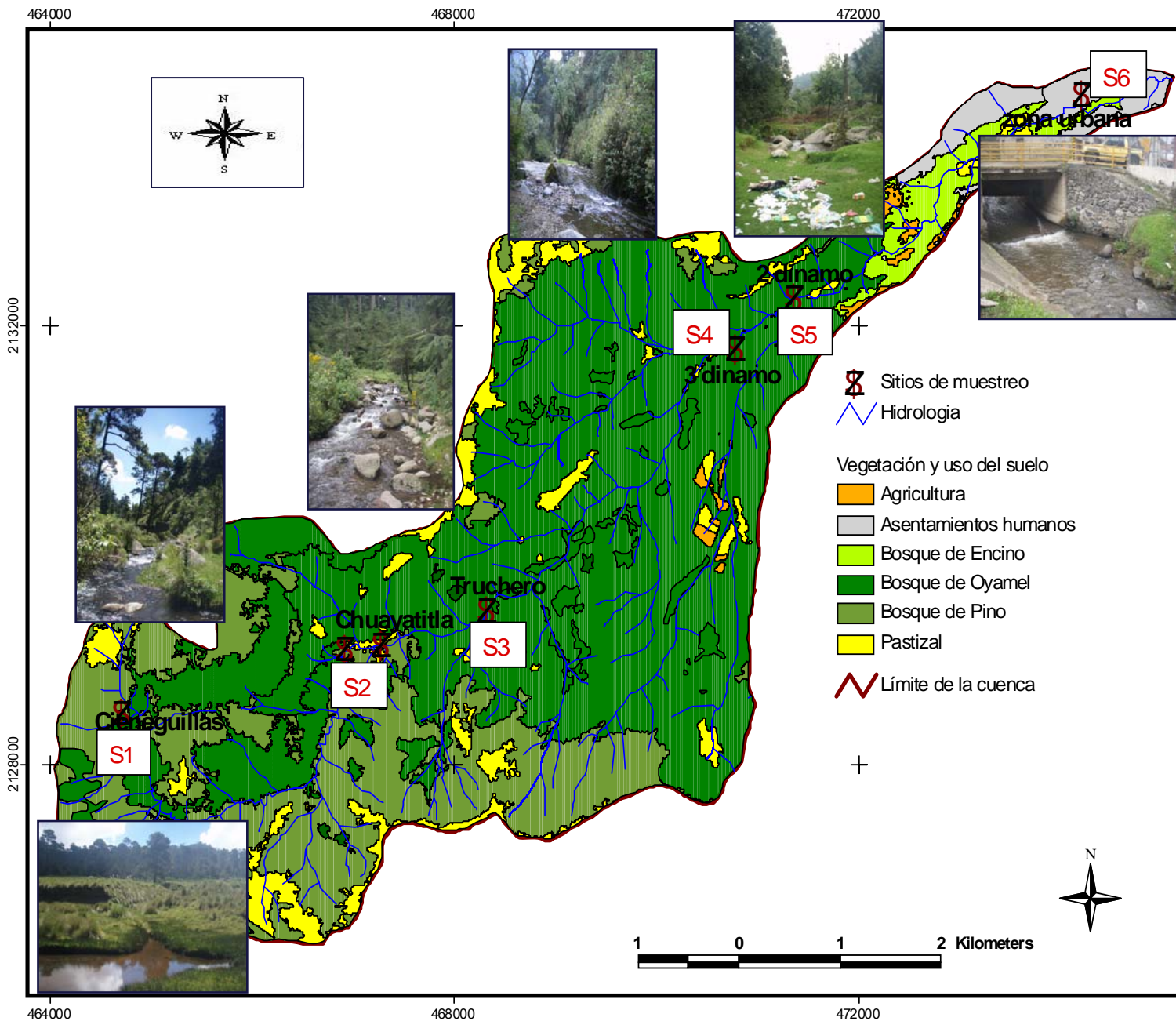


Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6), mostrando la vegetación y los usos de la cuenca del río Magdalena. (Modificado de Aguilar, datos no publicados).

Las muestras fueron colectadas en botellas de polipropileno de alta densidad previamente lavadas y esterilizadas de acuerdo con los métodos estándar (APHA, 2005); las muestras fueron tomadas a mitad del cuerpo de agua, a dos terceras partes de la profundidad, considerándose ésta una muestra representativa de la columna de agua (Hynes, 1983). Después, fueron transportadas y almacenadas en hieleras a 4 °C aproximadamente, para su

análisis en el laboratorio de Ecología Química del Instituto de Ecología de la UNAM.

#### **4.2 Análisis de parámetros físico-químicos**

Los parámetros físicos: profundidad, pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto, fueron medidos *in situ* con el equipo multiparámetros Sension 156 (HACH, Loveland US).

Estas determinaciones se llevaron a cabo con la siguiente precisión:

- Profundidad ( $\pm 0.1$  m)
- pH ( $\pm 0.001$  °H)
- Temperatura ( $\pm 0.01$  °C)
- Conductividad eléctrica ( $\pm 0.001$   $\mu$  S/cm)
- Sólidos disueltos totales; SDT ( $\pm 0.1$  mg/L)
- Oxígeno disuelto ( $\pm 0.01$  mg/L)

También se determinó la velocidad de corriente (m/s) del río *in situ*, con un medidor de corriente Swoffer 2100, Washington USA. Esta se utilizó para calcular la descarga o el caudal del cauce (m<sup>3</sup>/s), la cual se refiere al aumento del volumen en un cauce. Se obtuvo con la fórmula  $Q = Av$ , donde Q = es descarga, A área debajo de la curva y v es la media de las velocidades de acuerdo con Hauer y Lamberti (1996) (Anexo I).

La determinación de sólidos totales (ST) y sólidos suspendidos totales (SST), se realizó en la Unidad de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencias, UNAM. El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en agua, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no. Para ambos parámetros se utilizó la técnica propuesta en APHA (2005).

En el caso específico de los sólidos totales (ST) se utilizaron crisoles de evaporación que fueron pesados previamente en una balanza analítica de alta precisión (PCE-AB 200, I. Albacete, España), posteriormente se adicionó una muestra de agua (50 mL) y se desecaron una temperatura constante de 110 °C por 12 horas. La cuantificación de los sólidos totales se obtuvo de la diferencia del peso inicial de los crisoles y del peso final después de la evaporación.

La determinación de los sólidos suspendidos (SST), se realizó bajo el mismo principio, sólo que en éste método la muestra se pasó a través de un filtro de 2.0  $\mu\text{m}$  (papel Whatman No. 1), y el resultado se obtuvo del peso del filtro antes y después de la evaporación.

Para la determinación de los parámetros químicos en el laboratorio; como el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y carbono orgánico total (COT), se utilizó un bloque digester portátil (HACH/DR200) y un espectrofotómetro portátil HACH (DR/2400). Las técnicas fueron las sugeridas en el manual de operación (HACH, 2003) en un lapso menor a 24 horas, así como con metodologías estándar (APHA, 2005). Los métodos utilizados fueron los siguientes:

- Dureza de Ca y Mg por el método colorimétrico.
- Amonio por el método de salicilato (0.01 a 0.50 mg/L  $\text{NH}_4^+$  - N)
- Nitratos por el método de reducción por cadmio (0.01 a 0.50 mg/L  $\text{NO}_3^-$  N)
- Nitrógeno total por el método de digestión con persulfato (0.5 a 25.0 mg/L N).
- Fósforo total por el método digestión con persulfato ácido (0.2 a 3.50 mg/L  $\text{P}$ ).
- Carbono orgánico total (COT) por el método directo (0.3 a 20 mg/L C).

#### **4.3 Análisis de parámetros bacteriológicos**

En el caso de los análisis bacteriológicos para la cuantificación de coliformes fecales (CF) y enterococos fecales (EF) las muestras se procesaron siguiendo el método de filtración a través de membrana (APHA, 2005), utilizando membranas de acetato de celulosa de 0.45  $\mu\text{m}$  (acetato de celulosa Milipore MF tipo HA, Milipore Corp. Bedford, MA), las cuales se incubaron en diferentes medios de cultivo:

- Caldo M-FC (Becton Dickinson, Cockeysville, Bedford, MA. USA) para coliformes fecales
- Agar KF (Becton Dickinson, Cockeysville, Bedford, MA. USA) para enterococos fecales

En las muestras donde se esperaba un número alto de bacterias se realizaron diluciones para poder cuantificar el número de colonias, utilizando un

buffer de fosfatos a pH 7. Para realizar las diluciones se tomó 1 mL de la muestra y se colocó en 9 mL de buffer, se homogenizaron con un vortex (GENIE SI-T236 USA) y se filtraron a través de las membranas, las cuales fueron colocadas en los medios de cultivos mencionados previamente.

La incubación para coliformes fecales se llevó a cabo a  $44.5 \pm 0.2$  °C durante 48 horas (Incubadora Barnstead No. 457810, Bedford, MA. USA.), para enterococos fecales a  $35 \pm 0.5$  °C durante 24 horas (Incubadora Millipore Bedford No. 01730, Bedford, MA. USA) (Murray, 2003; APHA, 2005). Posteriormente se cuantificaron, y se reportaron en unidades formadoras de colonia por cada 100 mL (UFC/100 mL) (APHA, 2005).

Para tener una idea general del origen de las bacterias, ya sea humano o animal, se utilizó el cociente coliformes fecales / enterococos fecales (CF/EF) (Gerba, 2000; Toranzos, 1996).

Finalmente, para conocer si existía presencia de bacterias patógenas en los diferentes sitios de muestreo, se llevó a cabo la identificación a nivel de género y/o especie utilizando dos procedimientos de cultivo con agar Sheep Blood y MacConkey al 5%, con un equipo semiautomatizado DADE MicroSan, AutoScan-4 DADE Internacional West Sacramento, CA, EE.UU. en el Laboratorio de Inmunología Molecular Microbiana de la Facultad de Medicina, UNAM, bajo la dirección de la Dra. Yolanda López Vidal con el apoyo de la Q.F.B. Rosa Isabel Amieva.

#### **4.4 Análisis Estadístico**

Debido a que los datos de todas las variables estaban en unidades diferentes, se realizó una estandarización de los datos para poder comparar valores obtenidos de distintas distribuciones en la primera parte del análisis estadístico, es decir de modo que las variables se midieran en unidades comparables (Johnson, 2000).

Dado que los datos no cumplían con el supuesto de una distribución simétrica, se realizó una transformación para lograr que los datos se ajustaran a una distribución normal (Díaz, IIMAS UNAM com. personal). En muchas ocasiones ésta es la solución más natural, ya que existen gran cantidad de parámetros biológicos que tienen una distribución asimétrica y se convierten en aproximadamente simétricas al transformarlas mediante el logaritmo.

En el intento por predecir la correlación entre el conjunto de variables se realizó un análisis de correlación con el programa estadístico SPSS (Ver. 15), éste análisis proporciona una medida de la asociación lineal entre dos variables. Una correlación que es cercana a cero indica que no existe relación lineal entre dos variables, pero no implica que no exista relación (Johnson, 2000).

Posteriormente, para explicar el porcentaje de variabilidad global, se realizó un análisis de componentes principales de dos factores con el programa estadístico SPSS Versión 15.0. Este estudio se basa en la similitud de la variación de las variables para generar un conjunto menor de variables no correlacionadas llamadas “componentes principales”.

Finalmente, debido a la importancia de conocer diferencias en las variables utilizadas en éste estudio en las distintas épocas y en los sitios de muestreo, se decidió realizar comparaciones estadísticas paramétricas:

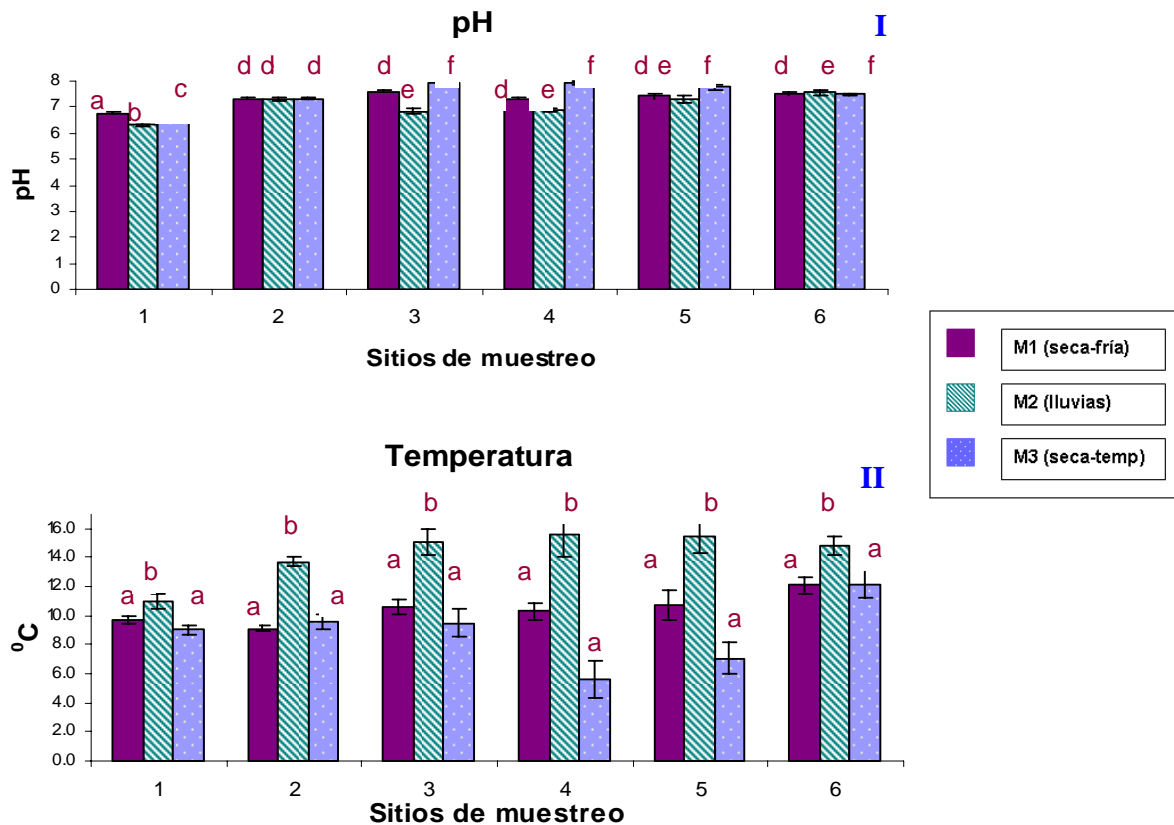
En la determinación del efecto de temporada sobre cada variable de los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) de mediciones repetidas, para ver como cambiaban a través del tiempo.

Asimismo, se realizó una comparación entre los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6), para observar si existían diferencias entre éstos. Para llevar a cabo la comparación se aplicaron análisis de varianza (ANOVA  $p < 0.05$ ) de una vía para cada variable. En los casos en que algunos análisis resultaron significativos se aplicó la prueba *post hoc* de Tukey, con el objeto de determinar los sitios que se diferenciaban entre sí. Estos análisis se llevaron a cabo con el paquete estadístico Statistica (Versión 10).

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Parámetros fisicoquímicos

Los valores de pH y temperatura (Figura 4) fueron significativamente diferentes entre la época de lluvias y las diferentes épocas de secas respectivamente (enero, junio y noviembre respectivamente) ( $p=0.000001$ ), ( $p=0.000012$ ). Los valores de pH registrados en los diferentes sitios de muestreo oscilaron entre los 6.5 y 7.5, presentando valores significativamente menores entre el sitio 1 (S1; nacimiento del río) con respecto a los demás sitios (S2, S3, S4, S5 y S6). Mientras que la temperatura presentó valores más heterogéneos, oscilando entre 5.6 y 14.8 °C, sin presentar diferencias significativas entre los diferentes sitios, pero si presentando valores significativamente mayores en la época de lluvias ( $p=0.000013$ ). También se observó una alta correlación positiva significativa entre estas dos variables (0.744,  $p < 0.01$ ) (Tabla 3).



## Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena

Figura 4. Resultados de pH (I), temperatura (II), medidos *in situ*, durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca templada (M3) del año 2007, en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) en el río Magdalena. Letras diferentes indican diferencias significativas  $p < 0.05$

La conductividad osciló entre 24 y 95  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , los valores significativamente más altos se registraron en la época de secas con respecto a la época de lluvias ( $p = 0.003472$ ). También se encontraron valores significativamente mayores en los sitios con actividades humanas: S4 y S5, pero sobre todo del sitio 6 (S6) con todos ( $p = 0.000011$ ). Este parámetro obtuvo alta correlación positiva con los nutrientes como el nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y carbono orgánico total (COT), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), así como con los sólidos totales (ST), disueltos totales (SDT) y suspendidos totales (SST) respectivamente (0.854, 0.841, 0.436, 0.684, 0.469, 0.692, 0.818, y 0.735,  $p < 0.1$ ) (Figura 5).

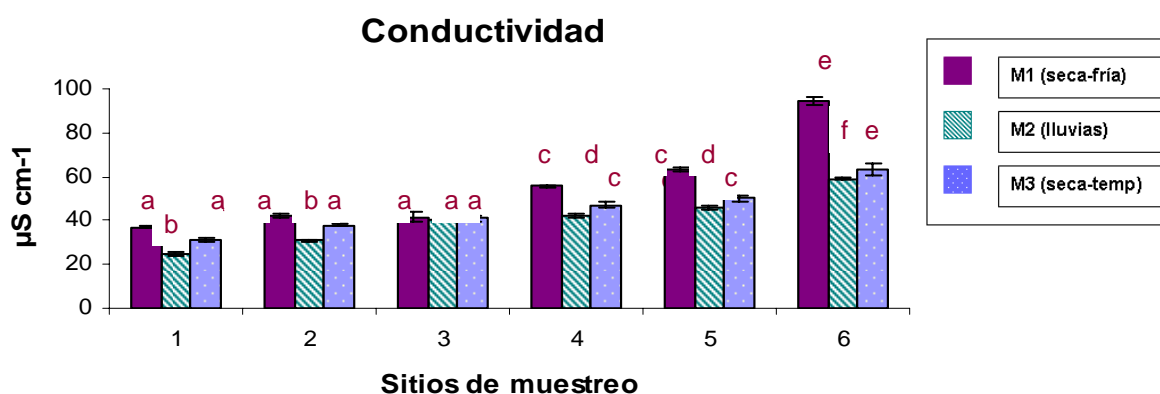


Figura 5. Resultados de conductividad medidos *in situ*, durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca templada (M3) del año 2007, en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) en el río Magdalena. Letras diferentes indican diferencias significativas  $p < 0.05$

Los valores de oxígeno disuelto y de la descarga (Q) del río Magdalena fueron significativamente diferentes en todas las épocas de muestreo, presentándose los mayores valores durante la época de lluvias ( $p = 0.000002$ ), ( $p = 0.000076$ ). Las concentraciones de oxígeno disuelto oscilaron entre 5.7 y 13 mg/L (Figura 6), presentando S1 valores significativamente menores con respecto a los sitios S2, S3 y S4 ( $p = 0.007285$ ). Los valores de la descarga del agua del río Magdalena fueron



## Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena

significativamente mayores en los sitios 2, 3, 4 y 5 con respecto al nacimiento del río: S1 y a la zona urbana sitio: S6 ( $p= 0.000002$ ) (Figura 6)..

Los resultados de la correlación entre oxígeno disuelto y descarga del río, mostraron una alta correlación positiva entre estos parámetros (0.682,  $p < 0.01$ ), así como también la temperatura y el pH mostraron una relación alta positiva entre estos parámetros, (0.636,  $p < 0.01$ ), (0.541,  $p < 0.01$ ) (Tabla 3).

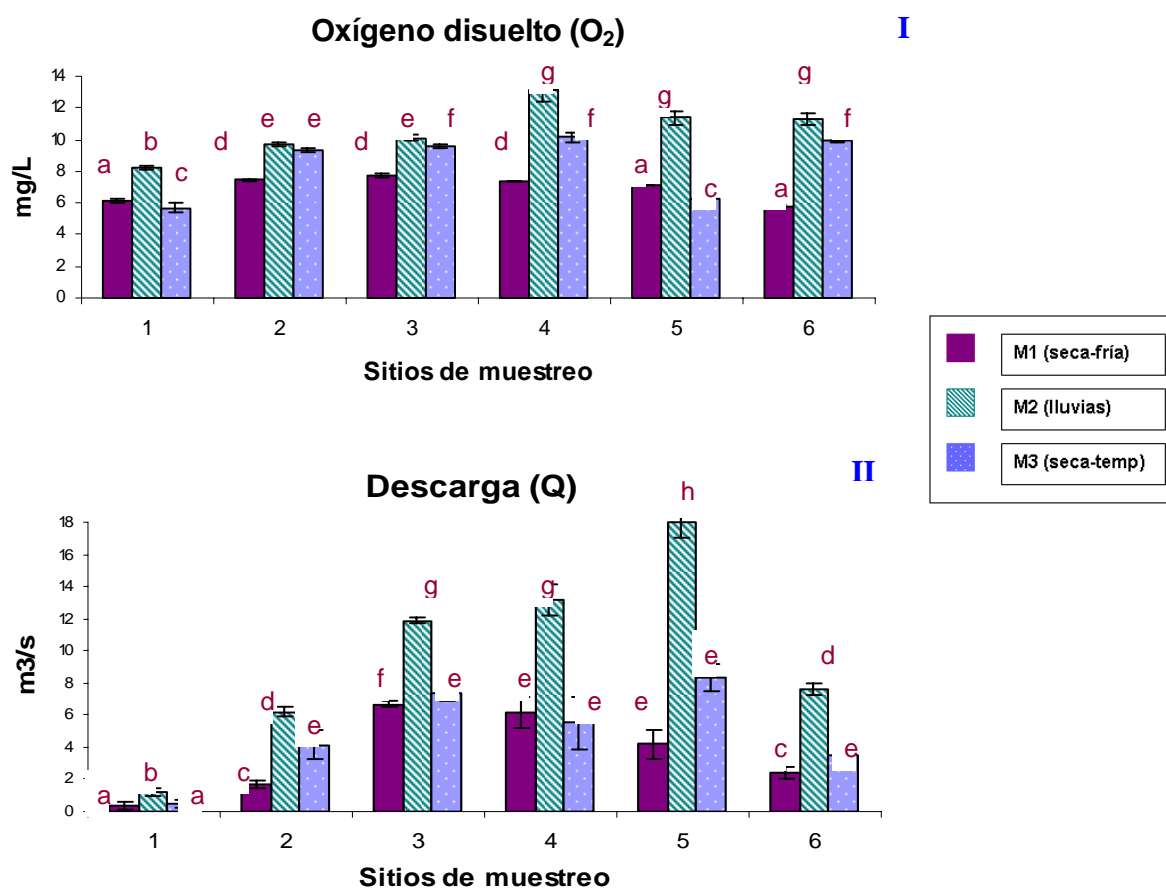


Figura 6. Resultados del oxígeno disuelto (a) que fueron tomados *in situ*, y la descarga (b) del río Magdalena, durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca templada (M3) del año 2007, en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6). Letras diferentes indican diferencias significativas  $p < 0.05$

Los resultados de sólidos disueltos totales medidos *in situ*, y los de sólidos totales y suspendidos medidos en laboratorio, mostraron tendencias similares; presentaron diferencias significativas entre la época de secas-fría (enero) y la época de

*Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

lluvias (julio) ( $p= 0.028756$ ), ( $p= 0.045571$ ), ( $p= 0.018277$ ). Asimismo, para estos parámetros obtuvieron valores significativamente mayores en los sitios con actividad humana (S4, S5 y S6), mostrando un notable incremento en su concentración en el sitio 6 (S6) (Figura 7), donde el río entra a la zona urbana ( $p= 0.000024$ ), ( $p= 0.000013$ ), ( $p= 0.000001$ ).

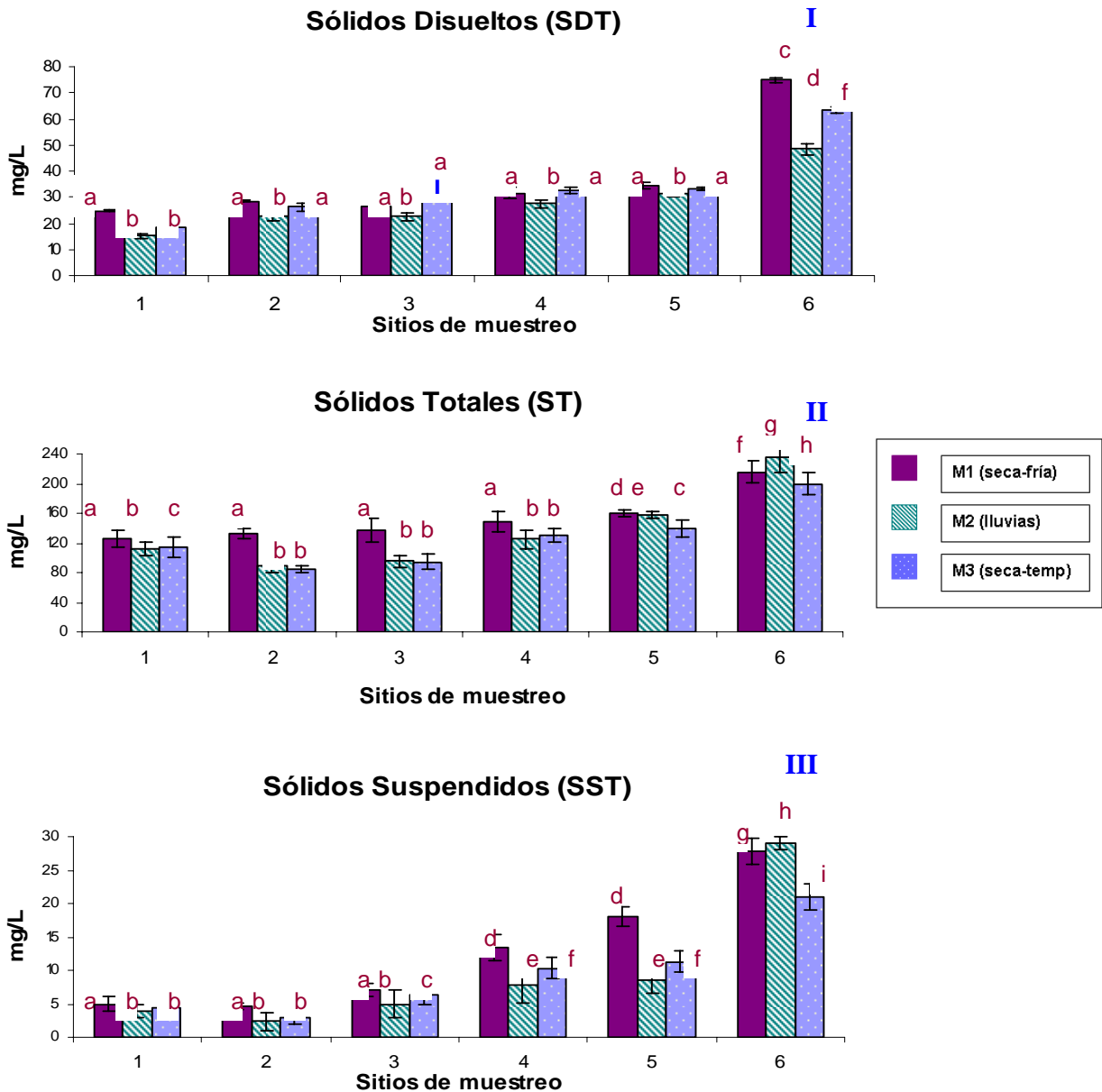


Figura 7. Resultados de sólidos disueltos totales (I) medidos *in situ*, y de sólidos totales (II) y suspendidos (III) obtenidos en laboratorio. Durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca templada (M3)

## Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena

del año 2007, en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) del río Magdalena. Letras diferentes indican diferencias significativas  $p < 0.05$

En cuanto a los análisis de correlación, se encontró una alta relación positiva entre los sólidos disueltos totales (medidos *in situ*), con los sólidos totales y suspendidos (medidos en laboratorio) y entre éstos últimos (0.618,  $p < 0.01$ ), (0.755,  $p < 0.01$ ), (0.907,  $p < 0.01$ ) (Tabla 3).

Los resultados de dureza para calcio y magnesio mostraron comportamientos similares (Figura 8). Los valores de calcio oscilan entre 2.28 y 4.69 mg/L, sin mostrar diferencias entre muestreos, pero si se encontraron valores significativamente menores entre el sitio 5 (S5) y los sitios S1, S2, S3, y S4 ( $p = 0.000576$ ).

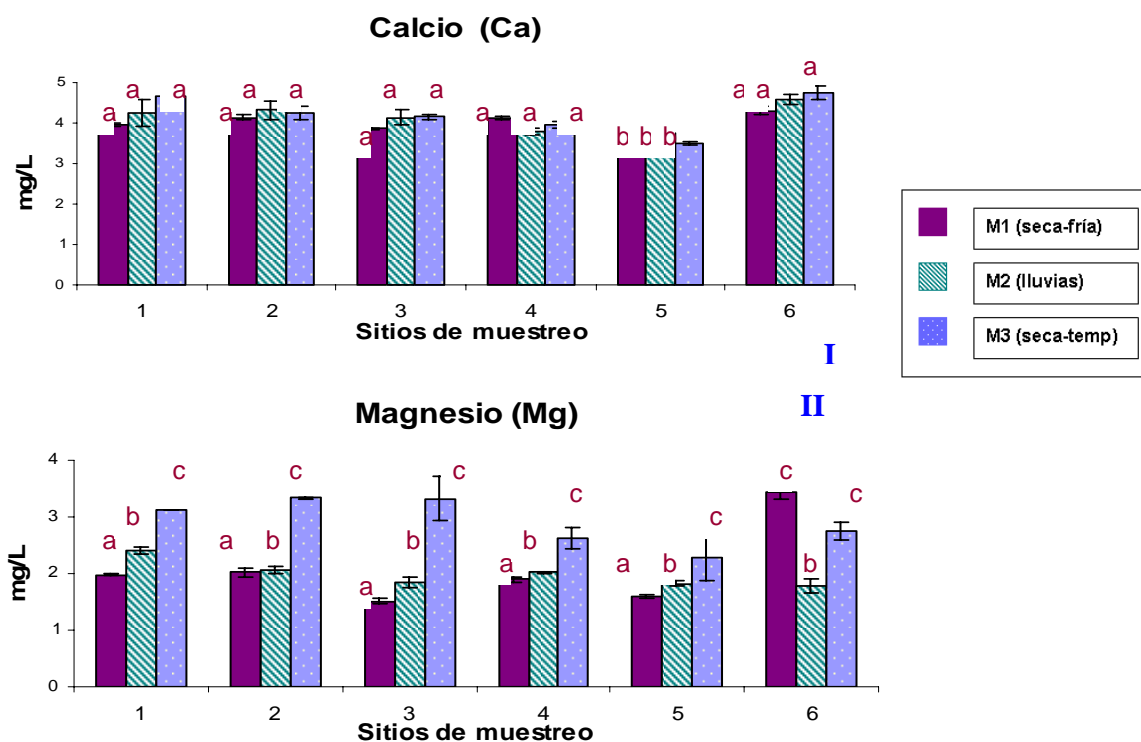


Figura 8. Resultados de dureza para calcio (a) y magnesio (b) obtenidos en laboratorio. Durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca templada (M3) del año 2007, en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) del río Magdalena. Letras diferentes indican diferencias significativas  $p < 0.05$ .

Los valores de magnesio tienen una oscilación de 1.59 - 3.49 mg/L, mientras que los valores de calcio oscilan entre 3.23 - 4.75 mg/L, en ambos no se encontraron

## Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena

diferencias entre los sitios muestreados. Pero si presentan diferencias significativamente mayores entre la época seca templada con respecto a las otras dos épocas (seca-fría y lluviosa), ( $p= 0.000005$ ). En cuanto a su correlación con otras variables, sólo el calcio presenta una relación negativa con los nitratos ( $-0.0446$ ,  $p < 0.05$ ) (Tabla 3).

En el caso del fósforo total (PT) y carbono orgánico total (COT) (Figura 9), en ambos parámetros se encontraron diferencias entre los muestreos de época seca con el muestreo de lluvias, sólo que en el primero los valores son mayores en secas y en el segundo son mayores en lluvias ( $p= 0.000054$ ), ( $p= 0.000104$ ).

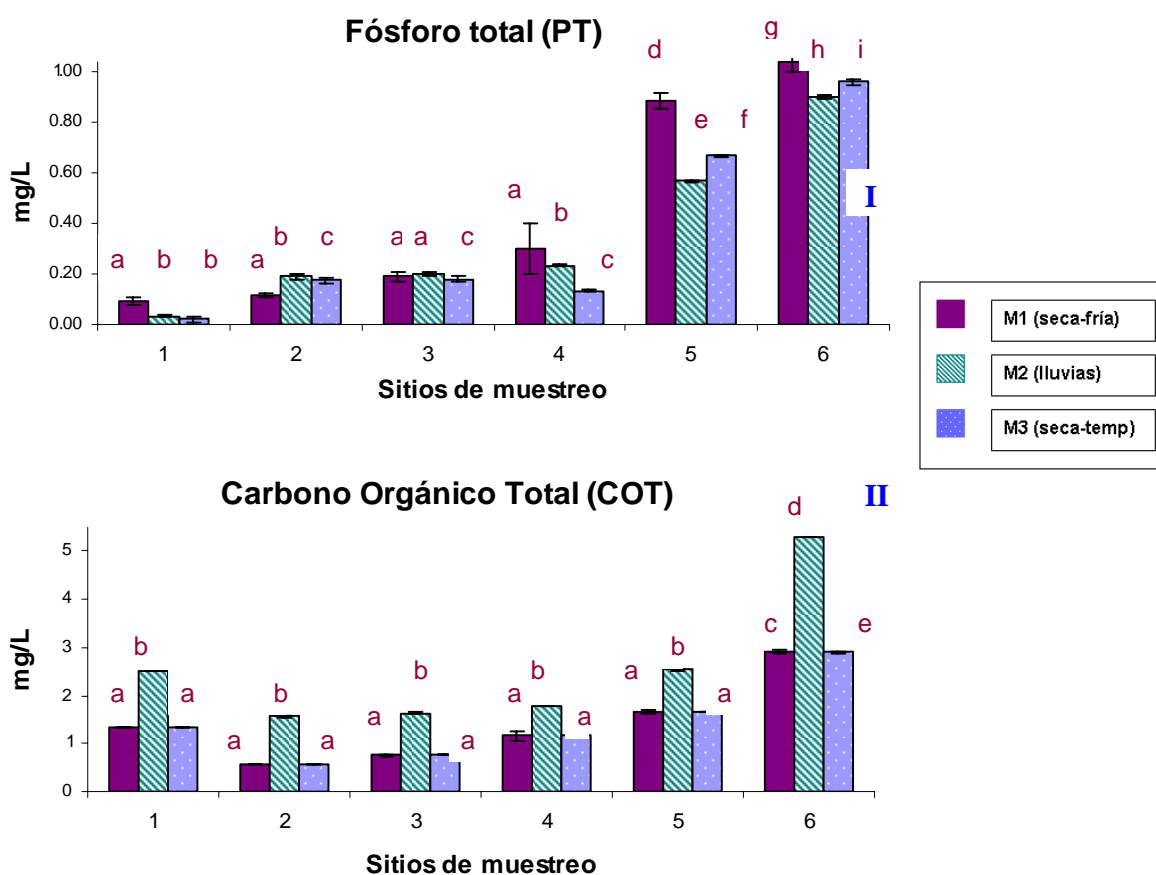


Figura 9. Resultados de fósforo total (a) y carbono orgánico total (b), obtenidos en laboratorio. Durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca templada (M3) del año 2007, en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) del río Magdalena. Letras diferentes indican diferencias significativas  $p < 0.05$

## Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena

Los valores de fósforo total oscilan entre 0.02 y 1.04 mg/L, mostrando valores significativamente más altos en los sitios que se encuentran en la zona urbana; sitios 5 y 6 ( $p= 0.010549$ ). Mientras que los valores de carbono orgánico total oscilan entre 0.47 y 5.30 mg/L, presentando valores significativamente mayores sólo en el sitio 6 (S6) ( $p= 0.0000032$ ).

El PT obtuvo una relación alta positiva con el NT y los nitratos (0.0743,  $p < 0.01$ ), (0.0712,  $p < 0.01$ ). El carbono orgánico total también presentó relación positiva con el nitrógeno total, pero para este parámetro su relación fue con el amonio (0.0445,  $p < 0.01$ ), (0.0661,  $p < 0.01$ ).

Los resultados de NT así como de sus formas autóctonas o externas: amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), mostraron un incremento significativo en las diferentes concentraciones conforme el río entra en una zona con actividades humanas; S4, S5 y S6 ( $p= 0.000012$ ), ( $p= 0.016589$ ), ( $p= 0.000003$ ).

Entre épocas, se registran concentraciones significativamente mayores en la época de secas-fría para NT, y valores mayores significativos de las dos épocas secas (fría y templada) respecto a la época de lluvias para amonio (Figura 10). Mientras que en los nitratos no se encontraron diferencias entre épocas ( $p= 0.000031$ ), ( $p= 0.005287$ ). (Figura 11). Se encontró una alta correlación positiva entre NT y sus formas amonio y nitrato, respectivamente (0.0756,  $p < 0.01$ ), (0.0564,  $p < 0.01$ ) (Tabla 3).

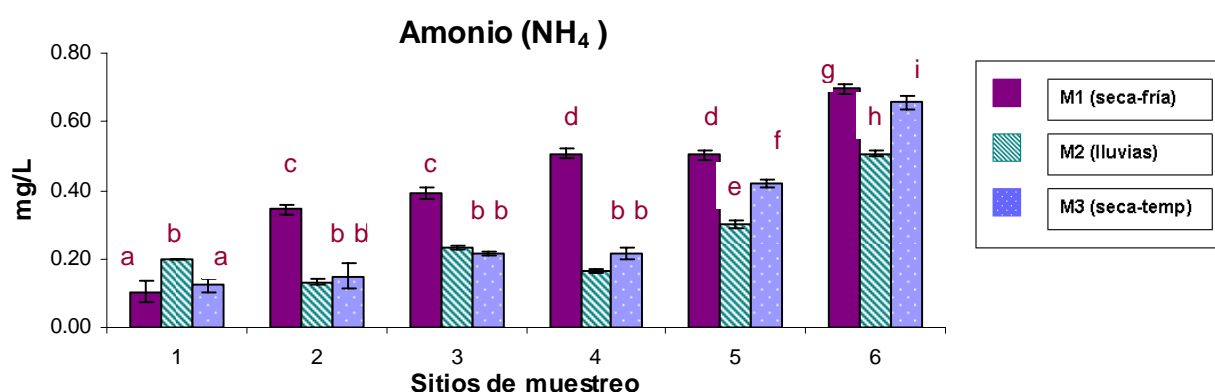


Figura 10. Resultados de amonio, obtenidos en laboratorio. Durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca templada (M3) del año 2007, en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) del río Magdalena. Letras diferentes indican diferencias significativas  $p < 0.05$

## Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena

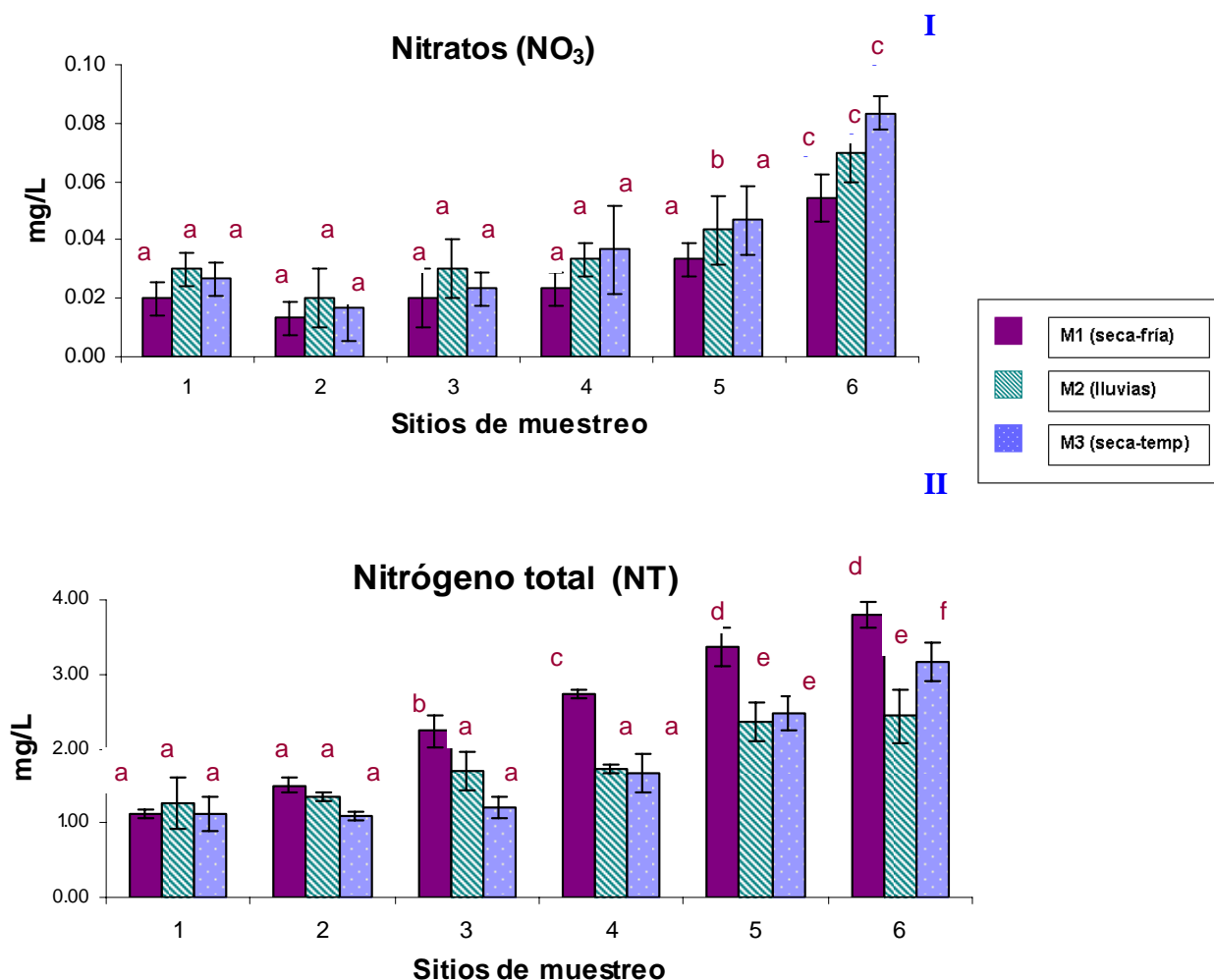


Figura 11. Resultados de nitratos (I) y de nitrógeno total (II), obtenidos en laboratorio. Durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca templada (M3) del año 2007, en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) del río Magdalena. Letras diferentes indican diferencias significativas  $p < 0.05$

### 5.2 Parámetros Bacteriológicos

Los resultados de los análisis bacteriológicos en el río Magdalena muestran que la zona baja (S4 y S5) baja y urbana (S6) presentan conteos con órdenes de magnitud mayores con respecto a la zona alta, esto es tanto para coliformes fecales como para enterococos fecales. Asimismo, se encontraron diferencias significativas entre la época de secas y la época de lluvias para ambos parámetros ( $p = 0.045321$ ). (Figura 12).

*Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

Específicamente para CF el sitio 6 es el que presenta los valores significativamente más elevados, ya que alcanza valores hasta de 658,546 unidades formadoras de colonias por cada 100 mL (UFC/100 mL) durante la época seca (p= 0.000003). Este mismo sitio presenta los valores más elevados para EF 43,000 UFC/100 mL también en la época seca (p= 0.000001).

Ambos parámetros mostraron una alta correlación positiva entre el incremento del número de UFC de los grupos bacterianos con el incremento de las concentraciones de nutrientes: nitrógeno y fósforo total, amonio y nitrato (0.0852, p < 0.01), (0.0638, p < 0.01), (0.0677, p < 0.01), (0.0662, p < 0.01) (Tabla 3).

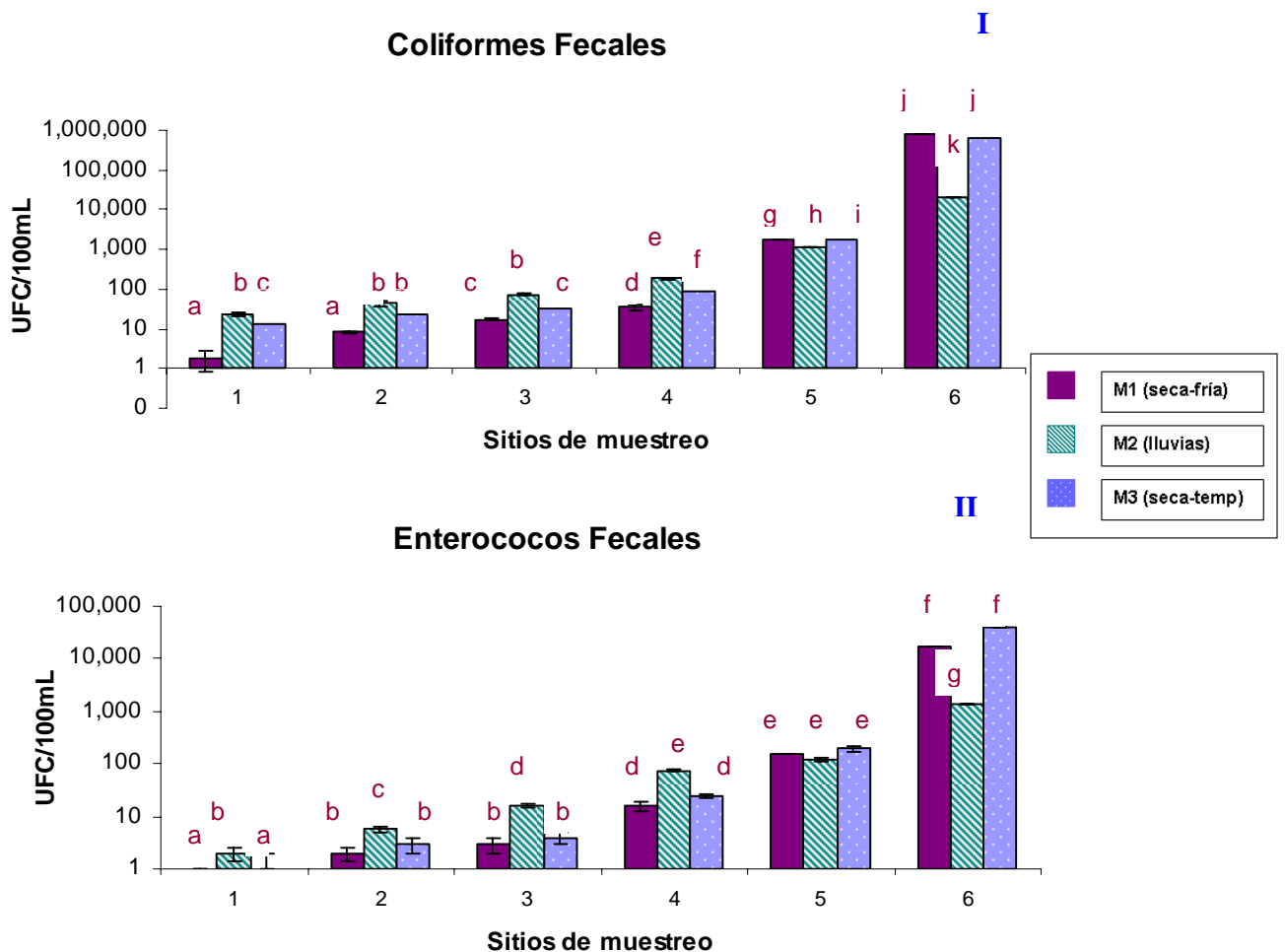


Figura 12. Resultados de coliformes fecales (I) y enterococos fecales (II), en unidades formadoras de colonias por cada 100 mL (UFC/100 mL). Durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca

## Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena

templada (M3) del año 2007, en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) del río Magdalena. Letras diferentes indican diferencias significativas  $p < 0.05$

De acuerdo con el cociente coliformes fecales / enterococos fecales (CF/EF), y con los valores de posible origen, Anexo II, (Toranzos, y Mcfeters; 1996) existe una fuerte evidencia de contaminación de origen humano principalmente en los sitios S4, S5 y S6, mientras que para el sitio 1 (S1), la principal fuente de contaminación es animal (Tabla 1).

CF / EF			
Sitio	M1	M2	M3
S1	1	2	2
S2	2	3	3
S3	4	5	3
S4	5	3	9
S5	18	9	8
S6	34	17	15

Tabla 1. Resultados del cociente CF/EF de los diferentes muestreos M1 (época seca-fría), M2 (época de lluvias) y M3 (época seca templada), en los sitios de muestreo del río Magdalena; S1, S2, S3, S4, S5 y S6. Escala de las categorías del coeficiente CF/EF, >4 origen humano, 2 a 4 mezcla predominante humano, 0.7 a 2 mezcla predominante animal, y < 0.7 origen animal (Toranzos, y Mcfeters 1996).

### 5.2.1. Identificación de bacterias

Del análisis bacteriológico del agua se identificaron un total de 11 especies, agrupadas en siete géneros diferentes a lo largo de los seis sitios, incluyendo las tres épocas de muestreo.

La mayor diversidad de especies se encuentra principalmente en los sitios con mayor actividad humana; S4, S5 y S6 (Tabla 2). De las 11 especies encontradas, cuatro de éstas se consideran especies patógenas (Martins *et al.* 2003) o que tienen influencia directa en el hombre; *Escherichia coli*, *Salmonella paratyphi*, *Klebsiella pneumoniae* y *Enterococcus faecium*; mientras que las restantes son especies patógenas oportunistas.



*Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

Esto nos dice que en general las especies encontradas, pueden considerarse especies de riesgo para la salud humana.

Sitios	Muestreos	Grupo	especie	
S4, S5, S6	Todos	Coliformes fecales	<b><i>Escherichia coli</i></b>	Patógena
S5	Todos		<b><i>Salmonella paratyphi</i></b>	Patógena
S5	Todos		<i>Enterobacter cloacae</i>	P. oportunista
S5	Todos		<b><i>Klebsiella pneumoniae</i></b>	Patógena
S4, S6	M2, M3		<i>Pseudomonas stutzeri</i>	P. oportunista
S6	M1, M2	Enterococos fecales	<i>Enterococcus casseliflavus</i>	P. oportunista
S2, S3, S4, S6	Todos		<i>Enterococcus durans/hirae</i>	P. oportunista
S4, S5, S6	Todos		<i>Enterococcus faecalis</i>	P. oportunista
S2, S3, S4, S5	Todos		<b><i>Enterococcus faecium</i></b>	Patógena
S4	M2		<i>Staphylococcus warneri</i>	P. oportunista
S6	M1, M2		<i>Staphylococcus auricularis</i>	P. oportunista

Tabla 2. Muestra las especies identificadas de coliformes fecales (CF) y enterococos fecales (EF), en las tres épocas de muestreo anual 2007, en los seis diferentes sitios de muestreo (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) del río Magdalena. Donde M1 corresponde a la época seca-fría, M2 a la época de lluvias y M3 a la época seca-templada.

### Análisis de correlación

	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	NT	PT	COT	Ca	Mg	ST	SST	SDT	CF	EF	pH	Temp.	Cond.	O <sub>2</sub>	Q
<b>NH4</b>	1	0.232	.756**	.712**	-0.029	-0.174	0.088	0.265	.273(*)	.762(**)	.677**	.563**	0.050	-0.155	.684**	-.479**	-.360**
<b>N03</b>	0.232	1	.564**	0.195	.661**	-.446**	0.127	<b>.803(**)</b>	<b>.813(**)</b>	.598(**)	.577**	.662**	0.263	.270(*)	.469**	0.259	0.155
<b>NT</b>	.756**	.564**	1	.743**	.445**	-0.265	-0.190	.697(**)	.668(**)	.755(**)	.638**	.527**	.402**	0.254	.854**	-0.109	0.078
<b>PT</b>	.712**	0.195	.743**	1	0.208	0.083	0.080	.432(**)	.386(**)	.620(**)	.540**	0.204	0.129	0.055	.841**	-.396**	-0.174
<b>COT</b>	-0.029	.661**	.445**	0.208	1	-0.083	-0.152	.847(**)	.798(**)	.274(*)	.310*	0.250	.338(*)	.586**	.436**	.285(*)	0.156
<b>Ca</b>	-0.174	-.446**	-0.265	0.083	-0.083	1	0.223	-0.242	-0.250	-.287(*)	-0.132	-.357**	-0.183	0.163	-0.132	-0.003	-0.110
<b>Mg</b>	0.088	0.127	-0.190	0.080	-0.152	0.223	1	-0.028	0.089	.338(*)	.453**	.309*	-.471**	-.346(*)	0.040	-0.187	-.332*
<b>ST</b>	0.265	.803**	.697**	.432**	.847**	-0.242	-0.028	1	.907(**)	.618(**)	.593**	.521**	.363**	.479**	.692**	0.212	0.159
<b>SST</b>	.273*	.813**	.668**	.386**	.798**	-0.250	0.089	.907(**)	1	.684(**)	.631**	.516**	.342(*)	.419**	.735**	.270(*)	0.266
<b>SDT</b>	.762**	.598**	.755**	.620**	.274*	-.287*	.338(*)	.618(**)	.684(**)	1	.948**	.808**	0.183	0.068	.818**	-0.151	-0.100
<b>CF</b>	.677**	.577**	.638**	.540**	.310*	-0.132	.453(**)	.593(**)	.631(**)	.948(**)	1	.852**	0.128	0.133	.696**	-0.172	-0.215
<b>EF</b>	.563**	.662**	.527**	0.204	0.250	-.357**	.309(*)	.521(**)	.516(**)	.808(**)	.852**	1	0.116	0.130	.399**	0.022	-0.177
<b>pH</b>	0.050	0.263	.402**	0.129	.338*	-0.183	-.471(**)	.363(**)	.342(*)	0.183	0.128	0.116	1	<b>.744**</b>	.312*	.541**	.636**
<b>T<sup>o</sup>C</b>	-0.155	.270*	0.254	0.055	.586**	0.163	-.346(*)	.479(**)	.419(**)	0.068	0.133	0.130	.744**	1	0.239	.586**	.548**
<b>Con</b>	.684**	.469**	<b>.854**</b>	<b>.841**</b>	.436**	-0.132	0.040	.692(**)	<b>.735(**)</b>	<b>.818(**)</b>	.696**	.399**	.312(*)	0.239	1	-0.138	0.091
<b>Ox</b>	-.479**	0.259	-0.109	-.396**	.285*	-0.003	-0.187	0.212	.270(*)	-0.151	-0.172	0.022	.541**	.586**	-0.138	1	.682**
<b>Q</b>	-.360**	0.155	0.078	-0.174	0.156	-0.110	-.332(*)	0.159	0.266	-0.100	-0.215	-0.177	.636**	.548**	0.091	.682**	1

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabla 3. Resultados del análisis de correlación. Donde: NH<sub>4</sub> (amonio), NO<sub>3</sub> (nitratos), Ntotal (nitrógeno total), PT (fósforo total), COT (carbono orgánico total), Ca (calcio), Mg (magnesio), ST (sólidos totales), SST (sólidos suspendidos totales), SDT (sólidos disueltos totales), CF (coliformes fecales), EF (enterococos fecales), pH, Temp. (temperatura), Cond. (conductividad), O<sub>2</sub> (oxígeno disuelto), y Q (descarga o caudal del río).

### **Análisis componentes principales**

Los resultados del análisis de componentes principales mostraron que el primer componente explica el 42.7 % el total de la variación, mientras que la suma de los dos primeros explican un 65% del total, es decir entre ambos componentes se explica un porcentaje alto de variabilidad de las 17 variables (Tabla 4). En cuanto a las agrupaciones generadas de los diferentes parámetros: una agrupación fue del oxígeno disuelto con la descarga (Q) de agua del río, otra fue la temperatura con el pH y la última fue la agrupación en la que se encuentran la mayoría de los parámetros, la cual incluye los nutrientes (nitrógeno, fósforo y carbono orgánico totales, así como amonio y nitratos), la conductividad, los sólidos (totales, disueltos y suspendidos) y las bacterias (coliformes y enterococos fecales). Los parámetros de dureza (calcio y magnesio) se muestran fuera de cualquier agrupación (Figura 13). Estos resultados coincidieron con los resultados del análisis de correlación entre variables.

Componente	Eigen valores Iniciales			Sumas de la extracción		
	Total	% de Varianza	Acumulada %	Total	% de Varianza	Acumulada %
1	7.265	42.737	42.737	7.265	42.737	42.737
2	3.791	22.299	65.036	3.791	22.299	65.036
3	1.761	10.362	75.397			
4	1.351	7.947	83.344			
5	1.075	6.323	89.666			
6	.683	4.019	93.685			
7	.297	1.746	95.431			
8	.211	1.241	96.672			
9	.184	1.080	97.752			
10	.129	.759	98.511			
11	.087	.509	99.020			
12	.065	.384	99.404			
13	.049	.289	99.694			
14	.025	.149	99.843			
15	.017	.101	99.944			
16	.007	.042	99.986			
17	.002	.014	100.000			

Tabla 4. Resultados del análisis de componentes principales. Se observa el porcentaje de varianzas entre los 17 componentes principales.

## Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena

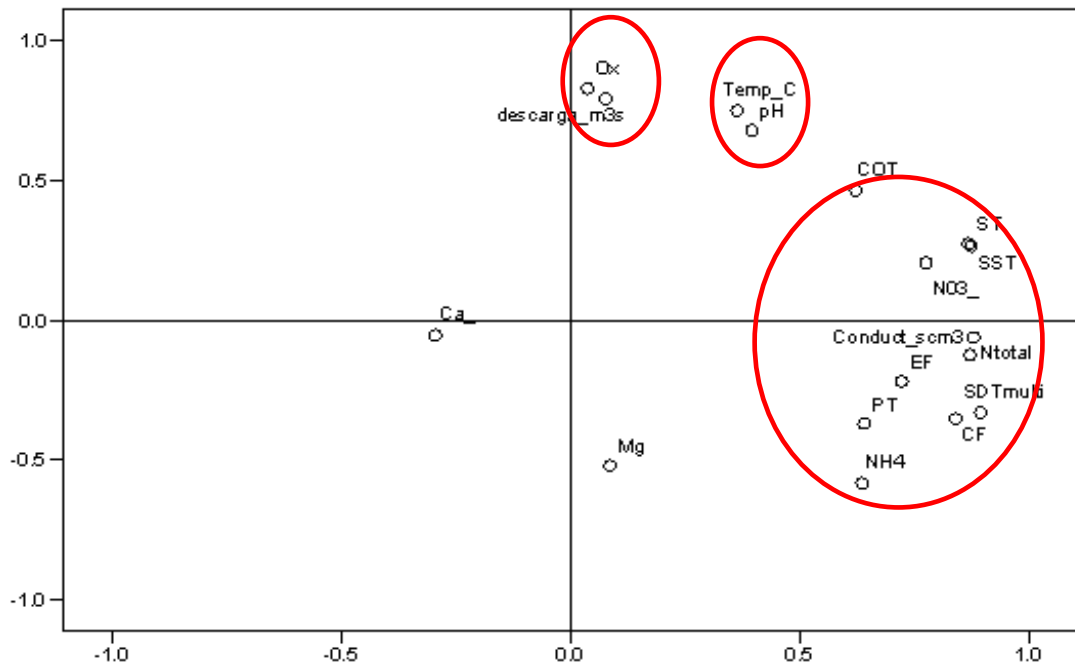


Figura 13. Agrupación de todos los parámetros, resultados del análisis de componentes principales. Donde: Ox (oxígeno disuelto), descarga (caudal del río), Temp. (temperatura), pH, COT (carbono orgánico total), ST (sólidos totales), SST (sólidos suspendidos totales), SDT (sólidos disueltos totales), Conduct. (conductividad), PT (fósforo total), Ntotal (nitrógeno total), NH4 (amonio), NO3 (nitrate), EF (enterococos fecales), CF (coliformes fecales), Ca (calcio) y Mg (magnesio). Durante las tres épocas: seca-fría (M1), lluvias (M2), y seca templada (M3) del año 2007.

## 6. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados generados en este estudio, mismos que concuerdan con los estudios previos con bioindicadores en la zona (Bojorge-García, 2006), se observa que la degradación de la calidad del agua del río Magdalena se va dando de manera gradual, conforme éste entra en contacto con actividades humanas (S4 y S5) y sobre todo en la zona urbana (S6) (Tabla 5). Los resultados muestran el mismo patrón en todas las variables, resumiéndose en dos tendencias: mayores concentraciones en la época de secas, e incremento en los valores de los parámetros observados en los sitios con mayor efecto de las actividades humanas (S4, S5) pero casi al doble en la zona urbana (S6).

Tabla que resume los sitios de muestreo donde se encontraron diferencias significativas

( $p < 0.05$  ANOVAS)

Parámetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Conductividad *					+	+
Oxígeno Disuelto*		+	+	+		
Descarga o Caudal*		+	+	+		
ST y SST				+	+	+
SDT*					+	+
COT						+
P total					+	+
Amonio					+	+
Nitrato					+	+
N total				+	+	+
CF				+	+	+
EF		+	+	+	+	+

Tabla 5. Muestra un resumen de los sitios de muestreo del río Magdalena, donde se encontraron diferencias significativas de los diferentes parámetros. Los parámetros marcados con asterisco \*, son los medidos *in situ*.

### Parámetros fisicoquímicos

El pH es la concentración de cationes  $H^+$  en una solución. Se usa para expresar la intensidad de condición ácida o alcalina. Los valores de pH

registrados en los diferentes sitios de muestreo oscilaron entre los 6.5 y 7.5, sin presentar diferencias entre éstos, siendo valores característicos de sistemas naturales abiertos y se consideran valores neutros (Wetzel, 2001). Además de acuerdo con la norma NOM-001-ECOL-1996 para la vida acuática (DOF, 1997), el pH no supera los valores recomendados por la norma (5-10). Los valores de pH se incrementaron durante la época seca, esto podría deberse a que al elevarse la temperatura durante la época seca, hay mayor evaporación y por lo tanto mayor concentración de iones producto de la disminución del volumen de agua (Lampert y Sommer, 1997; Seoáñez, 1999). Además el pH puede verse afectado por la temperatura, ya que ésta última, al variar disminuye la solubilidad de las sales y gases en agua, lo que provoca a su vez una variación del pH (Marín, 2003; Seoáñez, 1999). Esto se confirma con los valores de la prueba de correlación, ya que los resultados mostraron una alta correlación positiva entre éstas dos variables (0.744,  $p < 0.01$ ).

La temperatura es un factor muy importante en los sistemas acuáticos porque regula los procesos químicos y biológicos (Lampert y Sommer, 1997). Los valores de temperatura encontrados en el río Magdalena en el año 2007 fueron valores muy heterogéneos oscilando entre 5.6<sup>0</sup>C y 14.8<sup>0</sup>C aunque no sobrepasaron los valores indicados para este tipo de sistemas templados en estado prístino (Wetzel, 2001), ni los límites permisibles de protección para la vida acuática para estos sistemas publicados en la NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1997). Los valores de temperatura no presentan diferencias entre los diferentes sitios de muestreo, debido tal vez a las diferencias en las horas de muestreo, mientras que los mayores valores se encontraron durante la época de lluvias con respecto a la época seca; esto se puede explicar por el aumento de la temperatura ambiental durante esta época, al ser éste un sistema templado (INE, 2008; García, 1988; Rzedowski, 1978) y debido a que las variaciones de temperatura del agua se establece por la absorción de radiación en las capas superiores (Marín, 2003).

La conductividad eléctrica del agua se refiere a la mayor o menor resistencia del agua en permitir el paso de la corriente eléctrica. Así el agua en estado puro, no presenta carácter conductor, debido al bajo grado de disolución iónica, ya que para que exista conductividad es necesario que existan compuestos disueltos en agua y disociaciones en los iones (Seoáñez, 1999).

## *Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

Con lo anterior se puede decir que la conductividad indica la presencia de sales en una solución, lo que explica su alta relación con los resultados obtenidos de sólidos disueltos (filtrables), ya que de acuerdo con Margalef (1983), el total de sólidos disueltos es una medida de iones en solución. Por esta razón, estos parámetros se utilizan como indicadores de contaminación de cuerpos acuáticos.

Ambos parámetros, la conductividad y los sólidos disueltos, presentaron valores significativamente mayores en la época de secas, ya que durante ésta los compuestos disueltos en el agua disociados en iones se encuentran en menor volumen (Seoáñez, 1999), lo que sugiere que en época de lluvias éstos nutrientes están diluidos. En cuanto a los sitios de muestreo, se encontraron valores mayores en los sitios de la zona urbana en ambos parámetros: conductividad y sólidos disueltos, producto del aporte de aguas residuales que tienen un alto contenido de nutrientes e iones. Lo anterior se puede comprobar por las altas correlaciones encontradas entre la conductividad con los sólidos totales y los sólidos disueltos principalmente, así como con los nutrientes como el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrógeno total (NT), y fósforo total (PT).

Específicamente, los valores de conductividad oscilaron entre 24 y 95  $\mu\text{S/cm}$  presentando valores más altos en los sitios del río que se encuentran en la zona baja (S4 y S5) y urbana (S6), lo cual es indicador de incremento en la contaminación del agua. En agua para consumo humano el límite reportado es de 50  $\mu\text{S/cm}$  (APHA, 2005), valor que se encontró en la zona alta del río (S1, S2, S3).

Los resultados de sólidos totales (ST), así como de los sólidos suspendidos (SST) obtenidos en laboratorio, y los de sólidos disueltos (SDT) medidos *in situ* (Figura 7), mostraron tendencias similares; mayores concentraciones en la época fría y en los sitios del río que se encuentran en la zona baja (S4, S5) y la urbana (S6). Esto puede explicarse porque en éstos sitios hay una mayor contribución de compuestos edáficos (como sales inorgánicas y materia orgánica) al cuerpo de agua, producto de las actividades humanas en estos sitios.

## *Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

En particular, los valores de sólidos disueltos (SDT) medidos *in situ* oscilaron entre 15.4 y 80 mg/L, incrementándose conforme se avanza hacia la zona urbana, encontrándose sólo en los sitios de la cuenca alta (S1, S2 y S3) por debajo de los límites permisibles para protección de la vida acuática (30 mg /L), según la Ley federal de derechos de agua (DOF, 2007), por lo que se puede decir que existe un deterioro importante en la calidad del agua en la zona baja del río. Lo anterior, comprueba porque éste tipo de sólidos son utilizados como un indicadores de contaminación de cuerpos de agua, ya que se componen de moléculas e iones que se encuentran diluidos en agua, como minerales, gases producto de la descomposición de la materia orgánica, metales y compuestos orgánicos que dan color, olor, sabor y eventualmente toxicidad al agua que los contiene (Jiménez, 2001; Marín, 2003).

La dureza del agua esta relacionada con el contenido de sales de calcio y magnesio (Wetzel, 2001). Los resultados de dureza para calcio (2 - 4.5 mg/L) y magnesio (1.5 - 3.5 mg/L) se encuentran dentro del rango de aguas suaves o blandas, presentando el primero mayores concentraciones debido a que éste parámetro es generalmente más abundante en los sistemas acuáticos (Reid y Wood, 1976). El magnesio presentó valores mayores durante la época seca, lo que esta indicando su acumulación durante ésta época y que coincide con los resultados de pH y conductividad.

El oxígeno disuelto en cuerpos acuáticos disminuye su solubilidad al aumentar la temperatura (Wetzel, 2001; Lampert y Sommer, 1997), esto haría suponer que existiría menos oxígeno disuelto durante la época de lluvias por el aumento de la temperatura en el río Magdalena. Sin embargo el comportamiento del oxígeno disuelto en los sistemas lóticos (con flujo de agua unidireccional), como el caso del río Magdalena es diferente, ya que en este tipo de sistemas el agua tiene altos contenidos de oxígeno disuelto por el constante flujo de agua, esto es un factor muy importante en la autopurificación de los ríos (Reid y Wood, 1976; Romero-Rojas, 1999). Lo anterior explica los resultados obtenidos en el río Magdalena de oxígeno disuelto y el caudal del río, los cuales presentaron valores significativamente más altos en la época de lluvias (Figura 6), ésto puede explicarse por el aumento en el caudal del río, el cual se refiere al aumento del volumen en un cauce, y está directamente relacionada con la velocidad de corriente que representa una fuerza física



## *Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

directa, afectando el movimiento del río, lo que provoca a su vez un aumento de la concentración de oxígeno al aumentar la solubilidad (Wetzel, 2001). Esto también se pudo comprobar con la alta correlación positiva entre oxígeno disuelto y el caudal (0.682,  $p < 0.01$ ), y un alto porcentaje de agrupación en el análisis de componentes principales entre estos parámetros (Figura 13).

En cuanto a los sitios de muestreo, el oxígeno disuelto presentó valores menores en el nacimiento del río (S1) y en la zona baja del río (S4, S5), y en la zona urbana (S6). El primer caso puede explicarse debido a que el nacimiento del río se encuentra en el sitio más alto (3,568 msnm), y la concentración de oxígeno disuelto disminuye con la altura (Reid y Wood, 1976), y a que no existen crecimientos algales, ni musgos, debido a la falta de sustratos estables, mientras que en los sitios de la zona baja del río y en la zona urbana, la disminución de este parámetro puede deberse al aporte de aguas residuales en esta zona. Sin embargo, en todos los sitios incluso en los que se encuentran en la zona urbana, los valores se encuentran dentro de lo reportado para aguas superficiales con flujo de corriente no contaminadas que suelen estar bien oxigenadas e incluso sobresaturadas ( $> 7 - 8$  mg/L de  $O_2$ ) debido tal vez al intercambio gaseoso atmósfera-agua y a la actividad fotosintética por el flujo constante del agua en el río (Marín, 2003). Los resultados de correlación de la temperatura y el pH mostraron una relación alta positiva con estos parámetros, (0.636,  $p < 0.01$ ), (0.541,  $p < 0.01$ ) (Tabla 3).

El caudal o descarga del río (Q) se determina por la velocidad de corriente o flujo de agua. Los valores de Q del río fueron en aumento (0.12 – 8.14  $m^3/s$ ) desde el nacimiento del río conforme éste va descendiendo, por gravedad y por los efluentes, a excepción del último sitio (S6) que se encuentra en la zona urbana donde disminuye por desvío previo (S5) para dos plantas potabilizadoras de agua y varios entubamientos previos a este sitio.

En cuanto a los resultados de nutrientes, se observa que el fósforo total (PT) y nitrógeno total (NT), así como de los componentes nitrogenados alóctonos de éste último: amonio ( $NH_4^+$ ) y nitratos ( $NO_3^-$ ), los mayores valores se encontraron durante las épocas de secas. Lo anterior puede deberse a que durante la época de secas existe una mayor acumulación de nutrientes en menor cantidad de agua. Los mayores valores de nutrientes (Figura 10 y 11) se encontraron en los sitios de la zona baja (S4, S5) y en la zona urbana (S6),

## *Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

debido al vertimiento de aguas residuales y las actividades humanas realizadas en estas zonas. El comportamiento similar entre el nitrógeno total y sus componentes alóctonos: amonio y nitratos se comprueba con la alta relación positiva entre éstos (0.0756,  $p < 0.01$ ), (0.0564,  $p < 0.01$ ) (Tabla 3).

El fósforo juega un papel importante en el metabolismo de los ecosistemas (Wetzel, 2001). De acuerdo con Goldman (1994), en aguas templadas se considera al fósforo como limitante para el desarrollo de los organismos acuáticos. Los valores de fósforo total (PT) oscilan entre 0.02 y 1.04 mg/L, mostrando valores significativamente más altos en los sitios que se encuentran en la zona baja (S5) y en la zona urbana (S6). Superando en éstos dos últimos sitios los valores reportados de fósforo en aguas naturales de 1 mg/L debido principalmente al aporte de aguas residuales domésticas, ya que un agua residual doméstica puede tener hasta más de 15 mg/L (Marin, 2003). Además en las partes bajas también se ve reflejado el aporte de este nutriente, que puede deberse a el arrastre natural por disolución de rocas de las partes elevadas de la cuenca, y al aporte del lavado de suelos por la aplicación de fertilizantes en la zona alta y media de la cuenca y que son drenados hacia el cuerpo de agua (APHA, 2005). En cuanto a los resultados por época, se obtuvieron valores mayores durante la época seca, lo que concuerda con otros estudios realizados en un arroyo durante dos años realizados por Meyer y Likens (1979), donde se observó que los reservorios permanentes de fósforo del ecosistema del arroyo se veían reducidos en los años lluviosos por los altos niveles de exportación.

En el río Magdalena se observa que la fuente de nitrógeno es principalmente externa o alóctona (importado de otro ecosistema), por el aporte natural de materia orgánica producto de mineralización del mantillo del bosque, y por contaminación agrícola y ganadera en las partes altas de la cuenca (S1, S2, S3), y en los sitios de la zona baja (S4, S5) y urbana (S6) por aporte de aguas residuales. Esto se ve reflejado en los resultados de nitrógeno total (NT) en el río Magdalena, ya que oscilaron entre 1.13 y 3.80 mg/L, rebasando en los dos últimos sitios los límites reportados por Campbell (1987) de NT en ríos y aguas sin contaminación fuerte ya que es de 0.1 - 3 mg/L. Lo anterior, sugiere que la principal fuente de contaminación en el río Magdalena; y que además

esta teniendo un impacto en el mismo, es el aporte de aguas residuales en la parte baja de la cuenca.

El amonio se presenta naturalmente en aguas superficiales producto de la hidrólisis de la urea (APHA, 2005). También es aportado por desechos agrícolas y domésticos y agrícolas (Seoáñez, 1999). En el río Magdalena los valores de amonio encontrados oscilan entre 0.10 y 0.80 mg/L, y aunque no sobrepasan el rango propuesto por Seoáñez (1999) para aguas superficiales bien aireadas y que contienen poco amonio (no más de 100 mg/L), sin embargo, se observa un aumento en su concentración conforme el río entra en contacto con actividades humanas (S4 y S5) (Figura 10), mostrando un incremento súbito del contenido de amonio en el sitio de la zona urbana (S6) (0.20 a 0.50 mg/L ) superando en éstos últimos sitios del río (S4, S5 y S6), los límites permisibles para uso y consumo humano (0.50 mg/L) según la norma de salud ambiental NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000), lo cual en un agua implica la presencia de aguas residuales y serios problemas de purificación, con altas demandas de cloro sobre todo en éste ultimo sitio. Además los valores empiezan a ser concentraciones cercanas a 1 mg/L, características de agua con contaminación reciente de agua residual, que si persisten en el sitio o aumentan pueden resultar de gran peligro potencial para la salud de la población local (Seoáñez, 1999; Romero-Rojas, 1999; Wetzel, 2001).

Los valores de nitrógeno en forma de nitratos son importantes para evaluar la contaminación de ríos, por una parte porque es uno de los elementos esenciales para el crecimiento de algas (Campbell, 1987). En el río Magdalena los resultados de nitratos oscilan entre 0.1 a 0.8 mg/L, teniendo la misma tendencia que el amonio, ya que se observó un aumento considerable en las zonas bajas de la cuenca, en donde el río entra en contacto con las actividades humanas (S4 y S5) y en la zona urbana (S6). Su presencia en la parte alta puede deberse a la disolución de rocas y lixiviación o lavado del suelo, así como a la presencia de ganado, mientras que su aumento en la parte baja puede deberse a la presencia de este nutriente en detergentes o aguas residuales provenientes de la zona urbana (Seoáñez, 1999). Sin embargo, en todos los sitios evaluados los valores encontrados son considerados para ríos y aguas sin contaminación (0.1 -1 mg/L) (Romero-Rojas, 1999; Marin, 2003). Esto puede explicarse, debido a que los nitratos son un estado de oxidación

final del nitrógeno y pueden haber sido reducidos a nitrógeno molecular ( $N_2$ ) mediante el proceso de desnitrificación, explicando así mismo la disminución de los niveles de oxígeno en estos sitios, ya que éste último parámetro es necesario para este proceso (Romero-Rojas, 1999), dado que los nitratos son una forma disponible para los organismos acuáticos (Lampert y Sommer, 1997).

Mientras que para las concentraciones registradas de carbono orgánico total (COT), los valores más altos se registraron durante la época de lluvias, esto puede deberse a que hay mayor incorporación de materia orgánica por arrastre durante esta época. Aunque los valores encontrados de COT en el río Magdalena, se encuentran por debajo de las concentración promedio que se encuentra en lagos libres de contaminación, que es de 30 mg/L como máximo (Wetzel, 1981), se observa un aumento a más del doble en la zona urbana (S6) (de 1.3 a 5.3 mg 7L), lo cual puede explicarse por el aporte de aguas residuales de origen doméstico en esta zona.

### **Eutroficación**

Cuando se habla de degradación en los sistemas acuáticos, generalmente se asocia con eutrofización, el cual es un proceso natural de maduración o envejecimiento y se enfoca generalmente a sistemas lénticos o lagos (Lampert y Sommer, 1997), y consiste en el enriquecimiento natural del agua con nutrientes. En condiciones naturales, la eutroficación no se considera como contaminación del agua, ya que tiene lugar de manera natural y en parte es necesaria para que pueda subsistir la vida acuática. Sin embargo, este fenómeno se convierte en un problema ambiental cuando las actividades humanas provocan la liberación de grandes cantidades de materia orgánica en los ecosistemas acuáticos lo que genera el incremento sustancial de nutrientes (Lampert y Sommer, 1997). El nitrógeno y el fósforo son elementos identificados con la eutroficación y están presentes en aguas naturales, pero sus concentraciones han aumentado considerablemente por la actividad humana, y por tanto aumentar las tasas de crecimientos de organismos acuáticos como productores primarios como las algas (Wetzel, 2001).

La eutroficación en los sistemas lénticos ha sido evaluada por diferentes investigadores a través de la medición de nitrógeno y fósforo de acuerdo a

ciertos intervalos (Manson, 1991). Sin embargo, en el caso de los sistemas lóticos como es el caso de los ríos, es muy complicado establecer intervalos para identificar el grado de eutrofización de los mismos, debido a que son sistemas mucho más dinámicos donde el tiempo de retención de nutrientes es mucho menor que en los lagos (Hilton *et al.* 2006), y la tasa de intercambio atmosférico es mucho mayor, por lo cual un estado de anoxia es muy raro en este tipo de sistemas (Dodds, 2006). Por lo anterior, un parámetro de gran importancia para determinar el grado de eutrofización en los ríos es la velocidad del agua o velocidad corriente (Q). De acuerdo a Briggs (1996) el aumento de la velocidad del agua en los ríos evita la acumulación de los nutrientes, lo que trae consigo una limitación de recursos (nutrientes) necesarios para el crecimiento de ciertas algas, además de la remoción física de éstas y el impedimento de la proliferación de cierta especies de algas (algunas macrófitas) por el disturbio que genera el aumento de este parámetro. Esta es una de las razones por la cual diversos autores (Reid y Wood, 1976; Romero-Rojas, 1999) mencionan el efecto autodepurador que tienen los ríos por el constante flujo de agua y que esta altamente relacionado con la velocidad de corriente y el oxígeno disuelto en el agua.

Por lo anterior se puede decir, que en el caso específico del río Magdalena no se puede hablar de un estado eutrófico del mismo, debido a los altos valores de de la velocidad corriente y del oxígeno que presenta, los cuales son opuestos a este proceso. Sin embargo se puede hablar de un notable cambio de la calidad del agua cuando el río entra en contacto con las actividades humanas (S4 y S5) y en la zona urbana (S6), lo cual se ve reflejado en el incremento en las concentraciones de nutrientes. Esto a su vez se refleja en el análisis de componentes principales, debido a que en este análisis se obtuvo una agrupación de los nutrientes (PT, NT, amonio y nitratos), con los parámetros físicos (conductividad, sólidos totales, suspendidos y disueltos), y con ambos grupos microbiológicos reflejando así mismo un efecto de contaminación por materia orgánica producto de las aguas residuales en ésta zona del río.

Por otro parte, el aumento en los aportes de nutrientes en el río Magdalena trae consigo por un lado una menor diversidad de productores primarios de acuerdo a lo reportado por Bojorge-García (2006) quien encontró

que en la zona baja del río Magdalena, existe una disminución de la riqueza específica y del número de especies (diatomeas y comunidades algales) producto del incremento en la concentración de nutrientes en el mismo, y por otro lado se observa un aumento en las bacterias evaluadas en este estudio conforme la concentración de los nutrimentos fue mayor. Esta respuesta antagónica brinda información muy importante y complementaria para estudios de la calidad de agua.

Por lo anterior, se puede decir que el cambio de la calidad del agua en esta parte del río (parte baja: S4, S5 y zona urbana S6), indica que el agua ha sufrido una fuerte modificación por la presencia de expendios de alimento, estanques de trucha, fauna doméstica, y el incremento de visitantes, así como en el último sitio (S6) por la incorporación de aguas negras a través de drenajes clandestinos que desembocan en él, así como aumento de residuos sólidos (pañales, bolsas de plástico y plásticos) a las orillas del cauce.

### **Parámetros bacteriológicos**

En las aguas del río Magdalena se encontraron coliformes fecales en los seis sitios de muestreo, observándose un aumento gradual conforme el río entra a la zona urbana, con conteos desde uno hasta seis órdenes de magnitud (Figura 14). Específicamente para CF el sitio 6 (S6) es el que presenta los valores significativamente más elevados, ya que alcanza valores hasta de 658,546 UFC/100 ml durante la época seca. De acuerdo con los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-2000, para agua de uso y consumo humano como límite permisible de calidad, los conteos de coliformes fecales no deben estar presentes en el agua, y en todos los sitios en el río Magdalena rebasan este límite. Además de acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2007), se sobrepasa la cantidad de coliformes fecales (1000 UFC/100mL) en la parte baja, en los dos últimos sitios; S5 y S6. Ésto sugiere, que estos sitios (S5 y S6), existe una fuerte contaminación microbiológica, y el agua no es segura para consumo humano, actividades recreativas y es un riesgo para la salud de la población local por el potencial de provocar enfermedades gastrointestinales (Gerba, 2000; Koneman *et al.*, 2003),

Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena

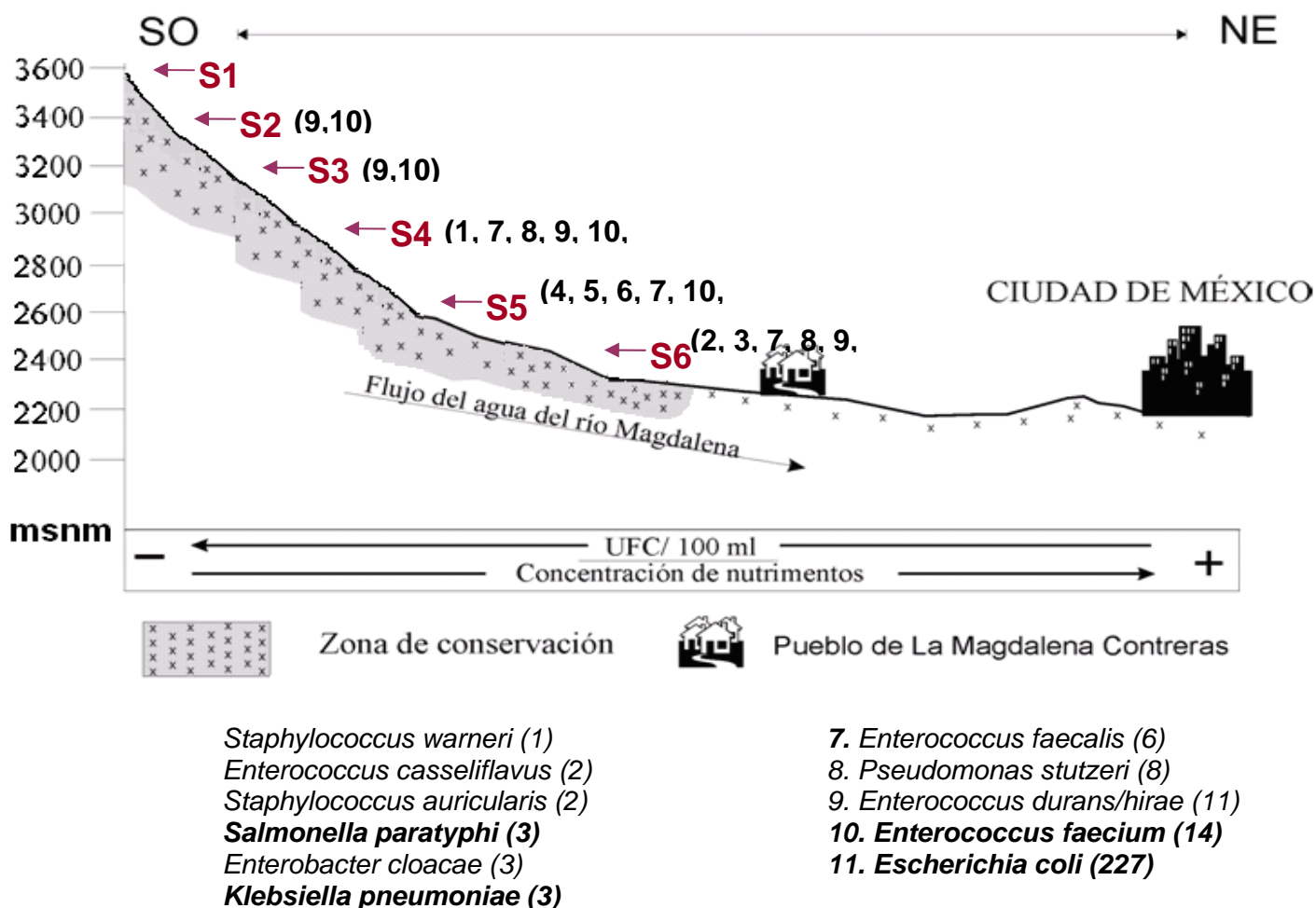


Figura 14.- Variación de los indicadores bacteriológicos en UFC/ 100 ml, de acuerdo al gradiente altitudinal y de contaminación. S1 (3,600 msnm); S2 (3,370 msnm); S3 (3,250 msnm); S4 (2,801 msnm); S5 (2,530 msnm) y S6 (2,308 msnm). Los números representan las especies, el orden está en función de la abundancia de menor a mayor. Las especies que se encuentran en rojo, son especies patógenas y las restantes son patógenas oportunistas.

Los resultados para enterococos fecales (EF) encontrados en el río Magdalena muestran la misma tendencia que en el caso de los coliformes fecales (CF), es decir, la zona urbana presenta conteos hasta con cinco órdenes de magnitud mayores con respecto a la zona alta. También, en el último sitio (S6) se presentan los valores más elevados de 43,000 UFC/100 mL ( $p= 0.000001$ ). Además, de acuerdo a las guías de calidad del agua de la Agencia de Protección del ambiente, (por sus siglas en inglés EPA), éste último sitio (S6) de la parte baja de la cuenca se sobrepasan el límite de 3, 300 UFC/100 mL para aguas recreativas en relación a enterococos fecales (Koneman et al., 2003; APHA, 2005).

## *Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

Ambos grupos de organismos CF y EF, mostraron una alta relación positiva entre el incremento del número de UFC/100 mL de los grupos bacterianos con el incremento de las concentraciones de nutrientes como es el caso del nitrógeno y fósforo total, amonio y nitrato (0.0852,  $p < 0.01$ ), (0.0638,  $p < 0.01$ ), (0.0677,  $p < 0.01$ ), (0.0662,  $p < 0.01$ ), lo que sugiere que el aumento en los grupos bacterianos está directamente relacionado con el incremento en las concentraciones de nutrientes. Esto coincide, con lo reportado por Mangas-Ramírez y Elias-Gutiérrez (2004), quienes encontraron que las descargas de origen urbano de dos ríos en la Ciudad de Puebla que desembocan en el embalse Manuel Ávila Camacho, favorecieron un incremento en las concentraciones de compuestos nitrogenados, debido a gran cantidad de materia orgánica, además de favorecer el desarrollo de comunidades bacterianas de origen fecal (Bonilla, 2007). En el caso específico del río Magdalena, los ingresos de nutrientes pueden deberse a las descargas de origen antropogénico como producto de la descomposición de la materia fecal.

Aunque el uso de estos dos grupos de organismos, es de gran utilidad en el área de salud como indicadores de contaminación de origen fecal, su aislamiento no permite distinguir si la contaminación proviene de excretas humanas o de animales, lo cual es de gran importancia para detectar las fuentes de contaminación y poder prevenir fuentes de infección. Esto no significa menospreciar la de origen animal, especialmente dada la existencia de [zoonosis](#), enfermedades que son comunes al hombre y animales, que también se pueden transmitir por el agua (Gerba, 2000). Por esto, se utiliza el cociente coliformes fecales / enterococos fecales (CF/EF) (Toranzos, 1996) que puede ser de gran utilidad para la determinación del origen humano o animal de la contaminación de manera rápida. Cuando el cociente CF/EF es mayor de 4 se trataría de una contaminación fecal de origen humano; cuando CF/EF es menor de 0.7 la contaminación es de origen animal; y en el intervalo entre 4 y 0.7 no se puede interpretar el origen de la contaminación, e incluso puede tratarse de una contaminación mixta humana-animal (Anexo II). De acuerdo con los valores obtenidos de este cociente en los sitios del río Magdalena, se encontró que existe una evidencia de contaminación fecal mixta, predominando la de origen humano, principalmente en los sitios donde el río entra en contacto con actividades humanas (S4, S5), pero sobre todo en la zona urbana (S6),



mientras que para el sitio 1 (S1), la principal fuente de contaminación parece ser de origen animal (Tabla 1). Esto confirma el riesgo de salud que existe entre la población local.

### **Identificación de bacterias**

Del análisis bacteriológico del agua de los grupos coliformes y enterococos fecales, se identificaron en total 11 especies, agrupadas en siete géneros, localizándose una mayor diversidad de especies en los sitios con actividad humana del río Magdalena; S4, S5 y S6 (Tabla 2). De las cuales, se identificaron cuatro especies patógenas y siete especies patógenas oportunistas. Esto nos dice que en general las especies encontradas, pueden considerarse especies de riesgo potencial para la salud humana, ya que al menos en los sitios S4 y S5 la gente puede beber agua de estos sitios debido a la apariencia cristalina y la ausencia de olor que presenta.

Dentro de las especies patógenas o de peligro potencial porque tienen la influencia directa en el hombre para causar enfermedades se identificaron; *Escherichia coli*, *Salmonella paratyphi*, *Klebsiella pneumoniae* y *Enterococcus faecium* (apéndice 1) (Granato, 2003; Martins *et al.* 2003). En general se necesita una dosis infectiva alta de estas especies 10-10,000 millones UFC/ml para generar enfermedades en el hombre (APHA, 2005):

- a) ***Escherichia coli*** se encontró en todos los muestreos del río en los sitios con mayor actividad humana; S4, S5 y S6. Sin embargo, se necesita una dosis infectiva alta de esta especie para generar enfermedades en el hombre; 10-10,000 millones UFC/ml (APHA, 2005), y sólo se obtuvieron conteos de 1 a 100 UFC/100 ml, por lo que aún no se puede considerar un riesgo para la salud de la población, aunque si se deben tomar medidas precautorias al respecto y además es evidente que la presencia de esta bacteria se debe al aporte de aguas residuales domésticas (puestos de comida y drenajes de casas habitación), localizadas principalmente en los sitios del río Magdalena donde fue encontrada.
- b) ***Salmonella paratyphi***, se encontró en todos los muestreos, pero solo en el sitio 5 (S5) con conteos de 20 UFC/100 ml, siendo necesaria una inoculación grande de esta especie, de 10 a 100 millones de organismos

/ ml para provocar los síntomas en humanos saludables, según estudios hechos con voluntarios (Owens, 2008). Por lo anterior, se puede decir que aunque no representa un riesgo para la salud de la población, sin embargo es un indicio de suma importancia de la presencia de esta especie en el sitio, el cual se caracteriza por vertimiento de aguas residuales producto de puestos de comida río arriba, lo que podría estar indicando que la bacteria pudiera provenir de la comida o de las aguas residuales que se generan en el sitio.

- c) *Klebsiella pneumoniae*.** Esta especie necesita una dosis infectiva muy alta de entre 1000 a 100,000 millones UFC/ml (APHA, 2005), y en el río Magdalena se obtuvieron 20 UFC/100 ml y al igual que la especie patógena *Salmonella paratyphi* también se encontró en todos los muestreos y sólo en el sitio de muestreo (S5), por lo que se sugiere que existe una constante contaminación aportada al río en ese sitio y podría ser de peligro potencial para la población local y los visitantes si esta aumentará, ya que este sitio se utiliza el agua para actividades recreativas y hasta para uso y consumo humano por su aspecto cristalino y sin olor.
- d) *Enterococcus faecium*.** Esta especie se encontró en todos los muestreos en casi todos los sitios muestreados del río Magdalena (S2, S3, S4, S5), excepto en el nacimiento del río (S1) y en la zona urbana (S6), al encontrarse en la zona alta puede estar indicando que la presencia de esta especie puede ser de origen animal y no exclusivamente de humano. Sin embargo, en los dos primeros sitios (S2 y S3), se obtuvieron conteos de 1 UFC/100ml, mientras en los dos últimos sitios (S4 y S5) se obtuvieron conteos mucho mayores de 20 UFC/100ml en el sitio S4, y de 1000 UFC/100ml en el sitio S5, y aunque la dosis infectiva se desconoce, se observa un aumento considerable de esta especie en los sitios que tienen contacto con actividades humanas.

Dentro de las especies patógenas oportunistas que se identificaron en el río Magdalena, se encontraron dos correspondientes al grupo de coliformes fecales (CF); *Enterobacter cloacae* y *Pseudomonas stutzeri*, en los sitios con mayor actividad humana (S4, S5 y S6) y cinco al grupo de enterococos fecales

## *Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

(EF); *E. casseliflavus*, *E. durans/irae*, *Enterococcus faecalis* *Staphylococcus warneri* y *S. auricularis*, en casi todos los sitios del río Magdalena, excepto en el nacimiento del río (S1). La presencia de estas especies en la zona alta del río puede deberse a que las especies patógenas oportunistas están presentes naturalmente en el medio ambiente y no están catalogados como agentes patógenos en sentido estricto. Sin embargo estas especies pueden causar enfermedades a las personas cuyos mecanismos de defensa locales o generales son deficientes, por ejemplo a los ancianos, a los lactantes, quienes han sufrido quemaduras o heridas extensas, a los enfermos sometidos a un tratamiento inmunosupresor o a los que padecen el síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA). Si el agua que esas personas utilizan para la bebida o el baño contiene un determinado número de estos microorganismos oportunistas, puede producirles diversas infecciones cutáneas y de las membranas mucosas del ojo, oído, nariz y garganta (OMS, 1996).

Además es importante resaltar en cuanto al grupo de los enterococos, que este grupo causa importantes infecciones clínicas, incluyendo; infecciones urinarias, bactericemia, endocarditis y meningitis, pasando de considerarse comensales de baja patogenicidad a convertirse en la segunda o tercera causa de infección intrahospitalaria (IIH) (Moellering, 1992). Específicamente dos de las especies de este género encontradas en el río Magdalena son comensales en el intestino humano: *E. faecalis* y *E. faecium* y el 80-90% de las infecciones en el hombre son producidas por *Enterococcus faecalis*, ya que *Enterococcus faecium* es menos frecuente 5-10% de los casos. Además la capacidad de desarrollar resistencia de este género a prácticamente todos los antimicrobianos de uso clínico le ha valido la denominación “del patógeno de los años 90” (Spera, 1990). Por lo cual, su presencia de estas especies en el río Magdalena también puede considerarse de riesgo para la salud de la población local y de los visitantes o turistas

En general, se puede observar que en los sitios (S4, S5 y S6), la cantidad de bacterias (UFC/100ml) de ambos grupos (CF y EF) evaluados, aumentaron conforme la concentración de nutrientes (como amonio, fósforo y carbono orgánico total) fue mayor, lo cual indica que en esta zona del río existe una mayor degradación de la calidad del agua con una fuerte contaminación microbiológica, por lo que el agua no es segura para consumo humano,

## *Calidad del agua para la rehabilitación del río Magdalena*

actividades recreativas y podría ser de gran riesgo de salud para la población local por provocar enfermedades gastrointestinales (Gerba, 2000; Koneman *et al.*, 2003). Sin embargo, en esta misma zona se encuentran dos plantas potabilizadoras de agua, una se encuentra antes del sitio de muestreo S5 y la otra antes del S6, este hecho pudiera estar generando por su ubicación mayores costos para el tratamiento del agua, o si no se realizan los tratamientos bacteriológicos y/o químicos adecuados pudieran generar un riesgo para la salud humana, ya que el agua de estas plantas es utilizada para consumo humano.

## 7. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos durante el ciclo anual 2007 muestran que existe una degradación gradual en decremento de la calidad del agua del río Magdalena, conforme éste entra a la zona urbana.
- Se puede observar que los resultados muestran el mismo patrón de todas las variables: mayores concentraciones en la época seca, e incremento en los valores de los parámetros observados como efecto de las actividades humanas.
- Los valores de pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos disueltos, registrados en los diferentes sitios de muestreo en el río Magdalena en el año 2007 no sobrepasan los valores indicados para este tipo de sistemas templados en estado natural, y se encuentran dentro de lo reportado para aguas corrientes naturales superficiales no contaminadas.
- Los valores de fósforo total (PT), superan en la parte baja de la cuenca (S5 y S6) del río Magdalena los valores reportados de fósforo en aguas naturales de 1 mg/L, debido al aporte de aguas residuales domésticas en la zona.
- En el río Magdalena la fuente de nitrógeno es principalmente externa, por contaminación agrícola y ganadera en las partes altas de la cuenca (S1, S2, S3) y por aporte de aguas residuales en la parte baja de la cuenca (S4, y S5) y donde el río entra en la zona urbana (S6), rebasando en éstos últimos los límites de NT en ríos sin contaminación fuerte.
- Las concentraciones de amonio y nitratos no sobrepasan el intervalo para aguas superficiales bien aireadas en todos los sitios. Sin embargo, se observa un aumento en su concentración conforme el río entra en la zona urbana y un incremento súbito del contenido normal de amonio y nitratos, por la presencia de aguas residuales, lo que implica serios problemas de purificación, con altas demandas de cloro.
- Las concentraciones más altas de carbono orgánico total (COT) se encontraron por debajo de las concentraciones (30 mg/L) para aguas sin contaminación en todos los sitios. Se observó un incremento durante la época de lluvias, debido a mayor incorporación de materia orgánica por arrastre durante esta época.

- De acuerdo a los valores encontrados de nutrientes no se puede hablar de un estado eutrófico del río Magdalena debido principalmente a los altos valores de la velocidad de corriente y de oxígeno encontrados en el mismo, opuestos a este proceso, pero si de un cambio de la calidad del agua producto de la concentración de éstos, cuando el río entra en contacto con las actividades humanas (S4 y S5) y principalmente en la zona urbana (S6).
- En las aguas del río Magdalena se encontraron CF y EF en los seis sitios de muestreo, observándose un aumento gradual conforme el río entra a la zona urbana con conteos desde uno hasta seis órdenes de magnitud para el primer grupo y hasta cinco órdenes de magnitud para el segundo, presentando el último sitio (S6) los valores más elevados.
- Los valores de CF y EF en la parte baja (S4, y S5) y en la zona urbana (S6), del río Magdalena, sobrepasan los límites establecidos de protección para la vida acuática (CNA, 2005; DOF, 2007), lo que sugiere que en esta zona existe una fuerte contaminación microbiológica, por lo que podría ser de gran riesgo de salud para la población local por provocar enfermedades gastrointestinales.
- Se encontró que existe una fuerte evidencia de contaminación fecal mixta, predominando la de origen humano, principalmente en la zona baja (S4, S5) y donde el río entra en la zona urbana (S6), lo que confirma el gran riesgo de salud que existe entre la población local.
- Se lograron identificar cuatro especies patógenas para el ser humano; *Escherichia coli*, *Salmonella paratyphi*, *Klebsiella pneumoniae* y *Enterococcus faecium*, y siete especies patógenas oportunistas; *Enterobacter cloacae*, *Pseudomonas stutzeri*, *E. casseliflavus*, *E. durans/irae*, *Enterococcus faecalis* *Staphylococcus warneri* y *S. auricularis*, las cuales aún cuando no se encuentran en concentraciones cercanas a sus dosis infectivas para generar enfermedades, son un indicio de suma importancia de la presencia de estas especies, representando un peligro de salud potencial que debe tomarse en cuenta para prevenir futuras enfermedades infecciosas es la zona baja de la cuenca.
- El cambio de la calidad del agua en la parte baja (S4, S5) y en la zona urbana (S6) del río, indica que el agua ha sufrido una fuerte modificación

por la presencia de expendios de alimentos, fauna doméstica, y el incremento de visitantes, así como por el vertimiento de aguas residuales a través de drenajes que desembocan en él, sobre todo en el último sitio. Por lo que requiere de una atención inmediata en esta zona.

- En la zona baja del río donde se observó una menor calidad de agua (se encuentran dos plantas potabilizadoras de agua (S5 y S6), lo que pudiera estar generando mayores costos para el tratamiento del agua, o si no se realizan los métodos adecuados pudieran generar un riesgo para la salud humana, debido a que el agua de estas plantas es utilizada para consumo humano.

## **8. RECOMENDACIONES PARA REHABILITACIÓN**

El deterioro ambiental que ha sufrido el río Magdalena en su parte baja, se manifiesta en la disminución de la calidad del agua, debido principalmente a las descargas de drenajes urbanos y a la extracción de agua para el abastecimiento de agua para consumo humano. De acuerdo con esto, se puede decir que existen diferentes condiciones en la parte alta de la cuenca del río con respecto a la parte baja, por lo que se sugiere tomar medidas diferentes para cada sección del río conforme los problemas originarios en cada zona.

Por lo anterior, se sugiere para dar un manejo adecuado de rehabilitación al río Magdalena, aplicar medidas diferenciales, dividiendo al río básicamente en tres partes o zonas: la parte alta que incluiría desde el nacimiento del río hasta el truchero (los sitios S1, S2 y S3 de este trabajo), sitios que tienen menor actividad humana y donde la degradación del río esta influenciada por otro tipo de factores como ganadería y agricultura, en la parte baja del río que corresponde a las zonas con mayor actividad humana por la presencia de expendios de alimentos, fauna doméstica, y el incremento de visitantes, (S4 y S5) y en la zona urbana, la cual es el área más degradada del río (S6) por el vertimiento de aguas residuales a través de drenajes que desembocan en el río. Por lo anterior estos últimos sitios son las que requieren mayor rehabilitación. A continuación se presentan las recomendaciones que de este trabajo se generan para la rehabilitación del río Magdalena:

### **1. Parte alta (S1, S2 y S3)**

- Actividades de conservación y reforestación de bosques con especies nativas y tomando en cuenta el gradiente altitudinal de la cuenca (*Pinus hartwegii* en la parte más alta, *Abies religiosa* en la parte media, y especies nativas de bosque mixto en la parte baja), con el objeto de mantener la recarga hídrica de la cuenca (Nava, 2003).
- Restringir la ganadería, ya que en el nacimiento del río existen pastizales de vegetación original así como inducidos, donde se tienen actividades ganaderas, y están teniendo un impacto sobre la calidad del agua del río.
- Reestructuración de la vegetación riparia, ya que aunque la zona alta es la más conservada, existen zonas donde este tipo de vegetación se encuentra ausente, provocando la incorporación de materiales como materia orgánica al río.
- Educación ambiental hacia el turismo y visitantes, ya que aunque en esta zona es más difícil el acceso al turismo, empieza a existir mayor concurrencia por parte de la gente, sin tener un conocimiento de la importancia de estos bosques y del río.

## **2. Parte baja (S4 y S5)**

- Diseñar y ejecutar campañas educativas sobre la importancia y conservación del río Magdalena, así como de prevención, relacionadas con la problemática de salud y el consumo de agua no apta para consumo humano.
- En esta zona también es muy importante la reestructuración de la vegetación riparia, debido a que existen zonas donde este tipo de vegetación se encuentra ausente provocando la incorporación de materiales como materia orgánica al río. Además como una manera de restricción de los visitantes al mismo por el riesgo que puede representar para éstos y para evitar la introducción de basura y contaminantes.
- Es de suma importancia informar a los pobladores locales, a los visitantes y para la misma gente que vende alimentos en la zona, sobre la presencia de especies patógenas y oportunistas que fueron encontradas en esta zona del río, las cuales pueden ser un



peligro de salud potencial que debe tomarse en cuenta, ya que pudieran prevenir futuras enfermedades infecciosas en la zona baja de la cuenca.

- Es necesario el saneamiento del río, a través de medidas obligadas de prevención y rehabilitación del río Magdalena, derivados de su extracción, degradación y uso directo (por ejemplo acciones de limpieza en los márgenes del río y la restauración del hábitat ripario).
- Reforzar la vigilancia y el control del área, para evitar los asentamientos irregulares de acuerdo a lo establecido en la normativa legal vigente.
- Tener un control de los puestos de comida en esta zona, así como del turismo para evitar nuevos y regular los ya existentes, para poder tener un ordenamiento ecológico del territorio y un control sobre los desechos vertidos al río, así como sobre el daño ecológico que pudieran ocasionar.
- En esta zona del río se sugiere la implementación de estaciones depuradoras como pozos negros o fosas sépticas para el tratamiento de aguas residuales de acuerdo a la capacidad de los puestos de comida actuales, debido a que en esta zona sería imposible implementar un sistema de tratamiento de aguas abierto por la cercanía con la zona urbana y por el número de visitantes (Arundel, 2000), además que se puede de que aún se puede decir que es limitado el aporte de aguas residuales.

### **3. Zona urbana (S6)**

- Esta zona del río es la que requiere mayores acciones de rehabilitación, ya que es la más degradada, por lo cual a partir de los resultados de este estudio se propone un sistema de monitoreo de la calidad del agua que permita informar periódicamente a los usuarios la condición del agua con respecto al uso humano y recreativo por este recurso en esta zona, ya que es la más afectada y la de más riesgo para la gente que ahí habita.
- Debido a que el principal problema de esta zona es el aporte de aguas residuales de la zona urbana y a que éstas son numerosas, es de suma importancia la eliminación de las fuentes contaminantes a través de la incorporación de éstas a un sistema de drenaje adecuado común.

- Esta zona es la que requiere con mayor urgencia una reestructuración de la vegetación riparia debido a que se encuentra totalmente ausente, sin embargo debido a la cercanía con los asentamientos humanos en la mayoría de los casos resulta imposible, por lo cual se sugiere la implementación de cercas artificiales o si es posible cercas vivas, como medida de protección tanto para el río como para los pobladores locales por el riesgo que representa para éstos y como medida de conservación.
- En esta zona también es importante diseñar campañas de educación ambiental a los pobladores del lugar, sobre la importancia del río Magdalena y del recurso agua, así como del riesgo que genera la degradación del mismo.
- Es de suma importancia implementar barreras múltiples para el tratamiento de estas aguas si continúan utilizándose para el consumo humano, por el riesgo de salud humana que puede genera el agua del río en esta zona.
- Es necesario desarrollar programas de control y vigilancia para la conservación del río Magdalena, por parte del gobierno local y grupos comunitarios, a fin de frenar el deterioro actual de la calidad del recurso hídrico.
- Es un gran reto la rehabilitación del río Magdalena para evitar que se convierta en un drenaje a cielo abierto como la mayoría de los ríos de la Ciudad de México y del país en general, sin embargo no es imposible, aunque es necesario el trabajo conjunto de autoridades, comuneros y de la sociedad civil.

## LITERATURA CITADA

- Abbot, L. S. 2003. *Klebsiella, Enterobacter, Citrobacter, Serratia, Plesiomonas, and other Enterobacteriaceae*. En: Murray, R. P., Baron, J. E., Pfaller, A. M., Jorgensen, H. J., y Tenover, H. C. *Manual of clinical microbiology*. 8ª ed. Washington, DC. 684-693 pp.
- Allan, 1996. *Stream ecology: structure and function of running water*. Chapman y Hall. Londres. 388 pp.
- Angelier, E. 2003. *Ecology of Streams and Rivers*. Science Publishers, Inc. USA, Enfield, Nuevo Hemisferio. 218 pp.
- Andrade, A.; Navarrete Le Blas, F. 2004. *Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. PNUMA. Ciudad de México. 110 pp.
- Andrade, V. y Silva, J. 2004. *Caracterización de Klebsiella pneumoniae productora de la b-lactamasa SHV-5, en una unidad de cuidados intensivos*. Salud pública de México. México, D.F. 46: 524-528 pp.
- Almeida-Leñero, L., Nava, M., Ramos, A., Ordoñez, J. y Jujnovsky, J. 2007. *Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México*. Gaceta ecológica. Secretaria Medio Ambiente y Recursos Naturales. 53- 64 pp.
- Álvarez, K. 2000. *Geografía de la educación ambiental: algunas propuestas de trabajo en el bosque de los dinamos, área de conservación ecológica de la Delegación Magdalena Contreras*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México. 127pp.
- American Public Health Association (APHA). 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 21ª ed. Port City Press. U.S.A.
- Arundel, J. 2000. *Tratamientos de aguas negras y efluentes industriales*. Acribia. España. 337 pp.
- Ávila-Akerberg, V. 2002. *La vegetación en la cuenca alta del río Magdalena: un enfoque florístico, fitosociológico y estructural*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 92 pp.
- Ávila-Akerberg, V. 2004. *Autenticidad de los bosques en la Cuenca alta del Río Magdalena*. Diagnóstico hacia la restauración ecológica. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 112 pp.
- Aurazo, Z. M. 2005. *Aspectos biológicos de la calidad del agua*. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS). Lima, Perú. 45 pp.

- Bojorge-García, M. 2002. *Ecología de comunidades algales en una localidad del río la Magdalena, D.F.* Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 46 pp.
- Bojorge-García, M. 2006. *Indicadores Biológicos de la calidad del agua en el río Magdalena, México, D.F.* Tesis de maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 62 pp.
- Bonilla, Meza, S. 2007. *Evaluación para identificar prioridades de rehabilitación en el humedal de Cuitzamala, Jalisco.* Tesis de maestría. Instituto de Ecología. UNAM. México. 145 pp.
- Bradshaw, A. 2002. *Introduction and philosophy.* En: Perrow, R. y A. Davy. (eds). *Handbook of Ecological Restoration. Restoration in practice.* Cambridge University Press. Vol. 2. London, U.K. 3-9 pp.
- Briggs, B. 1996. *Hydraulic habitat of plants in streams. Regulation rivers restoration management.* USA.12: 131-144pp.
- Calow, P. y Pets, G. 1992. *The Rivers handbook.* Blackwell scientific Publications. Londres. 526 pp.
- Campos, P. 2005. *Indicadores de contaminación fecal en aguas.* En: Agua potables para comunidades rurales y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. RIPDA, Ciudad de México. Capítulo 20-22. 222 pp.
- Carabias, J., Landa, L., Collado, J., y Martínez, P. 2006. *Agua, medio ambiente y sociedad.* 2005. El Colegio de México-Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 214 pp.
- Celis de la Rosa, A. 2004. *Bioestadística.* Manual Moderno. México. 374pp.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2005. *Lineamientos de Calidad del Agua:* En: Ley Federal de Derechos 2005. Comisión Nacional del Agua. Distrito Federal. 269 pp.
- Cantoral-Uriza, E., Carmona-Jiménez, J., González-González, J., Montejano-Zurita, G. 1998. *Algas indicadoras de la calidad del agua en el río Magdalena,* Delegación Magdalena Contreras, Distrito Federal. México. En: Conserva. Gobierno del Distrito Federal. Tomo 1: 300-332 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CNA) 1997. *Estudio de saneamiento del Río Magdalena, Delegación La Magdalena Contreras, Distrito Federal.* Gerencia Regional de Aguas del Valle de México. Subgerencia de Calidad del Agua e Impacto Ambiental. Informe final.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2001. *Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.* México, 15-18 pp.

- Contreras, E. y Kerekes, J. 1993. *Total phosphorus-chlorophyll relationships in tropical coastal lagoons in Mexico*. *Limnology*. International Verein 25:448-451 pp.
- Cortéz, M. R. 2004. *Evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo*. Tesis de Licenciatura. FES- Iztacala, UNAM. México. D.F.
- De la Lanza, E., Hernández, P. y Carbajal, P. 2000. *Organismos Indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (Bioindicadores)*. Plaza y Valdés. México. 633 pp.
- Dodds, W. 2006. *Eutrophication and trophic state in Rivers and streams*. American Society of Limnology and Oceanography. Kansas, USA. 671-680 pp.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). 1996b. *Norma Oficial Mexicana, NOM-001-ECOL-1996*. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México, D.F. 8 pp.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). 2000. *Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental*. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a los que debe someterse el agua para su potabilización. 22 de noviembre-2000. Secretaria de Salud. México, D.F.
- DOF, 2007. *Ley federal de derechos. Disposiciones aplicables en material de aguas nacionales*. 10 de diciembre, 2004: 190 pp.
- (EPA) Environmental Protection Agency. 2002. *Safe Drinking Water*. USA. <http://epa.gov/safewater/>
- Facklam R, San MD, Martins L. 1999. *Enterococcus*. En Murray P, Baron E, Pfaller M, Tenover F, Molken R, (Eds). *Manual of Clinical Microbiology* 7th ed Washington DC American Society of Microbiology 1999; 297-305.
- Fernández, G. M. 1997. *Programa de Manejo para la conservación de la Zona Protectora Forestal "Cañada de Contreras"*. Tesis de Maestría en la Facultad de Ciencias. UNAM. México, DF.
- García, E. 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen*. Larrios. 4ª Ed. México. 217 pp.
- Gerba, C.P. 2000. *Indicador microorganisms*. En: Mair, R. M., I.M. Pepper, & C.P. Gerba (eds.) *Environmental Microbiology*. Academic Press. San Diego, California. USA. 491-503 pp.

- Giller, P. y Malmqvist, B. 1998. *The biology of streams and rivers*. Oxford University. Press. Oxford. 296 pp.
- Gobierno del D.F. (GDF). OPMAC 2000. *Estudio par a la recarga del acuífero en el Suelo de Conservación del Distrito Federal*. Síntesis ejecutiva. GDF, Consorcio OPMAC Overseas Project Management Consultants, Ltd. Junio de 2000.
- Gobierno del D.F. (GDF). 2005. *Programas de población del D.F. 2001* (en línea) <http://www.df.gob.mx/secretarias/social/copodf/prog7.html>
- Goldman, R. 1994. *Limnology*. McGrawHill. USA. New York. 576 pp.
- Gordon, N., McMahon T., y Finlayson, B. 1992. *Stream hydrology. An introduction for Ecologists*. John Wiley y Sons. England. 526 pp.
- Granato, A. 2003. *Pathogenic and indigenous microorganism of human*. En: Murray, R. P., Baron, J. E., Pfaller, A. M., Jorgensen, H. J., y Tenover, H. C. *Manual o clinical microbiology*. 8ª ed. Washington, DC. 44-54 pp.
- Gray, D. L. 2003. *Escherichia, Salmonella, Shigella y Yersinia*. E En: Murray, R. P., Baron, J. E., Pfaller, A. M., Jorgensen, H. J., y Tenover, H. C. *Manual o clinical microbiology*. 8ª ed. Washington, DC: 450.457 pp.
- Gutiérrez-Cogco, L., Montiel-Vázquez, E., Aguilera-Pérez, P. y González-Andrade, M.C. 2000. *Serotipos de Salmonella identificados en los servicios de salud de México*. Salud pública Méx vol. 42 no. 6.
- Hauer, R. y Lamberti, G. 2006. *Methods in stream ecology*. Elsevier. 2a ed. China. 877pp.
- HACH. 2003. *Water analysis Handbook*. 4a. ed. HACH COMPANY. California. USA. 1260 pp.
- HACH. 2002. *Manual de Operación*. Portable Spectrophotometer. DR/2400, USA.
- Hilton, J., O'Hare, M., Bowes, M. y Jones J. 2006. *How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers*. Science of the total environment. Elsevier. United Kingdom. 365: 66-83 pp.
- Hobbs J. y Harris, B. 2001. *Restoration ecology: repairing the earth's ecosystems in the millennium* Restoration Ecology. Vol. 9. No. 2. 239-246 pp.
- Hynes, H. B. 1979. *The Ecology of Running Waters*. 4ª Ed. Liverpool University Press. Londres, Gran Bretaña. 4ª ed.: 1-13 pp.
- Jiménez, C. B. 2001. *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. Limusa. México. 926p. Jujnovsky, J. 2003. *Las Unidades*

- de Paisaje en la Cuenca del Río Magdalena, México, D.F.* Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. México.
- Johnson, E. 2000. *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*. International Thomson Editores. Madrid, España. 566 pp. QA278J62518 BBcentral
  - Jujnovsky, J. 2006. *Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la cuenca del río Magdalena, D.F, México, D.F.* Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. México.
  - Koneman, E. W., Allen, S.D., Janda, W. M., Schreckenberger, P.C. y Winn, W. C. 2003. *Diagnóstico microbiológico*. Panamericana 5a ed. México, D.F. 1431 pp.
  - Lampert, W., y Sommer, U. 1997. *Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams*. Oxford University Press. New York. 382 pp.
  - Linding-Cisneros, R. y Zedler, J. B. 2005. *La restauración de humedales*. En: Sánchez, O., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdés, M., y Azuara, D. (Eds.) *Temas sobre restauración ecológica*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología, U.S. Fish and Wildlife Service y Unidos para la Conservación A.C. 201-215pp.
  - Livingston J. R. 2006. *Restoration of aquatic systems*. Taylor y Francis Group. USA. 419 pp.
  - Luis, M. A. 1985. *Distribución altitudinal y estacional de los papilionoidea (insecta: Lepidoptera), en la cañada de los Dinamos; Magdalena Contreras, D.F.* Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM.
  - Mangas-Ramírez, E. y Elias-Gutiérrez, M. 2004. *Effect of mechanical removal of water Hyacinthe (Eichornnia crassipes) on the water quality and biological communities in a Mexican reservoir*. Aquatic Ecosystem Health and Management Society. 7 (1): 161-168 pp.
  - Margalef, R. 1983. *Limnología*. Omega. España. 953pp.
  - Marín, G. R. 2003. *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos: tratamiento y control de la calidad de aguas*. Diaz de Santos. España. 311 pp.
  - Martins T. y Facklam, R. 2003. *Enterococcus*. En: Murray, P., P. Baron, J. Pfaller, A. Jørgensen, y Tenover, R. (Eds). *Manual of clinical microbiology*. 8ª ed. Washington. 422-433 pp.
  - Manson, C. F. 1984. *Biología de la contaminación de agua dulce*. Ed. Alhambra. España. 289 pp.

- Manson, C. F. 1991. *Biology of freshwater pollution*. Logran Scientific and Technical. 95-138 pp.
- Mazari-Hiriart, M. 2008. Publicado en Carrillo, Ismael. *Urgente, tratar el agua en México para su reutilización*, Gaceta UNAM, Número 4,066, 21 de abril de 2008, 8 pp.
- Mazari-Hiriart, M. (Comp.). 2000. *Dualidad Población-Agua: Inicio del Tercer Milenio*. El Colegio Nacional, México D. F. 281 pp.
- Mazari-Hiriart, M, C. Jiménez y V. López. 2005. *El agua y su impacto en la salud pública*. Programa agua, medio ambiente y sociedad. Número 4. Colegio de México, UNAM, Fundación Gonzalo Rio Arronte. 91pp.
- Mendoza H., V. García., M. Canseco y Nieto Montes de Oca. 2007. *Guía de los anfibios y reptiles del suelo de conservación Contrerense, México, D.F.*
- Meyer, J. L. y G. E. Likens. 1979. *Transport and transformation of phosphorus in a forest stream*. Ecology. España. 60: 1255-99 pp.
- Millipore, Corporation. 2000. *Water Microbiology Laboratory and Field Procedures*. Millipore S.A. de C.V. México D.F. 33 pp.
- Moellering, R. C. 1992. *Emergence of Enterococcus as a significant pathogen*. Clin. Infections Dis. 14: 1173 pp.
- Molles, M. 2006. *Ecología. Conceptos y aplicaciones*. Mc- Graw-Hill. 671pp.
- Murray, P. R., Baron, E. J., Pfaller, M. A., Tenover, F. C. y Tenover, R. H. 2003. *Manual of Clinical Microbiology*. ASM Press, Washington, D.C., E.U.
- National Academy of Sciences. 1999. *Restoration of aquatic ecosystems: science, technology, and public policy*. USA. 552pp
- Nava, L. M. 2003. *Los Bosques de la Cuenca Alta del Río Magdalena, D.F., México*. Un estudio de Vegetación y Fitodiversidad. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias UNAM. México.
- Nomdedeu, O. y López-Ochoterena, V. 1988. *Protozoarios ciliados de México XXXII*. Estudio ecológico de algunas especies para estimar el grado de contaminación del río La Magdalena, Anales del instituto de ciencias del mar y limnología. UNAM. México, D.F.15: 229-236 pp.
- Norris, R. y Hawkins, C. 2000. *Monitoring river health*. Hydrobiología 435: 5-17.
- Olguin, M. y H. León, N. 2007. *Guía de campo de los mamíferos del suelo de conservación de la delegación Magdalena Contreras. D. F.*
- Olivares F. y Figueroa E. 2007. *Guía de las aves del suelo de conservación Contrerense*.



- Organización Mundial de la Salud (OMS). 1996. *Water Quality Assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Cambridge. 2a ed, Gran Bretaña. 651 pp.
- Ontiveros, A. 1980. *Análisis físico y algunos aspectos socioeconómicos de la cuenca del río Magdalena*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México.
- Owens, D. 2008. *Salmonella infection*. Clinical Faculty, Emergency Medicine Residency, Naval Medical Center Portsmouth; Consulting Staff, Department of Emergency Medicine, Chesapeake Regional Medical Center.  
<http://emedicine.medscape.com/article/785774-overview>
- Pérez-Ortiz, G. 2005. *Diagnóstico ambiental como base para la rehabilitación de las ciénegas del Lerma*, Estado de México. Tesis de Maestría. Instituto de Ecología. UNAM. México.
- Perry J., y Vanderklein E. 1996. *Water quality. Management of a Natural Resource*. Blackwell Science. USA.
- Prescott M. L., J. P. Harley y D. A. Klein. 2000. *Microbiología*. Mc-Graw-Hill Interamericana. 4ª ed;. España.
- PAOT (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal) *Informe del agua en México*. México. 2003. (en línea)
- Reid, K. y Wood D. 1976. *Ecology on Inland waters and Estuaries*. Litton Educational Publishing. 485 pp.
- Romero-Rojas, A. 1999. *Calidad del agua*. Alfaomega grupo editor 2ª. Ed. México. 273 pp.
- Romero-Rojas, A. 2005. *Lagunas de estabilización de aguas residuales*. Escuela colombiana de Ingeniería. 120 pp.
- Romero, F. J y A. Velázquez. 1999. *La región de montaña del sur de la ciudad de México: una revisión de su importancia biológica*. En: Velázquez, A. y F. J. Romero (Eds) Biodiversidad de la región de montaña del sur de la cuenca de México. UAM Xochimilco-CORENA. México. 40-48 pp.
- Rzedowski, J. y G. Calderón de Rzedowski. 2001. *Flora Fanerogámica del Valle de México*. Instituto de Ecología, A.C. México. 1206 pp.
- Scarsbrook, M. R. y Townsend C. R. 1993. *Stream community structure in relation to spatial and temporal variation: a habitat templet study of two contrasting New Zealand streams*. *Freshwater biology*. 29:395-410 pp.
- Seoáñez, C. 1995. *Aguas residuales urbanas: tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*. Mundi-prensa. España. 367 pp.

- Seoáñez, C. 1999. *Aguas residuales tratamiento por humedales artificiales*. Fundamentos científicos, tecnología y diseño. Mundi-prensa. España. 23:73 pp.
- Sociedad para la Restauración Ecológica (SER). 2002 *The Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration International Science and Policy Working Group.
- Shiklomanov, I. A. 1993. *World fresh water resources*. En: *Water in crisis*. Oxford University Press. New York. USA: 13-24 pp.
- Shiklomanov, I. A. 1999. *World water resources: Modern assessment and outlook for 21-st century*. Federal Service of Rusia for Hidrometeorology & Environment Monitoring State, Hidrological Institute, San Petesburgo. (en línea)
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. 2007. *Salvemos el río Magdalena*. Dirección General Planeación y Coordinación de Políticas. (en línea)
- Secretaria de Salud. 2004. "*Lineamientos para determinar la calidad del agua de mar para uso recreativo con contacto primario*". Comisión federal contra riesgos sanitarios. 15 pp.
- Society for Ecological Restoration International. 2004. *Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. Grupo de trabajo sobre ciencia y política. (en línea).
- Spera, R. V., Farber B.F. 1992. *Multiply resistant Enterococcus faecium: the nosocomial pathogen of the 1990s*. *Jama*. 268: 2563 – 2564.
- Tallon, P., Magajna B., Lofranco, C. y Leunng, T. 2005. *Microbial indicators of faecal contamination in water. A current perspective*. *Journal water, air, and soil pollution*. 166pp.
- Teixeira, M. y Facklam, R. 2003. *Enterococcus*. En: Murria, R. P., Baron, J. E., Pfaller, A. M., Jorgensen, H. J., y Yolken, H. R. *Manual o clinical microbiology*. 8ª ed. Washington, DC. 422-432 pp.
- Tonda, J. 2007. *Al rescate del río Magdalena*. *Revista de divulgación científica ¿Cómo ves?* No. 102. 10 pp.
- Tchobanoglous, G. y Schroeder D. 1987. *Water quality*. Addison-Wesley. USA. 768p.
- Toranzos, A. y Mcfeters, G. 1996. *Detection of Indicator microorganisms in environmental freshwaters and drinking waters*. En: Hurst, J y Toranzos, A. *Water microbiology in public heath*. American society for microbiology. Washington, D.C. 894:184-193.

- Trujano- Ortega M., Nájera Carpio J. y A. Luis-Martínez. 2006. *Guía de las especies y subespecies de mariposas diurnas (Lepidoptera: Ropalocera) que habitan en la cuenca alta del río Magdalena*, D.F.
- Tsuchihashi, R., Sakaji, R y Asano, T. 2002. *Aspects of Groundwater Recharge with Reclaimed Water*. Adelaide. South Australia, Australia. 22-26 pp.
- Turk, A. y Wittes T. J. 1973. *Ecología y contaminación del medio ambiente*. Nueva editorial Interamericana. México. D.F. 115-139 pp.
- UNESCO. 2000. *Agua para todos. Agua para la vida*. Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. World Water Assessment Programme (WWAP)]. (En línea)
- Villarruel-Ordaz J. y J. Cifuentes. 2007. *Guía ilustrada de los hongos macroscópicos presentes en el suelo de conservación contrerense*, D.F.
- Wetzel, Robert. G. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. Academic. USA. 1006p.
- Zar, Jerrold. H. 1999. *Biostatistical analysis*. Prentice Hall. USA. 929.

#### REFERENCIAS DE INTERNET

- [http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/ex\\_summary/ex\\_summary\\_es.pdf](http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/ex_summary/ex_summary_es.pdf)
- [http://www.ojosdepapel.com/Index.aspx?article\\_id=969](http://www.ojosdepapel.com/Index.aspx?article_id=969)
- <http://www.ser.org/content/spanishprimer.asp#11>
- <http://www.df.gob.mx/secretarias/social/copodf/prog7.html>
- <http://www.sma.df.gob.mx/>
- <http://www.paot.org.mx/centro/paot/informe2003/temas/agua.pdf>
- [http://www.sagan-gea.org/hojared\\_AGUA/paginas/20agua.html](http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/20agua.html)
- <http://epa.gov/safewater/>
- [http://www.scielosp.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0036-36342000000600004](http://www.scielosp.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342000000600004)
- <http://www.supac.org.uy/3%20Bacteriuria%20por%20Enterococcus%20faecium>
- <http://www.cepis.ops-oms.org/cepis/e/cepisacerca.html>
- <http://www.uofaweb.ualberta.ca/rr/pdfs/enterococcus-faecalis-enterococcus-faecium.pdf>

## APÉNDICE

**a) *Escherichia coli*.** Esta bacteria es de origen humano y animal, su presencia en el agua puede provocar problemas gastrointestinales que pueden tener complicaciones potenciales y provocar incluso la muerte (Gray, 2003; Koneman *et al.*, 2003). Se necesita una dosis infectiva alta de esta especie para generar enfermedades en el hombre; 1-100 millones de bacterias / ml (APHA, 2005).

**b) *Salmonella paratyphi*.** Dicha especie usualmente causa una infección intestinal conocida como salmonelosis o fiebre paratifoidea, infecciones locales del tracto urinario y bactericemia (bacterias en la sangre). El único reservorio de la *Salmonella paratyphi* es el hombre, de modo que se transmite de una persona a otra, por agua o por comida contaminada. La fiebre paratifoidea es similar a la fiebre tifoidea (producida por la especie *S. typhi*), sólo un poco más leve, es una infección seria del torrente sanguíneo que comprende un conjunto de cuadros clínicos cuya principal manifestación es la gastroenteritis aguda. Sin embargo, en algunos pacientes la infección puede diseminarse del intestino al torrente circulatorio (bacteremia) y de allí a otros órganos, ocasionando así complicaciones importantes. En México, en los años de 1994 a 1998, los casos por salmonelosis registraron un incremento de 100,342 casos, en 1994, a 215,155, en 1998 (tasa de 111.21 y 223.53 por 100 000 habitantes, respectivamente), con una mayor incidencia en los grupos de 15 a 24 años, de 25 a 44 años y de 45 a 64 años, siendo el segundo el grupo más afectado.

La fiebre paratifoidea o salmonelosis, es una enfermedad transmitida por los alimentos, de gran importancia en salud pública y que ocasiona un gran impacto en los países en desarrollo (Gutiérrez *et al.* 2000). En el caso de esta especie, es necesaria una inoculación relativamente grande, entre 10 a 100 millones de organismos / ml para provocar los síntomas en humanos saludables, según estudios hechos con voluntarios (Owens, 2008).

**c) *Klebsiella pneumoniae*.** Es la especie de mayor relevancia clínica dentro del género bacteriano, es un patógeno que en el ambiente se puede encontrar en el aire y en el agua, es colonizador de piel y mucosas, y se pueden presentar infecciones invasoras como bactericemias o septicemias; por otro lado, puede provocar enfermedades en el hombre colonizando el tracto intestinal, urinario y respiratorio (Abbot, 2003). Causa alrededor del 1% de las neumonías bacterianas y puede causar condensación hemorrágica extensa del

pulmón. Además, en ocasiones provoca infección del aparato urinario y bactericemia a partir de lesiones focales en pacientes debilitados que puede terminar con la vida del paciente. Algunas de las complicaciones más frecuentes son el absceso pulmonar.

En México existen algunos reportes que muestran a *K. pneumoniae* como uno de los principales causantes de infecciones intrahospitalarias, que causan niveles significativos de morbilidad y mortalidad (Koneman *et al.*, 2003; Andrade y Silva, 2004). Esta especie necesita una dosis infectiva alta de entre 10 a 100 millones de organismos / ml (APHA, 2005).

**4) *Enterococcus faecium*.** Son bacterias ubicuas, se encuentran en agua y alimentos, integran la flora del hombre y animales. Residen en tracto digestivo y genital. Son más resistentes a los agentes físicos que a los químicos. Las infecciones más frecuentes que producen son las urinarias, de la sangre, intrabdominales y endocarditis. El principal reservorio es el tracto gastrointestinal en el ser humano y en animales (Facklam, 1999). Las infecciones por *E. faecium* afectan sobre todo a pacientes con inmunodeficiencias (hematología, oncología, cirugía de trasplantes, nefrología). Aparecen especialmente en pacientes con ingresos prolongados y/o tratamiento antibiótico que seleccione *E. faecium*. En los últimos años se ha incrementado claramente la proporción de *E. faecium* en todas las infecciones por enterococos. La principal causa de este hecho puede ser que el *E. faecium* es resistente a los antibióticos con más frecuencia que el *E. faecalis* (Teixeira, 2003).

## **Anexos.**

### **ANEXO 1.**

Fórmula para calcular la descarga del río

$$Q = Av$$

Donde **Q** es igual a la descarga (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); **A** es el área del corte transversal del río y **v** es la velocidad de corriente obtenida del promedio de velocidades obtenidas cada metro en cada sitio de muestreo.

### **ANEXO 2.**

Fuentes de posible origen de contaminación de CF/EF  
(Toranzos, 1996)

CF/EF	Fuentes de contaminación probables
>>4.0	Fuerte evidencia de contaminación humana
2.0-4.0	Predomina la contaminación humana (mezcla humana-animal)
0.7-2.0	Predomina la contaminación animal (mezcla humana-animal)
<0.7	Fuerte evidencia de contaminación animal