



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO MAGDALENA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
QUÍMICA FARMACÉUTICA BIÓLOGA

PRESENTA

MARÍA DE LOS ÁNGELES FLORES PICHARDO



MEXICO, D.F.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Presidente Prof. Jorge Soto Soria

Vocal Prof. Jesús González Pérez

Secretario Prof. María Teresa Orta Ledesma

1er suplente Prof. Irma Ruiz Silva

2º suplente Prof. Karla Mercedes Díaz Gutiérrez

Sitio donde se desarrolló el tema: Instituto de Ingeniería, UNAM.

Sustentante: María de los Ángeles Flores Pichardo

Director de tesis: Dra. María Teresa Orta Ledesma.

Supervisor técnico: Dra. María Neftalí Rojas Valencia.

A mis papas

A mis hermanos

A Carlos

A mis amigos

Agradecimientos

Esta tesis representa una etapa muy importante en mi vida, ya que es la conclusión de toda una experiencia universitaria, hay personas a las que necesito agradecer por que sin su valiosa aportación no hubiera sido posible este trabajo, y también quienes me han guiado y ayudado a completar este camino.

Agradezco a mis padres, Miguel Ángel y Ma. De los Ángeles, por el cariño, el amor y la confianza, gracias a su apoyo pude realizar uno de mis más grandes anhelos, terminar mi carrera profesional.

Agradezco a mis hermanos, Antonio y Karina, por el apoyo que me brindan se que cuento con ellos siempre.

Agradezco a mis compañeros del Instituto de Ingeniería, Ángeles (Mara), Abraham, Cesar, Daniel, Erick, Jazmín, Julio y Karen ya que con su ayuda pude realizar esta tesis, gracias por los momentos amenos que pase con ustedes.

Agradezco al Instituto de Ingeniería, por permitir que realizará mi tesis en su plantel.

Agradezco a todo el staff de experimenta-ciencia, en especial a la doctora Ana Sosa y Glinda Irazoque, a todos los becarios, Elena, Moy, Inés, Rosita y Carlos.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de realizar mi carrera profesional, y brindarme las mejores instalaciones para desarrollarme y crecer como persona.

Agradezco a mis maestros por su disposición y ayuda, en especial a las doctoras Neftalí Rojas Valencia y Teresa Orta Ledesma.

Agradezco a Carlos, por ser tan paciente conmigo explicándome y ayudándome a terminar mi trabajo escrito.

Dedicatorias

Le dedico esta tesis a mi familia, los quiero mucho, y este trabajo que me llevo un año hacerlo es para ustedes, les quiero devolver un poco de lo me han dado.

Les dedico esta tesis a mis amigos Montserrat, Sandra, Alejandra, Carmina, Carlos, Nadia, Paulina y a todos los que me compartieron una sonrisa, una palabra y un momento, por su confianza, lealtad, y por hacer de mi estancia en la Universidad mas placentera, ya que formaron gran parte de mi vida.

Muchas gracias Carlos por mas de cinco años de conocernos y en los cuales hemos pasado tantas cosas, te agradezco que ahora estés conmigo en este día tan importante para mí. Gracias por ser mi gran amor, mi apoyo, mi amigo y mi compañero. Esta tesis también es tuya.



Contenido

Índice de tablas.....	III
Índice de figuras.....	IV
Nomenclatura.....	V
Resumen.....	1
Introducción.....	2
I. Antecedentes.....	3
1.1 Índice de Calidad del Agua (ICA).....	4
1.1.1 Evaluación del Índice de calidad.....	6
1.2 Estado del Arte.....	9
1.2.1. Ejemplos de Clasificación del Índice de Calidad del Agua en el Continente Europeo.....	10
1.2.2. Ejemplo de Clasificación en el Continente Americano.....	13
1.2.2.1 Clasificación mediante el Índice de Calidad de Agua de la Fundación Nacional de Sanidad (NSF WQI), U.S.A.....	13
1.2.2.2 Otro criterio de clasificación mediante el índice de calidad del agua México.....	14
1.3 Historia de la cuenca del río Magdalena.....	16
1.4 Estudios que se han hecho en la zona con anticipación.....	20
1.5 Área de estudio.....	21
II. Objetivos.....	23
Objetivo general.....	24
Objetivos particulares.....	24
Justificación.....	25
Hipótesis.....	25
III. Métodos y materiales.....	26
3.1 Ubicación y selección de los sitios de muestreos.....	27
3.2 Toma de muestras.....	29



3.3 Análisis de parámetros medidos in situ.....	29
3.4 Trabajo de laboratorio.....	30
IV.Resultados y discusión.....	32
Determinación del Índice de Calidad del Agua en el río Magdalena.....	43
Análisis y discusión del Índice de calidad del agua.....	49
Conclusiones.....	53
Recomendaciones.....	54
V.Referencias y anexos.....	55
Bibliografía.....	56
Anexo I. Descripción y fotos de los sitios de muestreo.....	60
Anexo II. Mapas.....	69
Anexo III. Toma de muestras.....	74



Índice de tablas

Tabla 1. Criterios de tratamiento según el ICA	7
Tabla 2. Calidad de Agua según el Valor del ICG.....	10
Tabla 3. Clasificación del Agua para Consumo Humano	10
Tabla 4. Alteraciones capaces de modificar la calidad del agua	12
Tabla 5. Clases de calidad según el valor del SEC del agua, Francia	13
Tabla 6. Calidad asignada según el valor del WQI, U.S.A.	14
Tabla 7. Comparación de los parámetros utilizados para calcular el índice de Calidad de Agua en diferentes países	15
Tabla 8. Resultados promedio de los parámetros determinados entre los meses enero y abril del 08, de cada estación en el río	34
Tabla 9. Lista de valores de los Índices individuales (Ii) y el factor de ponderación (Wi) para calcular el ICA	44
Tabla 10. Resultado de los Índices individuales de cada variable en cada estación muestreada.....	47
Tabla 11. Suma de las variables en cada estación para finalmente obtener el Índice de calidad del agua.....	48
Tabla 12. Ubicación y descripción de los sitios de muestreo para agua superficial en el río Magdalena.	60
Tabla 13. Ubicación y descripción de las descargas en el río Magdalena. .	65
Tabla 14. Conservación y transporte de las muestras para determinar la calidad del agua en el Río Magdalena (NOM -014)	77



Índice de figuras

Figura 1. Intervalos de clasificación de calidad del agua en función de su uso.....	6
Figura 2. Ciclo hidrológico.....	17
Figura 3. Localización de la cuenca del río Magdalena.....	22
Figura 4. Cuenca Natural del río Magdalena.....	22
Figura 5. Diagrama general de la metodología realizada en el río.....	28
Figura 6. Distribución horizontal de la temperatura promedio en el río.....	37
Figura 7. Distribución horizontal de la conductividad promedio en el río.....	38
Figura 8. Distribución horizontal de la turbiedad promedio en el río.....	39
Figura 9. Distribución horizontal de los tensoactivos promedio en el río.....	40
Figura 10. Distribución horizontal de los sólidos totales promedio en el río.....	41
Figura 11. Distribución horizontal de los nutrientes promedio en el río.....	42
Figura 12. Distribución horizontal de los microorganismos promedio en el río.....	43
Figura 13. Índices individuales de calidad del agua de los parámetros obligatorios en el río.....	51
Figura 14. Índices individuales de calidad del agua de los parámetros relevantes en el río.....	51
Figura 15. Índice de calidad del agua en el río Magdalena.....	52
Figura 16. Ubicación de las diecinueve estaciones de muestreo.....	69
Figura 17. Calidad del agua para consumo humano.....	70
Figura 18. Calidad del agua para uso recreativo.....	71
Figura 19. Calidad del agua del río para uso en la agricultura.....	72
Figura 20. Ubicación de las descargas directas en el río Magdalena.....	73

**Nomenclatura**

CNA	Comisión Nacional del Agua
Λ	Conductividad
CF	Coliformes fecales
CT	Coliformes totales
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
PT	Fósforo total
G y A	Grasas y aceites
ICA	Índice de Calidad del Agua
mg/L	Miligramos por litro
$\mu\text{S/cm}$	Microsimems por centímetro
N- NH ₃	Nitrógeno como amonio
NKJ	Nitrógeno total
OD	Oxígeno disuelto
S	Desviación estándar
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SST	Sólidos suspendidos Totales
SAMM	Sustancias Activas al Azul de Metileno
UFC	Unidades formadoras de colonias
UTN	Unidades nefelométricas de turbiedad
$\bar{X}$	Media



Resumen

Un problema relevante en relación al agua en el Distrito Federal es la contaminación de los ríos, debido a: la ineficiencia del drenaje marginal provocando descargas de aguas residuales domésticas (municipales), asentamientos irregulares en zonas de conservación, principalmente en el río Magdalena que es el único río vivo de la Ciudad. En este trabajo se evalúa la calidad del agua del río, en diecinueve estaciones de muestreo; la estación E1 a E7 se localizaron en el suelo de conservación, y las estaciones E8 a E19 se ubicaron en la zona urbana, tomando en cuenta las descargas observadas en el río. En cada estación se evaluaron las características físicas, químicas y microbiológicas del agua superficial. Los parámetros que se cuantificaron en este trabajo son los siguientes: temperatura, OD, DBO₅, Fósforo total, Nitratos, Nitrógeno como amonio, Turbiedad, SST, SDT, pH, Conductividad, SAAM, CT y CF. A partir de estos parámetros se calculó el índice de calidad del agua (ICA) del río.

Los sitios de muestreos E1 y E3 presentan excelente calidad para cualquier uso, ya que se obtuvo un índice de calidad mayor al 90%. A partir de la estación de muestreo E10 el agua del río está excesivamente contaminada para consumo humano, ya que el valor del ICA que se obtuvo para estas estaciones fue menor al 40%.



Introducción

El agua de los ríos, es un recurso limitado, esencial para la vida humana. Un desarrollo sostenible no es posible sin la adecuada cantidad y calidad de este recurso.

El Distrito Federal presenta problemas en cuanto a los recursos hidrológicos, con la finalidad de rescatar al último río vivo de cauce abierto de la ciudad, de enorme valor paisajístico, escénico y ambiental, se desarrolla un Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de la Cuenca del Río Magdalena -será un instrumento técnico científico de consenso social que defina los objetivos, los mecanismos, los instrumentos y las acciones que permitirán el manejo integral del río Magdalena- para la cual es necesario evaluar la calidad del agua en el río.

El aumento en los niveles de contaminación en las aguas superficiales han generado la necesidad de evaluar la calidad de los cuerpos de agua, debido a esto existe un esfuerzo creciente para desarrollar un sistema indicador que agrupe los parámetros contaminantes más representativos.

La calidad del agua en el río Magdalena depende de numerosos parámetros, además de que este concepto es relativo al uso, por lo que las exigencias de calidad dependerán del uso al que este destinado el recurso. Todo ello dificulta la labor de definir un indicador para el estado de calidad de aguas superficiales, sin embargo a través de ponderaciones y variables físicas, químicas y biológicas se logra obtener un Índice de Calidad de Agua (ICA).



I. Antecedentes.



1.1 Índice de Calidad del Agua (ICA)

El Índice de Calidad del Agua (ICA), se define como el valor numérico que indica el estado actual del agua analizada y su posible uso en función de este valor, es decir, como: agua potable, en actividades de irrigación o agrícolas, industrial, municipal, en pesca y usos recreativos.

El criterio de calidad del agua, es una relación cuantitativa entre la densidad del indicador en el agua y el riesgo potencial que puede ejercer sobre los seres vivos. El Índice de Calidad del Agua, es una manera de comunicar y evaluar la calidad de los cuerpos de agua. Para que este índice de calidad sea práctico deben considerarse sólo una selección de parámetros representativos.

Durante el monitoreo de un río el cual tenga por objetivo detectar el grado de deterioro del agua, se genera una gran cantidad de datos proporcionados por la medición de diversos parámetros dimensionalmente distintos, esto dificulta detectar los patrones de contaminación. Con el propósito de integrar la información generada por estos parámetros surge la necesidad de crear los sistemas de índices de calidad. Los índices de calidad deben de cumplir con los siguientes criterios:

- Uso de parámetros representativos de los objetivos de calidad.
- Sensibilidad a las variaciones de los parámetros de importancia para los objetivos de calidad y uso.
- Capacidad de representar adecuadamente las variaciones en las condiciones reales del curso del agua.
- Correlación con otros índices.
- Potencialidad de determinación automática, mediante el uso de parámetros medibles en tiempo real.
- Factibilidad de reproducción.



Así los primeros intentos para generar una metodología unificada para el cálculo de un índice de calidad del agua se refieren a los realizados por Dinius²⁷.

Los parámetros a determinar varían de acuerdo al país y al sistema de clasificación utilizado. Distintos sistemas de clasificación de la calidad del agua han sido desarrollados en varios países.

En México se ha calculado el Índice de Calidad del Agua (ICA) acorde con la metodología propuesta por la Comisión Nacional del Agua, Hernández⁶ en el 2004 calculó este índice considerando doce parámetros: Temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad, turbiedad, demanda bioquímica de oxígeno, grasas y aceites, coliformes fecales, coliformes totales, nitrógeno total, fósforo total, y sólidos suspendidos totales.

Los índices individuales (I_i) y los factores de ponderación (W_i) se incluye en la siguiente ecuación:

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

WQI; Índice de Calidad del Agua (water quality index)

I_i ; Índice individual

W_i ; factores de ponderación

Los valores del ICA se consideran en un intervalo de 0 a 100%: 0%; corresponde a un agua altamente contaminada, 100%; corresponde a un agua con Excelente calidad, citado por Hernández. Esto solo se aplica a los cuerpos de agua dulce por lo tanto es válido para determinar el ICA en el río Magdalena.



1.1.1 Evaluación del Índice de calidad

En relación al valor numérico del ICA, Dinius definió 6 intervalos de estado de calidad del agua:

(E) Excelente; (A) Aceptable; (LC) Levemente contaminada; (C) Contaminada; (FC) Fuertemente contaminada y (EC) Excesivamente contaminada. En la figura 1 se muestran los intervalos de calificación del ICA en función del uso del agua.

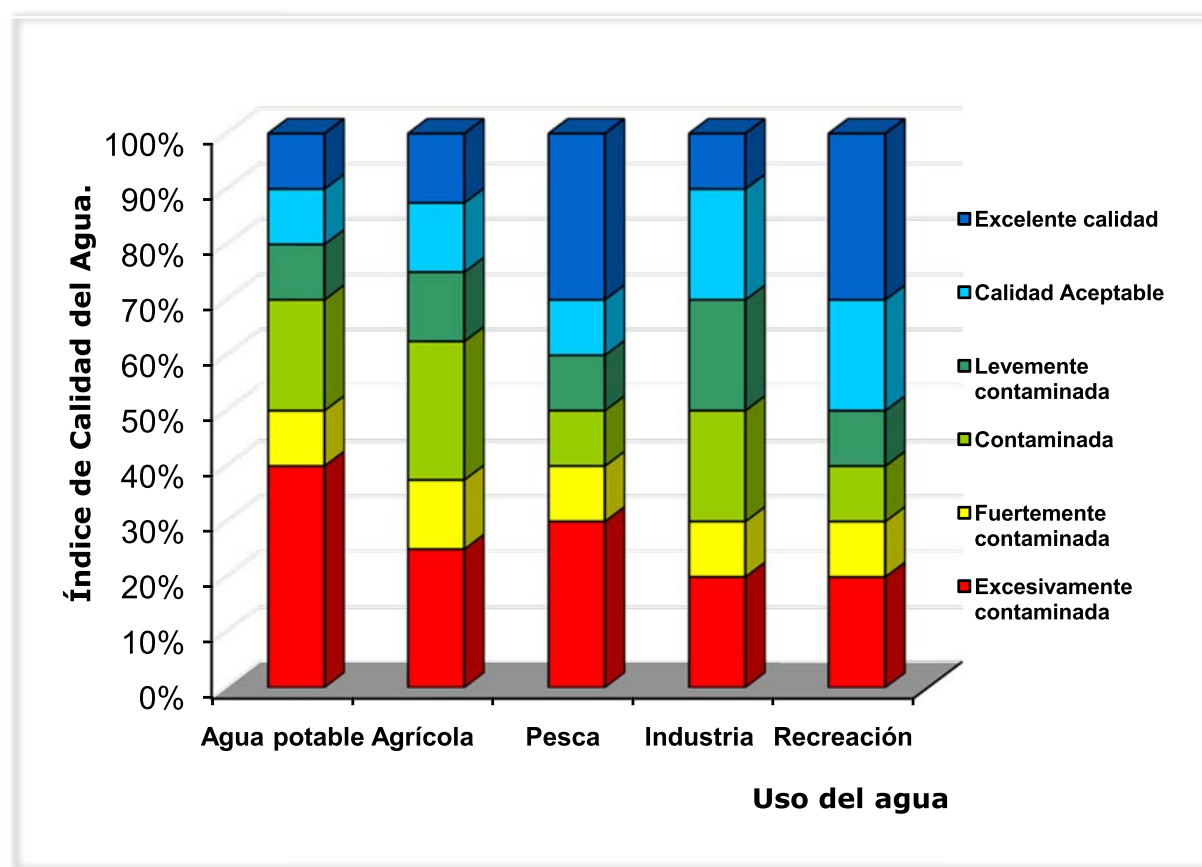


Figura 1. Intervalos de clasificación de calidad del agua en función de su uso

En función de esta clasificación se establecieron los siguientes criterios (Tabla 1), dependiendo del uso al que se destina el agua indicándose las medidas aconsejables.



Tabla 1. Criterios de tratamiento según el ICA

Uso como Agua Potable		
% ICA	Uso	Criterio
90-100	E	No requiere purificación para consumo.
80-90	A	Purificación menor requerida.
70-80	LC	Dudoso su consumo sin purificación.
50-70	C	Tratamiento potabilizador necesario.
40-50	FC	Dudosa para consumo.
0-40	EC	Inaceptable para consumo.
Uso en Agricultura		
90-100	E	No requiere purificación para riego.
70-90	A	Purificación menor para cultivos que requieran de alta calidad de agua.
50-70	LC	Utilizable en mayoría de cultivos.
30-50	C	Tratamiento requerido para la mayoría de los cultivos.
20-30	FC	Uso solo en cultivos muy resistentes.
0-20	EC	Inaceptable para riego.
Uso en Pesca y Vida Acuática		
70-100	E	Pesca y vida acuática abundante.



Tabla 1. Criterios de tratamiento según el ICA (Continuación)

60-70	A	Límite para peces muy sensitivos.
50-60	LC	Dudosa la pesca sin riesgos de salud.
40-50	C	Vida acuática limitada a especies muy resistentes.
30-40	FC	Inaceptable para actividad pesquera.
0-30	EC	Inaceptable para vida acuática.
Uso Industrial		
90-100	E	No se requiere purificación.
70-90	A	Purificación menor para industrias que requieran alta calidad de agua para operación.
50-70	LC	No requiere tratamiento para mayoría de industrias de operación normal.
30-50	C	Tratamiento para mayoría de usos.
20-30	FC	Uso restringido en actividades burdas.
0-20	EC	Inaceptable para cualquier industria.
Uso Recreativo		
70-100	E	Cualquier tipo de deporte acuático.
50-70	A	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias.



40-50	LC	Dudosa para contacto con el agua.
30-40	C	Evitar contacto, sólo con lanchas.
20-30	FC	Contaminación visible, evitar cercanía.
0-20	EC	Inaceptable para recreación.

E Excelente calidad, A Aceptable, LC Levemente contaminada, C Contaminada, FC Fuertemente contaminada, EC Excesivamente contaminada.

El Índice de Calidad da una aproximación del estado del agua pero para obtener mayor información, es conveniente analizar en forma individual cada uno de los resultados de los parámetros con el objeto de establecer si el deterioro se debe a la alta presencia de nutrientes, a la falta de oxígeno o al exceso de presencia de bacterias riesgosas para la salud, etc.

1.2 Estado del Arte

La importancia de contar con información de la calidad de los cursos de agua de un país, estado o ciudad para el eficiente aprovechamiento de este recurso ha llevado a realizar numerosos estudios en cuanto a índices y estimaciones que permitan una interpretación confiable del real estado de los recursos hidrológicos.

El sistema comúnmente usado para la clasificación del agua en ríos es a través de índices de calidad, que permiten asignar un valor a la calidad tomando como referencia un parámetro o grupo de parámetros medidos. Tienen la ventaja de ser fáciles de usar y proporcionan una idea rápida de la calidad. Los índices constituyen una herramienta muy útil para resumir grandes volúmenes de información, permitiendo una rápida interpretación y reconocimiento de las tendencias en la calidad del cuerpo de agua a lo largo del espacio y el tiempo



I.2.1. Ejemplos de Clasificación del Índice de Calidad del Agua en el Continente Europeo.

I.2.1.1 Criterios de clasificación en España ICG (Índice de Calidad General)

Este índice integra 23 parámetros de calidad de aguas, de los cuales 9 se denominan básicos (obligatorios) y son necesarios en todos los casos, los otros 14 son complementarios y sólo se usan para aquellos períodos en los que se analizan. A partir de fórmulas matemáticas que valoran a través de ecuaciones lineales la influencia de cada uno de los parámetros en el total del índice, se deduce un valor final que se sitúa entre 0 y 100, de forma que la calidad del agua queda descrita según los intervalos de la Tabla 2. Las aguas se clasifican en 4 grupos según su calidad para el consumo humano.

Tabla 2. Calidad de Agua según el Valor del ICG

Calidad del Agua	ICG
Excelente	85 – 100
Buena	75 – 85
Regular	65 – 75
Deficiente	50 – 65
Mala	< 50

Tabla 3. Clasificación del Agua para Consumo Humano

Clasificación	Criterio
A1	Aguas potabilizables con un tratamiento físico simple con filtración rápida y desinfección.
A2	Aguas potabilizables con un tratamiento físico-químico normal, como percloración, floculación, decantación, filtración y desinfección.
A3	Potabilizable con un tratamiento adicional a la A2, tales como ozonización o carbón activo.



A4	Aguas no utilizables para el suministro de agua potable, salvo casos excepcionales, y con un tratamiento intensivo.
----	---

Para hacer esta clasificación se usan 20 parámetros de los que los más importantes son: Demanda Química de Oxígeno (DQO), demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Nitrógeno total NTK, Amonio (NH₄⁺), conductividad, Cl⁻, CN⁻, recuentos microbiológicos y algunos metales (Fe, Cu, Cr).

1.2.1.2 Sistema de Evaluación de la Calidad (SEC) de los cursos de agua en Francia.

El sistema de evaluación de la calidad del agua es aplicable a todos los tipos de cursos de agua dulce, obteniéndose resultados comparables entre sí. El sistema identifica la naturaleza de la perturbación y evalúa su incidencia sobre el ambiente y sobre su uso.

La evaluación de la calidad del curso de agua comprende tres grandes aspectos:

- Las características fisicoquímicas del agua
- Las características físicas (hidromorfología e hidrología)
- Las características biológicas.

Para cada uno de estos tres aspectos se realizan 2 evaluaciones principales: la evaluación de los diferentes componentes de la calidad, llamados alteraciones, criterios o indicadores y la evaluación de la incidencia de la calidad sobre las funciones naturales y sobre los usos antropogénicos. El SEC comprende 15 grupos de alteraciones capaces de perturbar las funciones biológicas del curso de agua, es decir, la aptitud del hábitat para permitir la vida acuática y los usos (Tabla 4).

Tabla 4. Alteraciones capaces de modificar la calidad del agua



<i>Alteración</i>	<i>Parámetro</i>
Materia orgánica oxidable	OD o DQO o DBO ₅ , NKJ o NH ₄ ⁺
Amonio	NH ₄ ⁺
Nitratos	NO ₃ ⁻
Fosfatos	PO ₄ ³⁻ o P-Total
Partículas en suspensión	o turbiedad o transparencia
Color	Color
Temperatura	Temperatura
Mineralización	Conductividad
Acidificación	pH
Microorganismos	Coliformes fecales
Fitoplancton	Clorofila, pigmentos o algas
Metales	As, Hg, Cd, Cr, Pb, Zn, Cu, Ni
Pesticidas	Atrazina, Simazina, Lindano, Trifluralina
Microcontaminantes orgánicos	Tetracloroetano, tricloroetileno, tricloroetano

Las alteraciones de calidad son expresadas mediante índices de calidad comprendidos en una escala de 0 a 100, subdividida en 5 clases que, a fin de su representación cartográfica, tienen un color asociado.

Las clases potencialidad biológica, potabilización y aptitud para recreación condicionan fuertemente la evolución de los índices y clases de calidad (tabla 5) en función de las variaciones de concentración de los diferentes parámetros fisicoquímicos.

Tabla 5. Clases de calidad según el valor del SEC del agua, Francia



<i>Índice</i>	<i>Clase</i>		<i>Color</i>
<i>80-100</i>	<i>1^a</i>	<i>Muy buena</i>	<i>Azul</i>
<i>60-80</i>	<i>1b</i>	<i>Buena</i>	<i>Verde</i>
<i>40-60</i>	<i>2</i>	<i>Aceptable</i>	<i>Amarillo</i>
<i>20-40</i>	<i>3</i>	<i>Mala</i>	<i>Naranja</i>
<i>0-20</i>	<i>4</i>	<i>Muy mala</i>	<i>Rojo</i>

El paso de parámetros a índices y clases de calidad se efectúa según cálculos y reglas específicas de calificación, cuyos resultados están tabulados.

El SEC evalúa la calidad del agua para un amplio rango de contaminantes (alteraciones), con una escala que va de 0, pésima calidad, a 100, excelente calidad. Las clases e índices de calidad por alteración permiten la eficaz implementación de acciones sobre las fuentes de contaminación de aguas.

I.2.2. Ejemplo de Clasificación en el Continente Americano

I.2.2.1 Clasificación mediante el Índice de Calidad de Agua de la Fundación Nacional de Sanidad (NSF WQI), U.S.A.

Un índice usado comúnmente es Water Quality Index (WQI) desarrollado por la National Sanitation Foundation (NSF) en 1970. El índice incluye 9 parámetros de calidad de agua. Después de que los parámetros son medidos y registrados, se procede a estimar el valor Q para cada parámetro, mediante gráficas establecidas. Cada valor Q es multiplicado por el factor de ponderación respectivo, que da una idea de la incidencia de ese parámetro en la calidad del agua.



Los nueve resultados son sumados, obteniéndose así el Índice de Calidad de Agua (WQI).

$$WQI = \sum_{i=1}^n QiWi \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

Qi: Índices de calidad

Wi: Pesos específicos

Tabla 6. Calidad asignada según el valor del WQI, U.S.A.

<i>Rango</i>	<i>Calidad</i>
90-100	Excelente
70-90	Buena
50-70	Regular
25-50	Mala
0-25	Muy mala

1.2.2.2 Otro criterio de clasificación mediante el índice de calidad del agua México

La evaluación numérica del ICA, con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de pesos específicos, se debe a Brown *et al.* (1973), obteniéndose a partir de una media geométrica:

$$ICA = \prod_{i=1}^n [Qi^{Wi}] \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

Wi; son los pesos específicos asignados a cada parámetro (i), ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la suma sea igual a uno.

Qi; es la calidad del parámetro (i), en función de su concentración y cuya calificación oscila entre 0 y 100,

Pi (Π) representa la operación multiplicativa de las variables Q elevadas a la potencia W.



1.2.3 Parámetros para el cálculo del ICA

Para calcular el Índice de calidad del agua se debe seleccionar distintos parámetros, de acuerdo a la experiencia internacional se dividen como parámetros obligatorios y relevantes; los parámetros obligatorios son los que tienen un mayor efecto en la calidad del agua, los parámetros relevantes presentan aumento o disminución significativo de la calidad del agua en todas las estaciones de muestreo de la cuenca. En la Tabla 7 se muestran los parámetros utilizados en distintos países para obtener el ICA.

Tabla 7. Comparación de los parámetros utilizados para calcular el índice de Calidad de Agua en diferentes países

Parámetro		Estados Unidos	Francia	España	Uruguay	México (Chápala)
Oxígeno disuelto	%	☒	☒	☒	☒	☒
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	☒	☒	☒	☒	☒
Temperatura	°C	☒	☒	☒	☒	☒
Fosfatos PO_4^{2-}	mg/L	☒	☒	☒	☒	☒
Nitratos NO_3^-	mg/L	☒	☒	☒	☒	☒
Turbiedad	NTU	☒	☒	☒	☒	☒
Sólidos suspendidos totales	mg/L	☒	☒	☒	☒	☒
pH	-	☒	☒	☒	☒	☒
Color	-		☒	☒	☒	☒
Conductividad	-		☒	☒	☒	☒
Coliformes fecales	UFC/100 mL	☒	☒	☒	☒	☒
Cianuro CN^-				☒		☒



Plaguicidas	-	☒		
Amonio (NH_4^+)	mg/L	☒		
Compuestos orgánicos volátiles	-	☒		
Cloruros	mg/L	☒	☒	☒
Dureza	mg/L	☒		☒
As	mg/L	☒		
Hg	mg/L	☒		
Cd	mg/L	☒		
Cr	mg/L	☒	☒	
Pb	mg/L	☒		

1.3 Historia de la cuenca del río Magdalena

Los antecedentes históricos de la cuenca del río Magdalena datan desde el año de 1303, cuando el monarca Culhuacán permitió a los aztecas que habían sido expulsados de la zona de Azcapozalco, asentarse a una área pedregosa junto a un río donde prosperaron y fundaron cuatro pueblos: Atlitlic, “piedra de agua”, Aculco, “lugar del Cuculin”, Ocotepec, “lugar de ocotes”, y Totolapan, “lugar de otores o guajolotes” (Garza, 2000).

Una de las principales causas del fortalecimiento agrícola e industrial del pueblo Magdalena Contreras fue la presencia del río Magdalena ya que las labores productivas desarrolladas como obrajes, ladrilleras, explotación de carbón, huertas, se encontraban en función del aprovechamiento del río.

A finales del siglo XIX, Porfirio Díaz otorgaba la concesión del uso del agua del río a varias fábricas de tejidos de algodón. Estas empresas generaban energía hidroeléctrica mediante dinamos, los cuales sumaban cuatro y estaban distribuidos a lo largo del cauce del río Magdalena. Estas plantas dejaron de funcionar a comienzos de los años sesenta (Ontiveros, 1987).



1.3.1 Ciclo Hidrológico del agua

Aunque el agua es el elemento más frecuente en la tierra, únicamente el 2.53% del total de agua es dulce, el resto es agua salada presente en los mares y océanos. Aproximadamente las dos terceras partes del agua dulce se encuentran inmobilizadas en glaciares y el abrigo de las nieves y la otra tercera parte está situada en los continentes. De esta agua continentales, aproximadamente el 98.9% está presente en aguas subterráneas, el 1 % en aguas superficiales (corrientes y lagos) y el 0.1% forma parte del agua atmosférica. Este 1% de aguas superficiales, revisten una importancia biológica significativamente grande.

Los procesos básicos que incluye el ciclo hidrológico en el continente son: evapotranspiración, precipitación, infiltración, percolación y escorrentía (Figura 2).

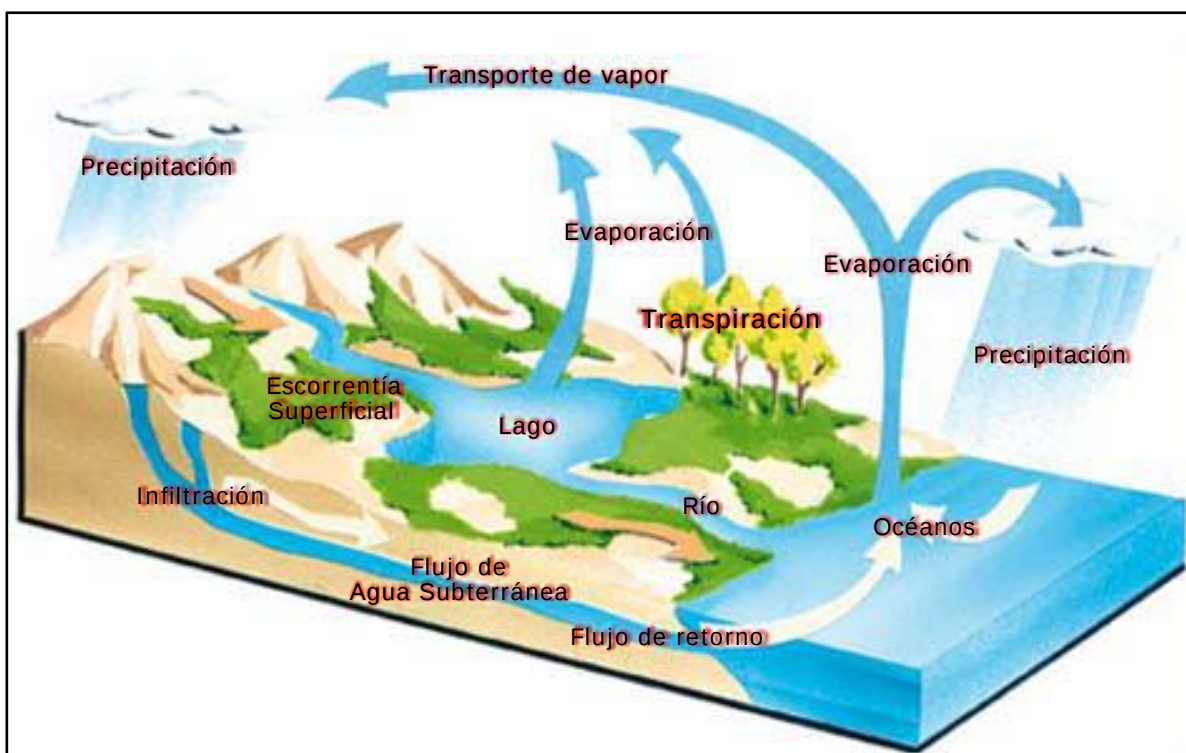


Figura 2. Ciclo hidrológico



La evapotranspiración, se produce a través de la evaporación del agua presente en la superficie terrestre y en los mares, ríos y lagos y la transportación. Esta evapotranspiración determina la formación de vapor atmosférico que al condensarse, bajo determinadas condiciones retorna en parte a la superficie continental en forma de precipitación líquida o sólida. Parte de esta precipitación se infiltra en el suelo desde donde se vuelve a evapotranspirar o percola en el subsuelo, y otra parte escurre superficialmente por la red de drenaje (escorrentía superficial directa) hasta alcanzar la red fluvial. El agua infiltrada en el subsuelo, y que no se evapotranspira, se acumula en poros, grietas y fisuras en los materiales del terreno que, por sus características físicas, tienen la capacidad de almacenar agua. Las formaciones geológicas que tienen la capacidad de almacenar o transmitir agua, se denominan acuíferos. La parte del agua que, mediante percolación, recarga a los acuíferos y vuelve a salir, se denomina escorrentía subterránea.

A lo largo del ciclo hidrológico, como consecuencia de las distintas fases del mismo, el agua va experimentando sucesivas transformaciones físicas en su composición, sin embargo en la realidad la acción antropogénica produce una serie de transformaciones sobre el territorio que dan lugar a un ciclo hidrológico, completamente distinto al que se produciría naturalmente.

1.3.2 Importancia del río Magdalena

La cuenca y el cauce del río Magdalena se localizan a lo largo de la cañada Contreras, también conocida como cañada de los Dinamos. La comisión Nacional del Agua señala: “Este río es uno de los cuerpos de aguas más importantes de la ciudad ya que es empleado como fuente de abastecimiento de agua potable. Su volumen de agua permanente es aproximadamente de $1 \text{ m}^3/\text{s}$: su escurrimiento máximo es de $20.1 \text{ m}^3/\text{s}$, y



la longitud del cauce principal es de 19.7 km. Se estima que solo una quinta parte de su volumen es aprovechada, mediante la planta potabilizadora con capacidad de 200 L/s, ubicada cerca del primer dinamo” (CNA, 1997). Actualmente se está construyendo una nueva planta potabilizadora, ubicada cerca del primera dinamo en la Cañada.

Agua residual en el río Magdalena

La principal problemática del río Magdalena es el deterioro de la calidad del agua. En la zona de conservación los principales problemas son: erosión del suelo, deforestación, pérdida de la cubierta vegetal, tala clandestina, actividades agropecuarias no controladas, asentamientos irregulares y turismo depredador no regulado; conforme se dirige a la zona urbana, a su paso se va convirtiendo en un cuerpo receptor de descargas de aguas residuales, principalmente provenientes del drenaje municipal o doméstico. La cantidad y calidad del agua vertida en el río está relacionada directamente con los asentamientos humanos, con la distribución de agua potable y con el uso del suelo en diferentes regiones del río.

El servicio de drenaje en la Ciudad de México y en la delegación Magdalena Contreras es de tipo combinado, por lo concentra tanto las aguas pluviales como municipales a través de una red primaria de 24 km y una secundaria de 238 km integrada por 8,000 pozos de visita, y 6,000 coladeras pluviales. La red en la zona de conservación es prácticamente inexistente. Las comunidades asentadas en esta zona cuentan con fosa séptica.

La red de drenaje donde comienza la zona urbana esta cubierta en 100%, sin embargo existen descargas directas a las barrancas y a los cauces del río Magdalena. Esto se debe a que los colectores marginales en las barrancas no operan de manera eficiente. En los últimos 400 m de su trayectoria recibe descargas de varios colectores, acentuando la función de drenaje que ya tenía desde su contacto con los asentamientos irregulares



dentro del suelo de conservación y la posterior descarga del río Eslava en suelo urbanizado.

1.4 Estudios que se han hecho en la zona con anticipación

Desde 1997 el equipo de trabajo sobre algas del Departamento de Ecología y Recursos naturales de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, inició el estudio del río Magdalena. También se realizaron estudios en 2001, la Dirección General del medio Ambiente y Ecología ha determinado la calidad del agua solo en un tramo del río, específicamente en el bosque de la cañada de Contreras localizado en el primer Dinamo.

Otros estudios que se han realizado los lleva acabo la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, quienes han realizado dos tesis una de maestría cuya finalidad fue evaluar la calidad del agua en el río.

Bojorge en el 2006, realizó un estudio determinando la calidad del agua en cuatro estaciones, dos ubicadas en el suelo de conservación y las otras dos ubicadas en la zona urbana en éste trabajo se determinaron variables fisicoquímicas y biológicas. En conclusión se obtiene que el agua no es apta para consumo humano ya que no cumple con la NOM-127.

El segundo estudio está en proceso es una tesis de maestría de Ciencias Biológicas. En dicho estudio se fijaron dieciséis estaciones de muestreo desde el Nacimiento hasta la Avenida Coyoacán.

Estos dos trabajos han permitido observar la degradación paulatina que ha sufrido el río, sobre todo en el área que queda dentro de los Dinamos como resultado del aumento de visitantes y la irresponsabilidad de éstos para recoger los residuos sólidos que generan durante su estancia en esta área.



1.5 Área de estudio.

El río Magdalena es un escurrimiento perenne que tiene una longitud entre 19.7 km. Nace en el sur poniente del Distrito Federal, dentro del eje volcánico transmexicano formando parte de la cuenca de México en la vertiente occidental de la Sierra de las Cruces, al oeste del cerro de la Palma en la Delegación Cuajimalpa, y una pequeña porción del extremo sur de la cuenca ocupa territorio de la sierra del Ajusco. Políticamente la mayor parte se extiende sobre la delegación Magdalena Contreras (78%) y la parte más alta forma parte de las delegaciones Álvaro Obregón (5%), Cuajimalpa (17%) en el Distrito Federal. Esta es una de las principales áreas de recarga de los mantos acuíferos de la ciudad de México. Este río nace en la zona de reserva ecológica, y tiene la singular característica de ser el único río de agua dulce existente en el Distrito Federal y abastecer a gran parte de la población de esta delegación a través de la planta potabilizadora del mismo nombre. Tiene un gasto constante de alrededor $1\text{ m}^3/\text{s}$, su escurrimiento máximo estimado es de $20.1\text{ m}^3/\text{s}$, se calcula que la quinta parte es aprovechada y se potabiliza por la planta Magdalena Contreras, pero una vez que su cauce atraviesa la zona urbana funciona como drenaje (SOS y DGCOH, 2000).

El río es el cauce principal de la cuenca que tiene una superficie de 11,088 hectáreas y seis subcuencas. El agua que fluye en el río Magdalena es el producto de los escurrimientos de arroyos y ríos intermitentes y perennes alimentados por las precipitaciones pluviales que después de percolarse escurre por numerosos manantiales.

Las coordenadas geográficas extremas del rectángulo que lo contiene son las siguientes: N $19^\circ 21'$ - N $19^\circ 15'$ y W $99^\circ 10'$

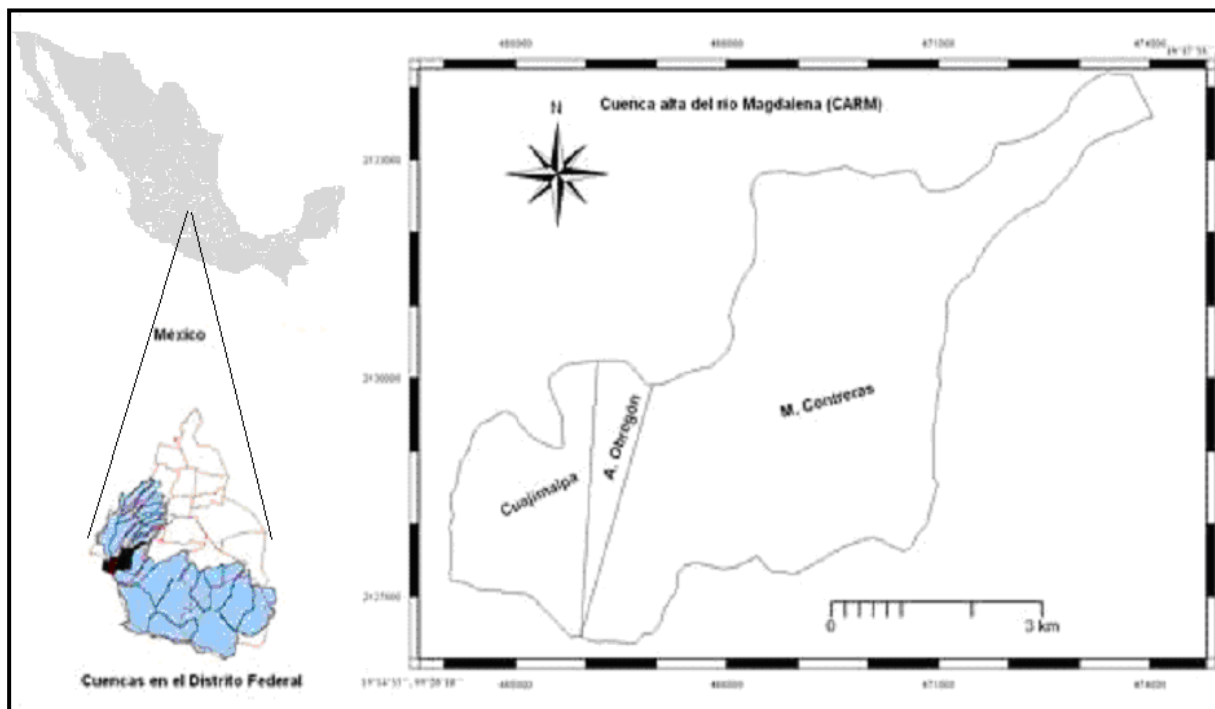


Figura 3. Localización de la cuenca del río Magdalena

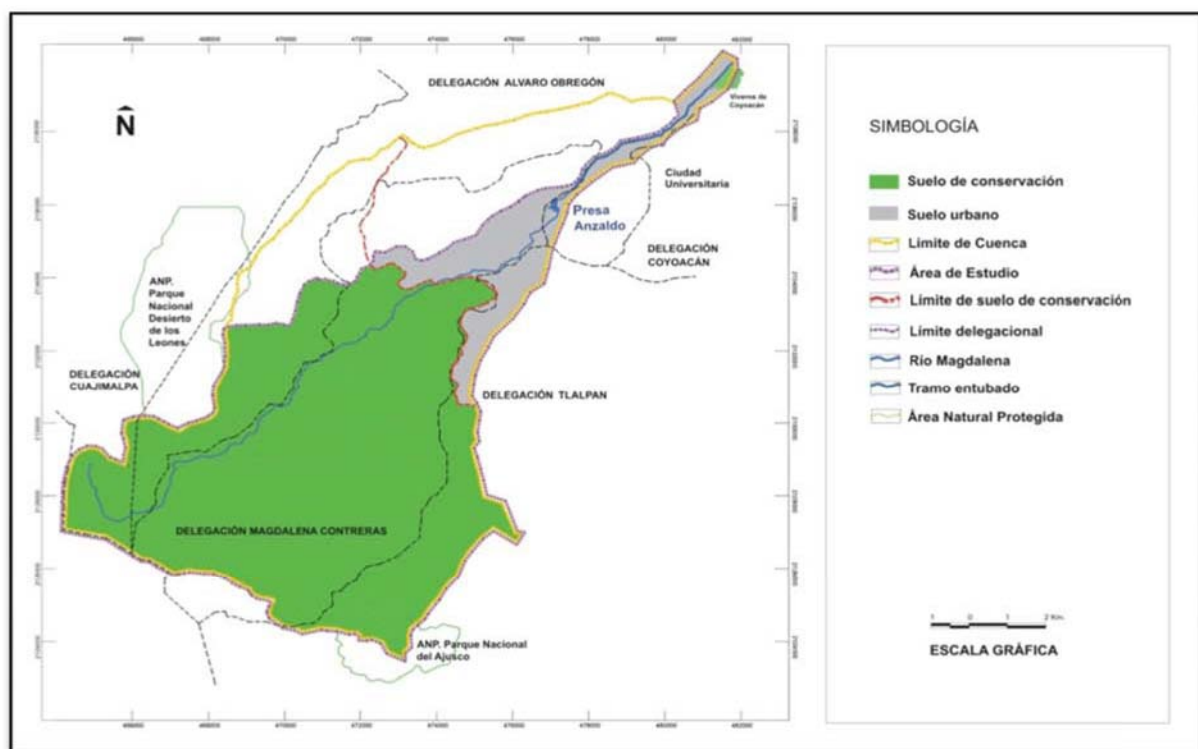


Figura 4. Cuenca Natural del río Magdalena



II. Objetivos



Objetivo general

Determinar la calidad del agua del río Magdalena en base a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Objetivos particulares

- Realizar adecuadamente la toma de muestras siguiendo el protocolo, para obtener resultados más confiables.
- Evaluar la calidad del agua como respuestas de las variaciones de los parámetros fisicoquímicos (conductividad, demanda bioquímica de oxígeno, grasas y aceites, nutrientes [N-NO₃⁻, N-NH₃, Fósforo total], oxígeno disuelto, pH, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, temperatura, turbiedad, tensoactivos –sustancias activas al azul de metileno-; y parámetros microbiológicos (coliformes fecales y coliformes totales) en época de estiaje.
- De acuerdo a la información generada realizada en los análisis de los 15 parámetros obtener el índice de calidad del agua.
- Analizar la información del índice de calidad del agua y asignar el valor del estado de calidad del agua.



Justificación.

La necesidad de evaluar la calidad del agua en el Río Magdalena, se justifica en el contexto de la problemática en materia hidrológica, y ambiental que padece el Distrito Federal. Esta problemática nos refieren a la contaminación y desaprovechamiento de los cuerpos de aguas superficiales que hoy en día están convertidos en prácticamente drenajes. La ciudad de México originalmente era poseedora de una gran riqueza hidrológica. Actualmente solo un río queda vivo y esta deteriorándose día con día, el río Magdalena, localizado en su mayor parte en la delegación Magdalena Contreras. Su importancia radica fundamentalmente en su aprovechamiento como fuente abastecedora de agua, como uso recreativo, y uso agrícola.

Debido a la importancia para el Distrito Federal como único río y fuente abastecedora de agua, resulta relevante realizar estudios enfocados a la evaluación de su calidad. Así mismo es importante estudiar la influencia de los parámetros (físicos, químicos y microbiológicos) para que posterior a este estudio se propongan alternativas para recuperar el río.

Hipótesis

La calidad del agua en el río Magdalena será distinta en cada estación de muestreo, debido a que depende de numerosos factores, como: el clima, los elementos arrastrados por el río y sus orígenes, etc. Sin embargo se espera que haya mayor variabilidad en la calidad del agua del río, por la mezcla de agua con diferente calidad, por ejemplo, mezcla con agua de descargas domésticas o municipales. Por lo tanto la calidad del agua en el río Magdalena va ir disminuyendo durante su recorrido desde el nacimiento hasta su unión con el río Churubusco.



III. Métodos y materiales



3.1 Ubicación y selección de los sitios de muestreos

Lo primero que se realizó para evaluar la calidad del agua en el río Magdalena fue un recorrido de campo, de tal manera que se identificara físicamente el área de estudio. Una vez realizado este recorrido se tomaron en cuenta los siguientes criterios para la selección de las estaciones o sitios de muestreo:

- Suficiente gradiente del río y profundidad,
- Sección uniforme y firme
- Estabilidad de la zona sin obstrucciones, de fácil acceso
- Antes y después de una intersección con otro río o descarga
- Cerca de un punto de referencia

Con los criterios antes mencionados se seleccionaron diecinueve puntos de muestreo (estaciones) a lo largo del río, considerando desde el nacimiento del río hasta la avenida Coyoacán. Evitando que la localización de los puntos de muestreo se encontrara muy cerca de la confluencia de descargas o punto de contaminación.

Cada uno de los puntos de monitoreo, se localizó con un GPS (Ver Anexo I Tabla 15, coordenadas de las estaciones), se ubicaron en un mapa de una escala de 1:50,000 (Ver anexo II, Figura 16), permitiéndonos una fácil ubicación en campo, además se realizó una descripción detallada de cada una de las estaciones, se sacaron fotografías de los sitios de muestreo y sus alrededores (Ver anexo I. Archivo fotográfico)

Los muestreos se realizaron durante cuatro meses (Enero 2008-abril 2008). Se muestreaban 9 estaciones (zona de conservación) una vez la semana, y la siguiente semana se muestreaban las diez estaciones restantes (zona urbana). Cada quince días se obtenían resultados de



todas las estaciones en el río Magdalena. La localización, transporte y recolección se realizó siguiendo un protocolo de muestras (Ver anexo III). En la Figura 5 se muestra el diagrama general para evaluar la calidad del agua en el río Magdalena.

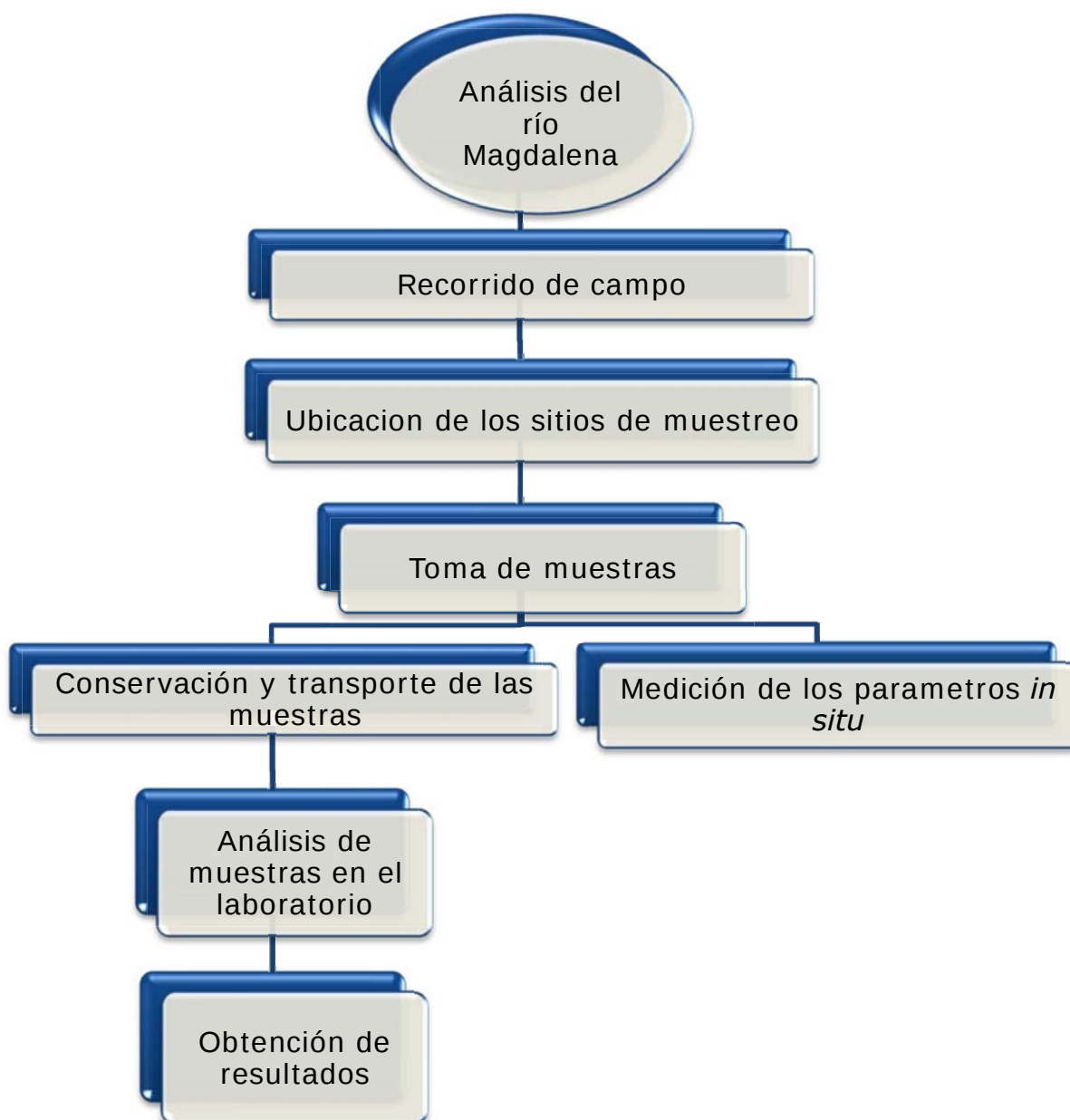


Figura 1. Diagrama general de la metodología realizada en el río



3.2 Toma de muestras

Las muestras se colectaron aproximadamente a la misma hora los días de muestreo, en botellas de vidrio con capacidad de 1L en el caso de grasas y aceites, en botellas de plástico con capacidad de 2L (DBO₅, NH₃, NO₃⁻, PT, SST, SAAM, Turbiedad) y en bolsas estériles marca Nasco Whirl-Pak con capacidad de 500 mL (análisis microbiológico), se sumergían en el agua superficial a una profundidad media, se identificaban debidamente y se colocaban en hieleras con bolsas refrigerantes a una temperatura entre 4-10 °C, para posteriormente transportarlas al laboratorio del Instituto de Ingeniería; la conservación y el transporte de las muestras están realizados de acuerdo a la NOM-14-SSA1-1993.

Las muestras se colocaban en las hieleras dos hieleras limpias y adecuadas para su transporte, generalmente se mantenían a una temperatura los 4 °C, cuidando de no congelar las muestras.

Para realizar la toma de muestras adecuadamente, el personal utilizó bata, guantes desechables sin polvo, cubre bocas y botas.

3.3 Análisis de parámetros medidos *in situ*

Las mediciones que se llevaron a cabo *in situ* fueron las siguientes: temperatura del agua superficial, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y Oxígeno disuelto.

Conductividad Temperatura y Sólidos Disueltos Totales (SDT).

Estos tres parámetros se determinaron con un equipo HACH CONDUCTIVITY/TDS METER modelo- 44600-00. La sonda se colocaba centrada en el caudal del río, a una profundidad media (el río tiene una profundidad de 60-70cm)



Oxígeno disuelto. El oxígeno disuelto se medía directamente en el caudal de río, utilizando un medidor de oxígeno WTW multi 350i disuelto (con electrodo de membrana sensitiva al oxígeno WTW OxiCalR-CX, de tipo galvanizo o polarizado).

3.4 Trabajo de laboratorio

pH. Éste parámetro se determinó por medio de un electrodo utilizando un potenciómetro marca Cole-Parmer, Modelo 05669-20 Microcomputer pH-vision.

***Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)*.** Se llevo acabo de acuerdo a la NMX-AA-028-SCFI-2001 análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas. Utilizando un medidor de oxígeno YSI Modelo 51B OXIGEN METER. Electrodo para el medidor de oxígeno YSI 5905 DBO₅ Probe.

Turbiedad. La medición se realizó en un Turbidímetro HACH 2100P Turbidimeter.

Sólidos Suspendidos Totales. El análisis de sólidos suspendidos totales se realizaba de acuerdo a la Norma NMX-AA-034-SCFI-2001 Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales.

Tensoactivos. El método se llevo acabo de acuerdo a la Norma NMX-AA-039-SCFI-2001. Determinación de sustancias activas a al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

Grasas y aceites. El método se llevo acabo de acuerdo a la Norma NMX-AA-005-SCFI-2000 método de prueba.



Fósforo total. El análisis se llevo a cabo mediante la norma NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de Aguas - Determinación De Fósforo Total En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba (Cancela a la NMX-AA-029-1981).

Nitrógeno amoniacal $N-NH_3$. El análisis se llevo a cabo mediante NMX-AA-026-SCFI-2001 Análisis de Agua - determinación de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas

Nitrato. El análisis fue realizado de acuerdo a la Norma NMX-AA-079-SCFI-2001- Análisis de aguas - determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF). La determinación de CT y CF se llevo acabo de acuerdo a la Norma NMX-AA-102-SCFI-2006. Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva – método de filtración en membrana.



IV. Resultados y discusión



Para conocer la calidad del agua del río Magdalena, se obtuvieron resultados de 15 parámetros, en cada una de las estaciones de muestreo, en la tabla 8 observamos el promedio de todas las determinaciones, así también la desviación de cada uno de ellos.



Tabla 1. Resultados promedio de los parámetros determinados entre los meses enero y abril del 08, de cada estación en el río

Sitios de muestreos en el río Magdalena														
Variable	E1		E2		E3		E4		E5		E6		E7	
	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S
Temperatura ° C	8.0	3.6	8.3	1.6	8.5	1.7	10.2	1.1	11.1	1.0	12.0	1.1	13.3	0.9
OD %	95.7	1.5	92.1	0.8	91.9	1.6	92.8	1.0	93.6	1.3	92.6	0.4	93.2	0.5
Λ (μ S/cm)	76.7	0.0	72.0	0.0	70.0	0.0	83.3	0.0	89.0	0.0	93.0	0.0	98.0	0.0
SDT (mg/L)	39.2	9.4	34.1	1.3	36.5	1.0	41.9	0.7	42.5	0.7	44.6	2.9	43.8	19.1
Turbiedad (UNT)	1.6	0.2	2.1	0.1	0.4	0.1	0.6	0.3	0.4	0.0	3.3	3.4	1.6	1.1
DBO ₅ (mg/L)	2.4	1.4	6.0	2.3	2.9	1.3	2.6	1.3	2.9	1.5	3.1	1.4	3.4	3.2
SST (mg/L)	15.3	5.7	16.7	15.4	11.7	4.9	9.8	4.4	10.9	7.1	12.0	5.3	16.9	14.1
PT (mg/L)	0.0	-	0.4	-	0.1	-	0.0	-	0.0	-	0.1	-	0.1	-
G y A (mg/L)	5.0	-	5.0	-	5.0	-	6.0	-	7.0	-	9.0	-	8.0	-
pH	7.2	0.1	7.5	0.3	7.6	0.2	7.8	0.2	7.8	4.5	7.9	4.5	7.8	0.1
SAAM (mg/L)	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.9	0.2	1.3	0.4	0.6	0.2	0.8	0.2	1.0	0.3	1.0	0.3	4.3	1.9
N-NH ₃ (mg/L)	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-
CF UFC/100mL	26.3	-	1.6	-	22.6	-	195.5	-	56.8	-	44.5	-	940.0	-
CT UFC/100mL	45.4	-	2.2	-	22.3	-	340.4	-	185.1	-	2971.6	-	12237.7	-



Tabla 8. Resultados promedio de los parámetros determinados entre los meses enero y abril del 08, de cada estación en el río

(Continuación).

Estaciones de muestreos en el río Magdalena												
Variable	E8		E9		E10		E11		E12		E13	
	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S
Temperatura °C	8.9	0.8	10.4	0.4	11.5	0.2	13.0	1.5	13.1	1.1	12.9	1.3
OD %	92.7	0.4	86.6	0.7	78.3	1.3	68.2	0.8	68.6	0.9	62.3	0.5
Λ (μ S/cm)	200.0	0.2	173.3	0.0	310.0	0.0	330.0	0.0	327.0	0.0	316.7	0.0
SDT (mg/L)	61.1	24.6	82.5	15.6	155.4	16.3	162.0	23.1	167.2	19.3	158.2	6.5
Turbiedad UNT	8.4	7.1	12.6	4.9	26.0	1.8	33.2	10.2	30.6	14.2	21.8	9.8
DBO ₅ (mg/L)	3.4	0.6	8.9	1.6	23.7	3.9	23.1	1.8	23.4	1.4	19.7	3.7
SST (mg/L)	11.4	4.6	25.7	4.2	57.8	5.5	54.8	7.1	54.8	4.5	48.7	14.6
PT (mg/L)	0.0	-	0.9	-	2.7	-	2.7	-	2.5	-	2.3	-
G y A (mg/L)	8.0	-	12.0	-	29.0	-	54.0	-	47.0	-	55.0	-
pH	7.6	0.0	7.7	0.1	7.5	0.3	7.7	0.2	7.6	0.2	7.6	0.2
SAAM (mg/L)	0.5	0.0	0.9	0.2	3.7	0.9	5.1	1.6	5.3	1.8	3.6	1.8
NO ₃ ⁻ (mg/L)	4.55	2.0	4.8	1.9	7.45	3.2	7.7	3.4	7.35	3.2	14.1	6.6
N-NH ₃ (mg/L)	0.1	-	4.0	-	22.4	-	22.3	-	10.5	-	21.1	-
CF												
UFC/100mL	3464.1	-	17277	-	79254	-	56367	-	60007	-	22546	-
			73		68.8		70.1		36.0		23.7	
CT												
UFC/100mL	20946	-	93738	-	10060	-	14590	-	20070	-	14878	-
			82		250.0		738		1993		748.	



Tabla 8. Resultados promedio de los parámetros determinados en los meses enero y abril, de cada estación en el río (Continuación).

Estaciones de muestreos en el río Magdalena												
Variable	E14		E15		E16		E17		E18		E19	
	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S
Temperatura (° C)	11.9	1.2	14.3	1.2	14.2	0.6	16.9	0.2	19.1	1.4	19.9	2.0
OD (%)	62.6	0.6	60.1	0.5	68.3	0.5	22.0	0.8	11.3	0.2	9.5	0.1
Λ (μ S/cm)	294.0	0.0	480.0	0.2	582.3	0.0	623.3	0.0	726.7	0.0	653.3	0.1
SDT (mg/L)	147.4	16.2	293.0	19.5	292.0	13.9	314.7	18.6	363.3	28.9	328.7	45.4
Turbiedad (UNT)	20.1	2.9	61.8	18.1	82.4	31.1	125.4	37.0	183.9	55.6	57.4	14.0
DBO ₅ (mg/L)	12.5	1.9	35.0	21.3	48.0	5.0	52.8	9.0	54.2	4.2	34.5	8.7
SST (mg/L)	32.4	7.0	86.1	54.5	117.7	14.8	139.7	45.5	136.0	2.6	85.3	21.5
PT (mg/L)	1.5	-	6.4	-	4.8	-	7.1	-	6.3	-	4.0	-
G y A (mg/L)	43.0	-	45.0	-	53.0	-	57.0	-	49.0	-	50.0	-
pH	7.4	0.1	7.6	0.1	7.5	0.0	7.6	0.4	7.6	0.3	7.5	0.4
SAAM (mg/L)	2.6	0.3	11.3	0.6	11.3	0.7	12.7	2.5	12.4	1.6	7.5	0.5
NO ₃ ⁻ (mg/L)	6.8	3.2	18.9	9.0	20.5	9.8	15.8	7.4	15.4	7.2	17.5	8.3
N-NH ₃ (mg/L)	14.6	-	33.1	-	37.6	-	37.0	-	39.0	-	28.3	-
CF (UFC/100mL)	4059704	-	15673323	-	15556349	-	25778477	-	16348125	-	24022104	-
CT (UFC/100mL)	12572274	-	22565570	-	36055512	-	12166431	-	36451863	-	33905156	-



Los valores de temperatura ambiente en las estaciones E1 a E3 aumentan ligeramente, en las estaciones de muestreo E4 a E7 el aumento es más significativo, esto puede explicarse ya que se presentan dos descargas importantes de la planta potabilizadora, a partir de la estación E8 la temperatura va incrementándose conforme el río se acerca a la zona urbana, como se muestra en la Figura 6, en las últimas estaciones de muestreo se observa un aumento mucho mayor, esto está asociado a que la temperatura depende de muchos factores como: la altitud, la hora del día, la circulación del aire, la nubosidad, el flujo y la profundidad del río, pero sobre todo de las descargas que llegan en estos puntos que tienen un mayor caudal.

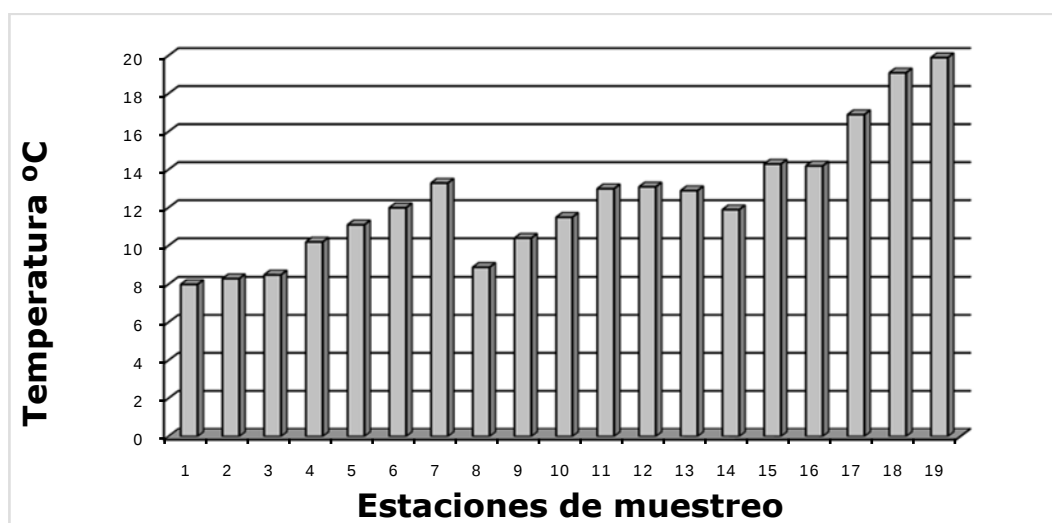


Figura 1. Distribución horizontal de la temperatura promedio en el río

El %OD en los sitios de muestreo E1 a E7 se encuentra dentro de los niveles normales de aguas superficiales no contaminadas (Tabla 8). A partir de la estación E8 comienza a decaer el % de OD en el río hasta la estación E16 donde aumenta ligeramente, esto puede deberse a que en esta parte el ancho del río se reduce y con ello aumenta la aireación, por lo tanto aumenta la cantidad de OD, en la estación 17 el OD disminuye drásticamente, el nivel bajo de OD en estas estaciones indica que existe una demanda de oxígeno en el sistema. Los contaminantes que llegan a



éste río incluyendo los desagües y la materia en descomposición causan tal demanda. La materia acumulada en los sedimentos y los organismos de soporte, consumen oxígeno a medida que descomponen los materiales, por lo que el OD disminuye.

A pesar de que los sistemas naturales se ven afectados principalmente por la geología del área, en el caso del río Magdalena se observa un comportamiento similar de conductividad en las estaciones E1 a E7, la conductividad es afectada tanto por la temperatura y la geología por la cual pasa el agua. En estas estaciones la conductividad es buena, es indicativo de que el agua no está contaminada. Sin embargo en la estación ocho (Figura 7) hay un incremento significativo con respecto a las estaciones anteriores, esto se puede correlacionar con las descargas que se localizan en este sitio. A partir de ésta estación hay un incremento en la conductividad, en la estación 18 se obtuvo la mayor conductividad (726.7 μ S/cm) este valor rebasa los niveles normales de un agua no contaminada, por lo que el agua en esta zona esta contaminada, esto puede explicarse ya que ésta estación se localiza en la presa Anzaldo, aquí el río Magdalena se une con otros ríos que por su grado de contaminación presentan valores más altos de conductividad.

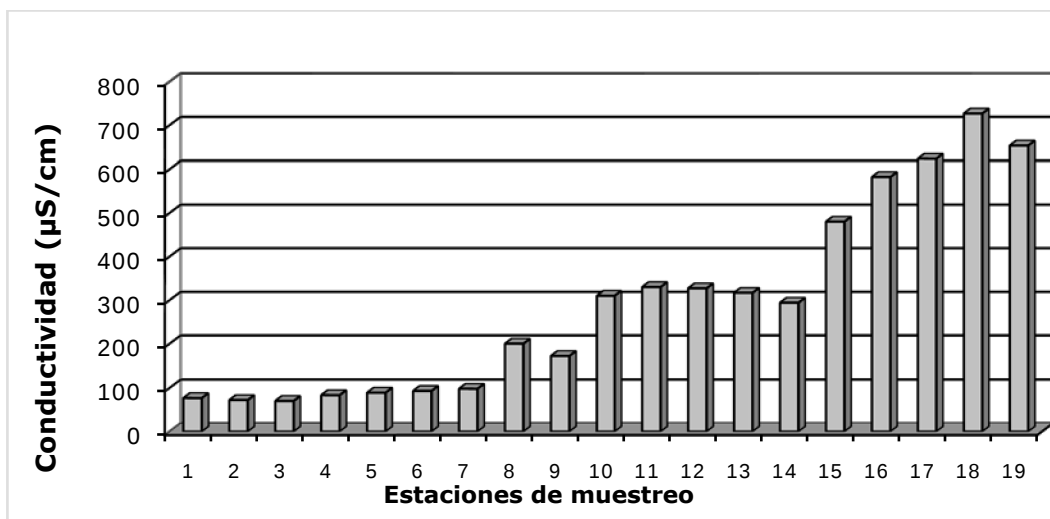


Figura 2. Distribución horizontal de la conductividad promedio en el río



El material en suspensión es el responsable de la turbiedad del agua, en las estaciones E1 a E7 observamos una turbiedad menor a 4UNT (Tabla 8), son valores normales en agua no contaminada, a partir de la estación 8 apreciamos que la turbiedad va aumentando, con ello el deterioro del agua del río, de la misma manera que para conductividad la estación 18 presenta el mayor valor de turbiedad 183UNT, en esta zona el agua está contaminada (ver Figura 8).

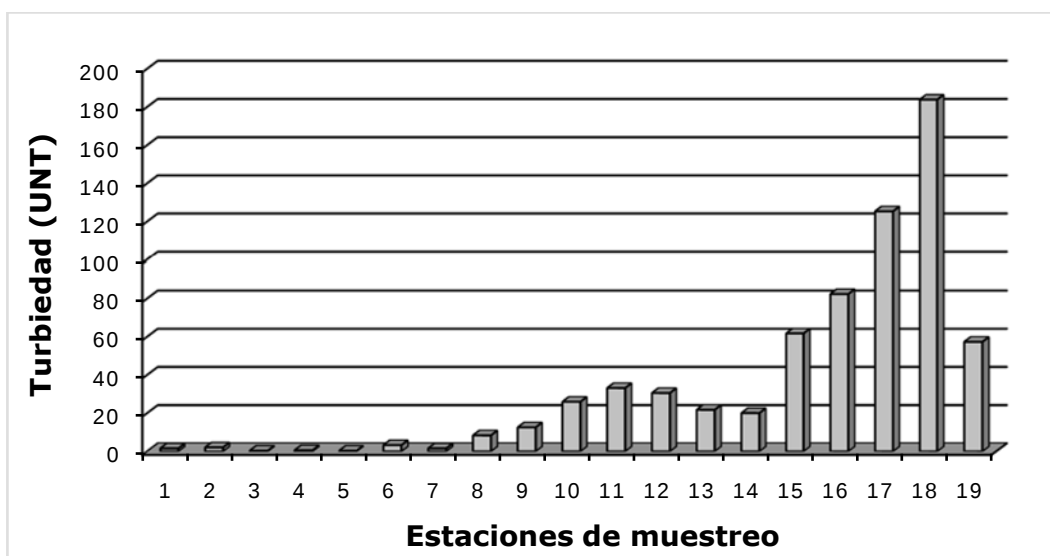


Figura 3. Distribución horizontal de la turbiedad promedio en el río

Los valores de grasas y aceites varían desde 0 a 57 mg/L (Tabla 8), en las estaciones E1 a E8 se obtuvieron valores que normalmente presentan aguas no contaminadas. A pesar de que este parámetro no es considerado como obligatorio dentro del ICA; resultan preocupantes los valores encontrados en el agua a partir de la estación 10 (28mg/L), ya que este aumento se debe a las descargas que hay en el área urbana, en esta zona no se cumple con los límites máximos permisibles para contaminantes básicos en un río (NOM-001-SEMARNAT-1996). Por lo que se considera que el agua es de mala calidad a partir de la estación 10.

Todos los puntos ubicados en la zona de conservación presentan niveles normales de tensoactivos (0.5mg/L) para aguas no contaminadas,



posteriormente la cantidad de SAAM fue aumentando su concentración de acuerdo a la circulación del agua y presentaron valores más altos a partir de la estación 15 (Figura 9). Generalmente estos valores se encuentran en aguas de desecho doméstico o municipal que se vierten al río sin previo tratamiento.

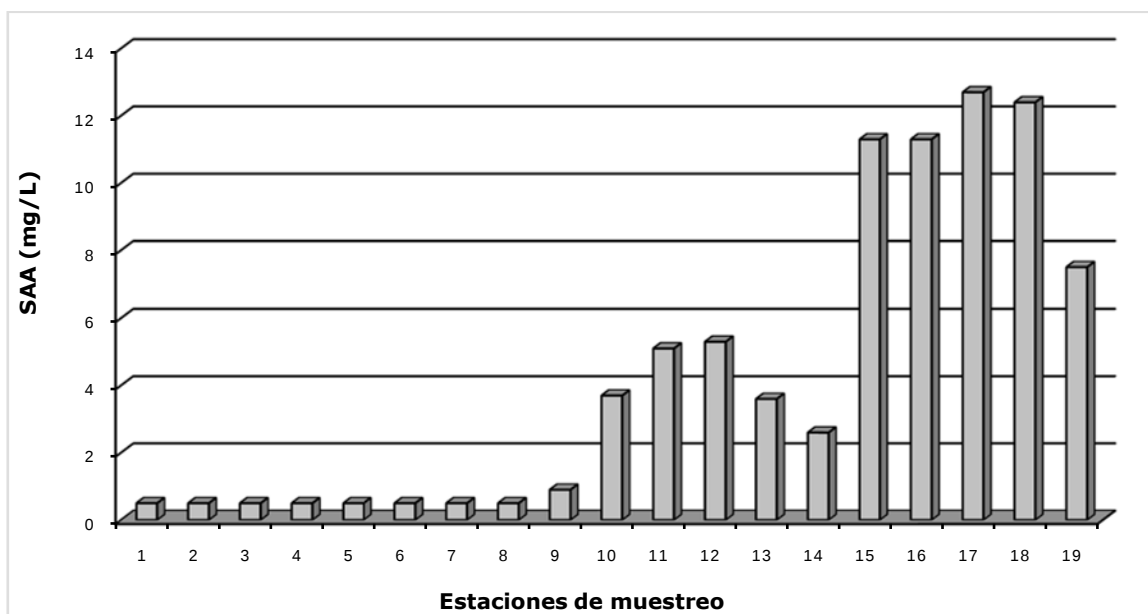


Figura 4. Distribución horizontal de los tensoactivos promedio en el río

Los valores de SDT y SST, al igual que los parámetros anteriores, la estaciones E1 a E8, presentan valores normales para aguas no contaminadas, el problema grave comienza en la zona urbana, en los cuales los niveles de sólidos totales aumentan con ello se deteriora la calidad del agua, ya que estos niveles bloquean la luz del sol, tapan las branquias de los peces, como resultado hay muerte de la vida acuática. En el área natural niveles altos de sólidos totales se pueden deber al deterioro de la tierra. Entre las posibilidades se pueden mencionar áreas de siembra, ganado actividad forestal, construcción de caminos etc.

En la Figura 10 se muestra el comportamiento de los sólidos en el río, en la estación 9 se observa que empiezan aumentar los sólidos totales (SDT



y SST), esta variación se debe a muchas causas, como antes ya se a mencionado la principal causa de éste incremento son las descargas. El resultado concuerda con los valores de turbiedad, a mayor turbiedad mayor es la cantidad de sólidos totales.

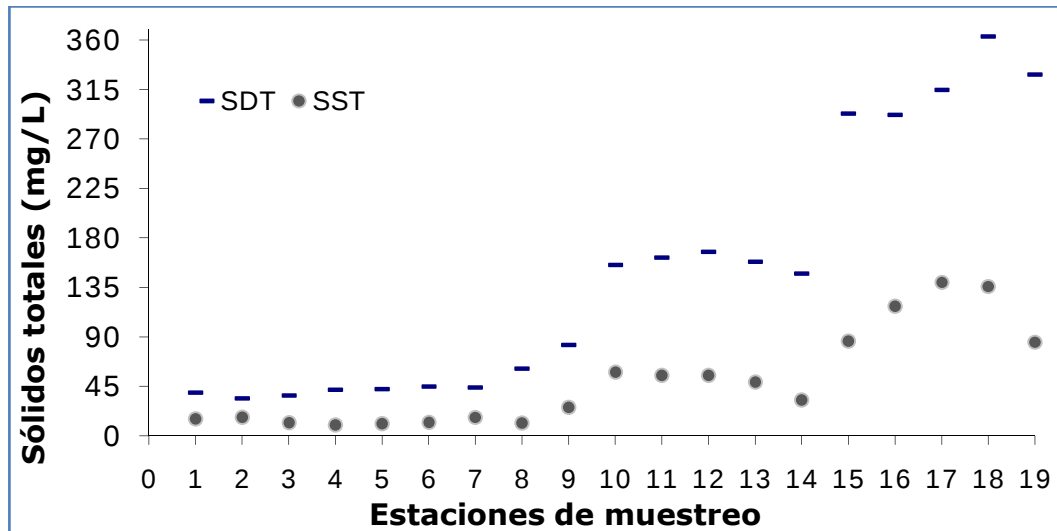


Figura 5. Distribución horizontal de los sólidos totales promedio en el río

La adición de fósforo, nitrógeno y otros nutrientes a un cuerpo de agua puede incrementar el crecimiento de plantas. Con el paso del tiempo, este material crece y combinado con los sedimentos llena lagos y estanques. Este proceso se llama eutrofización. Cuando se suma el exceso de nutrientes y sedimentos, como resultado de la actividad humana, la velocidad de este proceso se acelera significativamente provocando problemas de calidad del agua. Las corrientes con caudal en circulación en los ríos evitan este problema. El río Magdalena presenta un bajo caudal, en algunas partes del río las corrientes son muy lentas (sobre todo en la zona baja), por lo que este proceso se puede presentar. En la Figura 11 observamos el comportamiento de los nutrientes en el río, las estaciones E1 a E6 contienen niveles normales de aguas naturales no contaminadas, en la estación nueve comienza a aumentar la concentración de los nutrientes, este aumento de nitrógeno y fósforo se incorporan al agua provenientes de desechos humanos y animales, materia orgánica en



descomposición y fertilizantes. Generalmente un agua natural contiene nitrógeno en forma de amonio nitrato y nitrito, en el caso de amonio y nitrato niveles altos indican desborde de un drenaje, o presencia de fertilizantes y desechos animales. En cuanto a fósforo total en la estación nueve se observa que se incrementa, el cual estimula el crecimiento de plantas lo suficiente como para sobrepasar la tasa de eutrofización natural. Estos niveles también indican una fuente humana potencial, tal como desagües, fertilizantes, perturbación del suelo, desechos animales y aguas residuales.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las muestras de agua, se tiene que los coliformes fecales y totales rebasaron el límite permisible de la NOM-127, a pesar de ello las estaciones E1 a E4 tienen límites de un agua natural, la calidad del agua es excelente, sin embargo en la estación tres hay un aumento de microorganismos patógenos, esto se correlaciona a que se localizan asentamientos urbanos en una población que se llama "Atlitic". En la Figura 12 observamos el comportamiento de los microorganismos en el río, va aumentando la cantidad de microorganismos a medida que se acerca a la zona urbana.

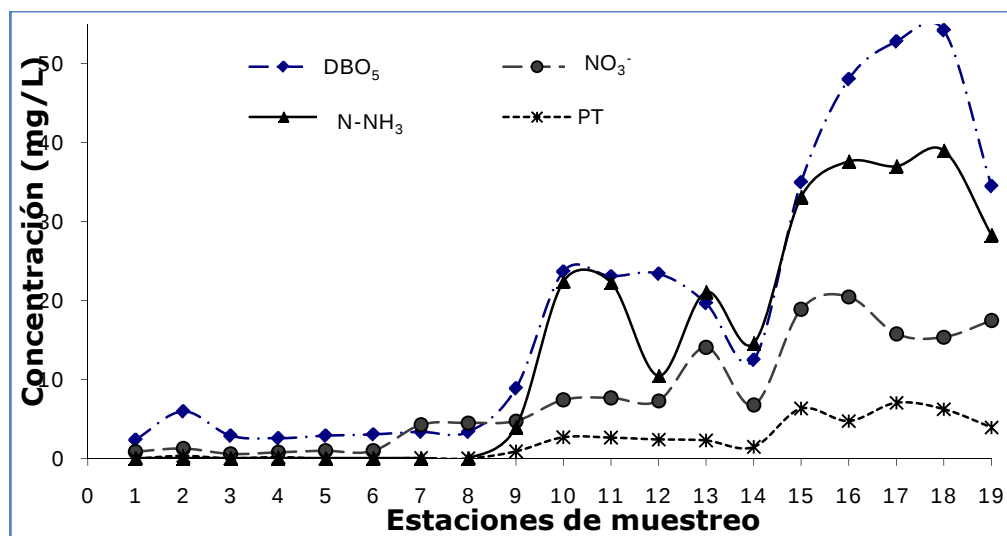


Figura 6. Distribución horizontal de los nutrientes promedio en el río



El aumento de CF y CT (Figura12), se debe a las descargas del drenaje hacia al río, también se relaciona con la cantidad de nutrientes, esto estimula el crecimiento de los microorganismos.

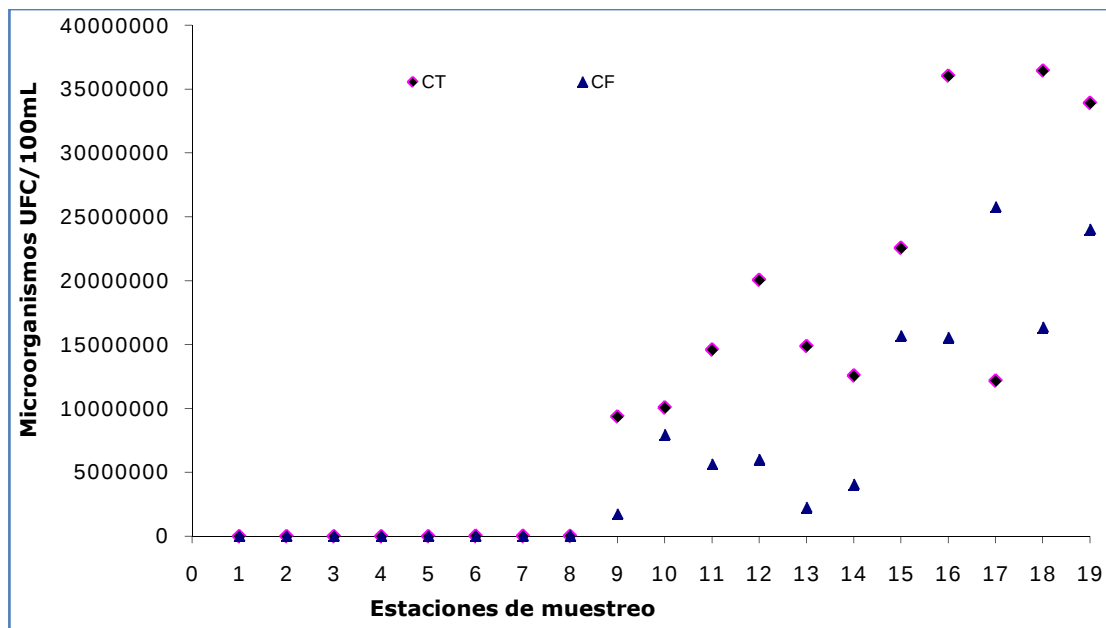


Figura 7. Distribución horizontal de los microorganismos promedio en el río

Determinación del Índice de Calidad del Agua en el río Magdalena

El índice de Calidad del agua se calculara de acuerdo a la metodología propuesta por la Comisión Nacional del agua, sólo que, para un análisis más completo se adicionaron los parámetros nitrógeno como amonio, Nitratos, SDT, SAAM y se descarto nitrógeno total por lo que se consideran 15 parámetros ya que son los más representativos en la calidad del agua en el río Magdalena.

Los parámetros que se consideraron fueron los siguientes:

Parámetros obligatorios:

Temperatura ($^{\circ}$ C), Oxígeno disuelto %, DBO_5 (mg/L), Fósforo total (mg/L), Nitratos NO_3^- (mg/L), Turbiedad (UTN), Sólidos suspendidos totales (mg/L), pH, Coliformes fecales (UFC/100ml) y grasas y aceites (mg/L).

**Parámetros relevantes:**

Conductividad Λ ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Sólidos disueltos totales (mg/L), SAAM (mg/L), Nitrógeno como amonio $\text{N}-\text{NH}_3$ (mg/L) y Coliformes Totales (UFC/100ml).

Se seleccionaron estos parámetros debido a las descargas que hay a lo largo del río Magdalena, mayoritariamente en donde comienza la zona urbana (a partir de la estación 8).

El índice individual de cada parámetro se obtuvo al sustituirlo en las formulas enlistadas en la Tabla 9, estas ecuaciones se derivan a partir de ecuaciones lineales de cada uno de los parámetros. Se asigna un factor de ponderación (W_i) alto a los parámetros que modifican drásticamente la calidad del agua en el río, por ejemplo, para consumo humano el agua no debe contener microorganismos patógenos (coliformes fecales), si están presentes se dice que el agua es inaceptable para consumo humano (NOM-127) por eso a este parámetro se le ha asignado W_i de 4 (Ver Tabla 9).

Tabla 2. Lista de valores de los Índices individuales (I_i) y el factor de ponderación (W_i) para calcular el ICA

Parámetro	I_i	$I_i = 100$	W_i
T ($^{\circ}\text{C}$)	-	-	-
OD	%	%	5.0
Turbiedad	$108 * \text{Tur}^{-0.178}$	$\text{Tur} < 1.545$	0.5
pH	$\text{pH} < 6.7, 10^{0.2335 * \text{pH} + 0.44}$ $\text{pH} > 7.58, 10^{10.422 - 0.293 * \text{pH}}$	$6.7 < \text{pH} < 7.3$	1.0
Λ	$540 * (\text{Cond})^{-0.379}$	$\text{Cond} < 86$	2.0
DBO_5	$120 * (\text{DBO}_5)^{-0.673}$	$\text{DBO}_5 < 1.335$	5.0
SST	$266.5 * (\text{SST})^{-0.37}$	$\text{SST} < 14.5$	1.0
PT	$34.215 * (\text{PT})^{-0.46}$	$\text{PT} < 0.098$	2.0
G y A	$87.25 * (\text{OG})^{-0.298}$	$\text{OG} < 0.64$	2.0
CF	$97.5 * (\text{CF})^{-0.27}$	$\text{CF} < 100$	4.0
CT	$97.5 * (\text{CT})^{-0.27}$	$\text{CT} < 100$	3.0



SAAM	100- $16.678 * SSAM + 0.1587 * SSA$ $M^{^2}$	$SSAM > 6.38 = 0$	3.0
NO_3^-	$162.2 * (NO_3^-)^{-0.343}$	$NO_3 < 4.1$	2.0
N-NH ₃	$45.8 * (NH_3)^{-0.343}$	$NH_3 < 0.103$	2.0
SDT	$109.1 - 0.0175 * (SDT)$	$SDT < 521$	0.5
		$SDT > 6230 = 0$	

Lista de fórmulas de los parámetros, usadas para calcular el Índice de calidad del agua (ICA) sugerido por la Comisión Nacional del Agua (CNA-1998).

Cálculo del índice individual del parámetro turbiedad en la estación 1.

Las unidades del parámetro turbiedad deben ser medidas en UNT. Para calcular el índice individual de acuerdo a la formula mostrada en la Tabla 9, el valor debe ser mayor a 1.545, si es menor a 1.545 el valor que se le asigna es de 100.

Sustitución de la turbiedad en la fórmula:

$$I_{iturb} = 108 * 1.6^{-0.178}, \text{ entonces } I_{iturb} = 99$$

I_{iturb} se multiplica por su factor de ponderación $99 * 0.5 = 48$

Una vez que se obtienen todos los índices individuales de cada parámetro, se multiplica cada uno por su factor de ponderación, finalmente se suman.

En el caso de la estación 1. La suma de los Índices Individuales (I_i) por los pesos específicos (W_i) y la suma de las ponderaciones fueron $E1 \sum I_i W_i = 3105$, y $E1 \sum W_i = 33$ respectivamente (ver tabla 15).

Para obtener el Índice de Calidad del agua en cada estación se sustituyeron los valores en la ecuación 1.

Siguiendo con el ejemplo en el caso de la estación uno, el ICA fue:

$$\%ICA = WQI\% = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} = \frac{3105}{33} = 94$$



Para el sitio uno (E1) la calidad del agua es excelente, sin embargo al observar de cada uno de los parámetros, es fácil notar que no es apta para consumo humano (NOM-127 Agua para uso y consumo humano), ya que tiene una leve contaminación de coliformes, esta agua requiere de una desinfección, generalmente se utiliza hipoclorito de sodio o de calcio, para eliminar algunos los microorganismos patógenos.



Tabla 3. Resultado de los Índices individuales de cada variable en cada estación muestreada

Variable	Índice de las estaciones muestreadas																			
	Wi	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19
OD	5	96	92	92	93	94	93	93	93	87	78	68	69	62	63	60	68	22	11	9
pH	1	100	100	99	86	89	82	86	100	95	100	93	98	96	100	99	100	100	100	100
Λ	2	100	100	100	100	99	97	95	72	77	61	60	60	61	63	52	48	47	44	46
Turbiedad	0.5	99	95	100	100	100	87	99	74	69	60	58	59	62	63	52	49	46	43	53
DBO ₅	5	67	36	59	64	59	56	53	53	28	14	14	14	16	22	11	9	8	8	11
G y A	2	100	100	100	100	100	100	100	47	42	32	27	28	26	28	28	27	26	27	27
CF	4	100	100	100	15	100	100	10	7	1.3	0.9	0.9	0.9	1.2	1.0	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6
CT	3	100	100	100	21	15	11	8	7	1.3	1.3	0.9	1.0	1.3	0.8	1.0	0.9	0.9	0.9	0.6
PT	2	100	54	100	70	100	100	100	100	36	22	22	23	23	28	15	17	14	15	18
SST	1	97	94	100	100	100	100	94	100	80	59	61	61	63	74	51	46	43	43	51
SAAM	3	99	99	99	99	99	99	99	92	86	41	19	17	42	58	0	0	0	0	0
NO ₃ ⁻	2	100	100	100	100	100	100	98	96	95	81	81	82	65	84	59	58	63	63	61
NH ₃	2	100	100	100	100	100	100	100	100	28	16	16	20	16	18	14	13	13	13	15
SDT	0.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100



Tabla 4. Suma de las variables en cada estación para finalmente obtener el Índice de calidad del agua

ΣiWi de las estaciones muestreadas																				
Variable	Wi	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19
OD	5	478	460	460	464	468	463	430	463	433	391	341	343	311	313	500	342	110	57	47
pH	1	100	100	99	86	89	82	86	100	95	100	93	98	96	100	99	100	100	100	100
Λ	2	200	200	200	200	197	194	190	145	153	123	120	120	122	125	104	97	94	89	93
Turbiedad	0.5	50	48	50	50	50	44	50	37	34	30	29	29	31	32	26	25	23	21	26
DBO ₅	5	333	179	293	318	293	282	263	265	138	71	72	72	81	109	55	44	42	33	55
OG	2	200	200	200	200	200	200	200	94	83	64	53	55	53	57	56	53	52	55	54
CF	4	400	400	400	61	400	400	40	28	5	3	4	4	5	4	3	2	3	3	3
CT	3	300	300	300	63	45	34	24	21	4	4	3	3	4	2	3	3	3	3	2
PT	2	200	108	200	140	200	200	200	200	71	43	44	45	47	57	29	33	28	29	36
SST	1	97	94	100	100	100	100	94	100	80	59	61	61	63	74	51	46	43	43	51
SAAM	3	297	297	297	297	297	297	297	275	258	124	57	50	126	173	0	0	0	0	0
NO ₃ ⁻	2	200	200	198	200	200	198	197	193	172	163	161	34	131	168	0	115	126	0	122
NH ₃	2	200	200	200	200	200	200	200	200	57	32	32	41	32	37	28	26	27	26	29
SDT	0.5	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Σ	33	3105	2836	3047	2430	2789	2744	2321	2171	1633	1258	1119	1005	1151	1301	1004	936	699	508	669
ICA	%	94	86	92	74	85	83	70	66	49	38	34	30	35	39	30	28	21	15	20



Análisis y discusión del Índice de calidad del agua

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten observar que la degradación del río Magdalena se va dando de manera gradual.

En las estaciones de muestreo E1 y E3 presentaron un %ICA 94 y 92 respectivamente, es decir el agua en esta zonas es de excelente calidad para cualquier uso (de acuerdo al ICA), se confirma que hay presencia de vida acuática. A pesar de que el agua es de excelente calidad, para consumo humano necesita previo tratamiento, ya que no cumple con la NOM-127-SSA-1994, la cual estipula que los CF y CT deben estar ausentes en el agua. En E1 la contaminación de coliformes es principalmente de origen animal ya que la zona es de acceso restringido.

Para la estación E3, E5 y E6 el ICA obtenido fue de 86, 85 y 83 % respectivamente, la calidad en estas zonas es aceptable, para consumo humano y para la industria, es decir, requieren previo tratamiento para ser usada, y es de excelente calidad para los demás usos, para agricultura no requiere purificación, en cuanto a pesca hay vida acuática abundante, con respecto a recreación, se puede llevar a cabo cualquier tipo de deporte acuático.

En las estaciones E4 y E7 el ICA es de 74 y 71 %, para consumo humano, industrial y agrícola se dice que el agua esta levemente contaminada, y es de excelente calidad para recreación, y pesca. Esta agua es dudosa para consumirse sin purificación, para agricultura se puede utilizar en la mayoría de los cultivos, en cuanto a pesca solo se pueden encontrar peces muy sensitivos, y para recreación se puede tener el mismo uso. A partir de la estación E8 con un ICA de 66 %, el agua está contaminada para consumo humano, uso industrial y levemente contaminada para recreación, es decir esta agua no puede ser usada para consumo humano, ya que necesita un tratamiento potabilizador, la pesca es dudosa sin



riesgos a la salud, para uso recreativo se restringen los deportes, no se debe ingerir ya que contiene coliformes totales y fecales. En E9 el ICA es de 49% el agua en esta zona disminuye enormemente su calidad, es notablemente visible la contaminación, el agua puede causar algún riesgo para consumo humano, en esta zona la vida acuática se limita a especies muy resistentes, es dudoso el contacto con el agua, para riego es necesario un tratamiento previo. En las estaciones E10 a 19, de acuerdo al ICA (Tabla 11) la calidad del agua esta excesivamente contaminada para consumo humano, en éstas estaciones es realmente alarmante la contaminación de agua en del río Magdalena, ya que en la zona más baja se observan descargas municipales directas al río, además de que se une con otros ríos, como el río Eslava, que son drenajes abiertos. El agua en estas zonas es inaceptable para consumo humano. En las estaciones E9 a E15 para agricultura el agua puede ser usada en cultivos muy resistentes, es inaceptable para actividad pesquera, y debe evitarse el contacto con el agua. En la estación 16 se debe evitar cercanía con el agua. En las estaciones E18 y E19 el agua se encuentra excesivamente contaminada para cualquier uso, es inaceptable para: el consumo humano, riego, vida acuática, industria y recreación.

En la Figura 12 se observan los índices individuales para los parámetros obligatorios. El pH se mantiene a lo largo del río cercano a la neutralidad, por lo cual no es un parámetro que afecte de manera drástica el ICA. El aumento de Nutrientes y microorganismos disminuye el ICA.

Todos los índices individuales (ver figuras 13 y 14), a excepción de los SDT y el pH, disminuyen a partir de la estación de muestreo 9, la contaminación del río Magdalena a partir de esta estación es debida principalmente a las descargas de aguas residuales.

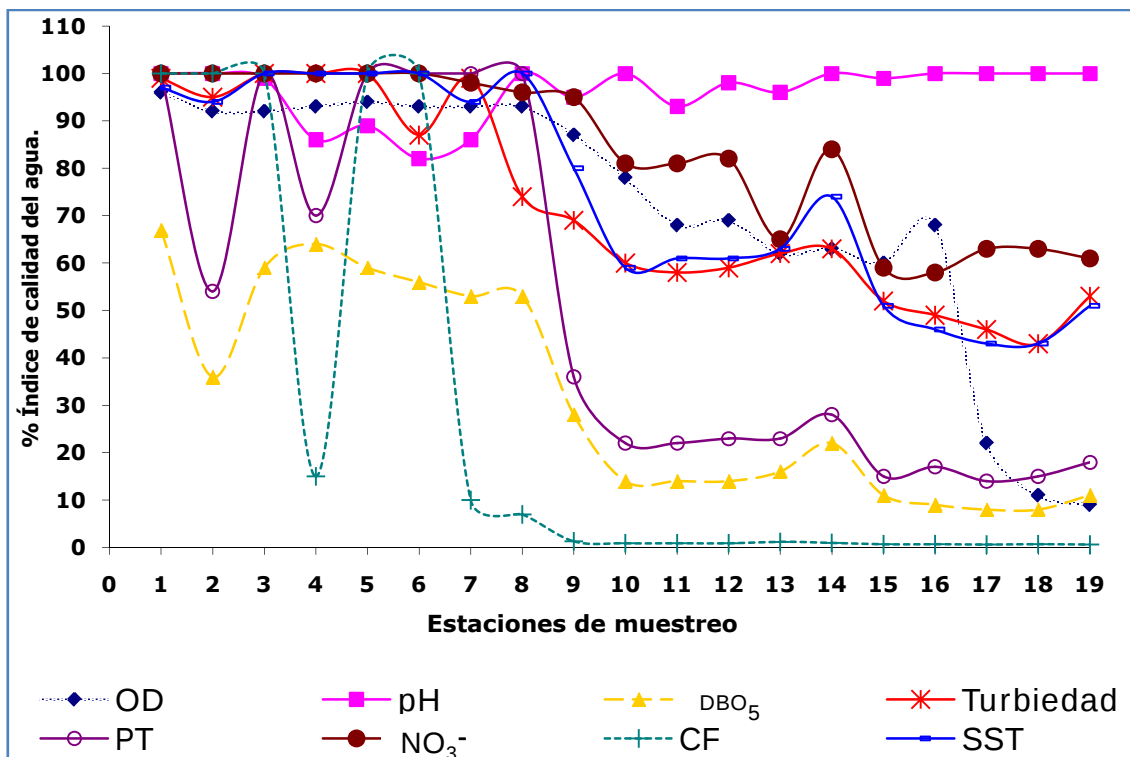


Figura 8. Índices individuales de calidad del agua de los parámetros obligatorios en el río

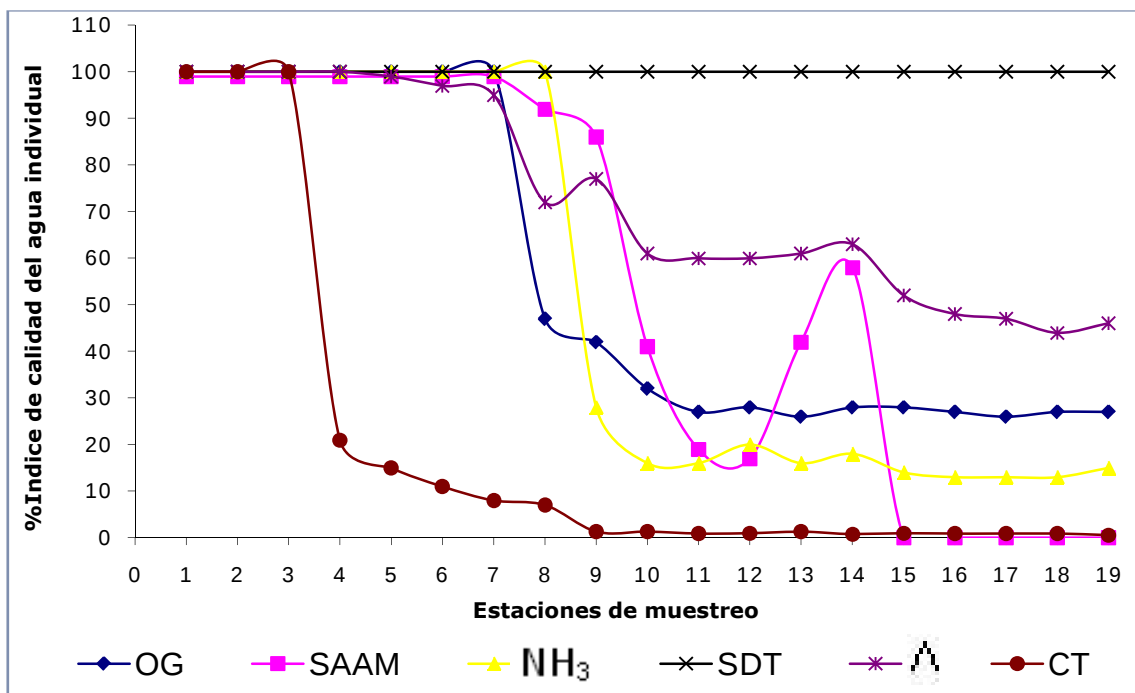


Figura 9. Índices individuales de calidad del agua de los parámetros relevantes en el río



En la figura 15 se muestran los resultados del índice de calidad a lo largo del río, se observa claramente el deterioro del río sobretodo en el área urbana, sin embargo en la estación 4 ya comienza a deteriorarse el río, esto puede asociarse a que cerca de esta zona hay asentamientos (puestos de quesadillas, y ganado).

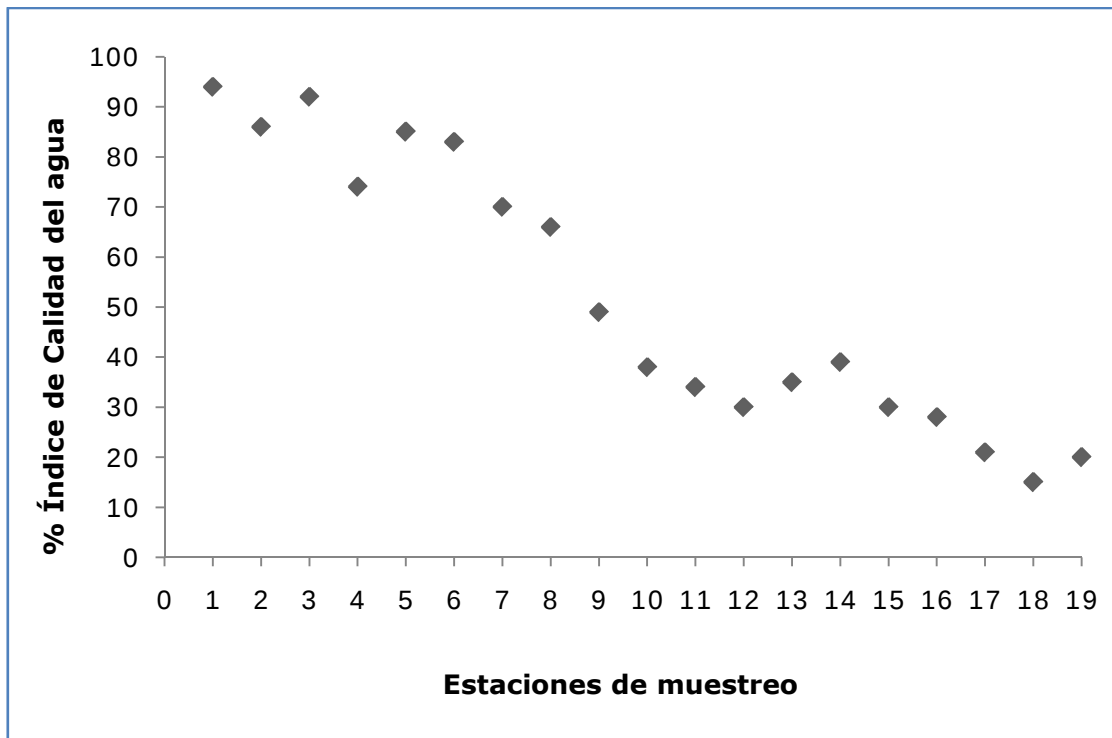


Figura 10. Índice de calidad del agua en el río Magdalena

La disminución del ICA en la zona rural puede deberse a una fuente de contaminación de origen animal, sobre todo en el sitio de muestreo E8 ya que se localiza un establo cerca. Para los demás sitios, como es de esperarse la disminución del ICA se debe a las actividades humanas ya que las descargas son de tipo municipal y algunas descargas clandestinas procedentes de casas habitación.



Conclusiones

El Índice de Calidad del Agua es una buena herramienta que ayuda a dar una mejor interpretación de los resultados, sin embargo como es una aproximación, se debe revisar los parámetros individuales, ya que a veces no se obtienen ideas claras de que es lo que realmente está afectando la calidad del agua.

Para obtener mejores resultados de la calidad del agua se debe realizar muestreos en la época de lluvias, y tener una aproximación más acertada del ICA a lo largo de todo el año.

La contaminación del río Magdalena es debida principalmente a las descargas de aguas residuales en la mayoría de sus de sus secciones, sobre todo en la zona urbana. Esto disminuye el posible aprovechamiento y uso del agua ya que contamina a su paso el medio ambiente por malos olores, y como un foco de infección.

La calidad del agua del río en la zona urbana es alarmante, ya que éste se encuentra muy contaminado, sobre todo en la zona más baja se observan descargas municipales directas al río, además de que se une con otros ríos, como el río Eslava, que son drenajes abiertos.

De acuerdo al ICA se concluye que en la zona más alta (nacimiento) de este río presenta una excelente calidad de agua, desafortunadamente en



la zona más baja la calidad del agua es pésima en esta parte el río se ha convertido en drenaje.

Recomendaciones

Con este estudio se pueden tomar las medidas necesarias para mejorar la calidad del agua, y evitar que este río se convierta en un drenaje a cielo abierto.

La mejor manera de proteger la calidad del agua de este río es que se deben controlar de sustancias tóxicas, reducir de fuentes de contaminación no puntual, incrementar la participación del público en proyectos de mejora de la calidad de agua e implementar un plan integral de manejo del agua superficial (como el Plan maestro).

Por otra parte se propone que se haga cumplir con La ley de Aguas Nacionales y su reglamento, la cual establece que todos los usuarios de cuerpos receptores propiedad de la nación deben contar con el permiso de descarga correspondiente, dentro del cual se determinan las condiciones particulares de cumplimiento con la NOM-001-ECOL-1996 y que se implementen acciones permanentes de mantenimiento y conservación de la corriente del río Magdalena tales como vigilancia y un sistema de colectores de drenaje para evitar que existan descargas domésticas.



V. Referencias y anexos.



Bibliografía

1. Bojorge, M. G., Indicadores Biológicos de la calidad del agua en el Río Magdalena, México, D.F. Tesis de Maestría, UNAM, Facultad de Ciencias, 2006
2. C. Jáuregui-Medina, S. Ramírez-Hernández, 'Impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del río Mololoa (Nayarit, México) y propuestas de solución' Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, Vol. 1 serie 3, 2007, pp. 65-73.
3. Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Gobierno de Chile ministerio de obras publicas. 2003
4. F. Kaurish, Y. Younos, 'Developing a standardized water quality index for evaluating surface water quality', Journal of the American Water Resources Association Vol. 43, No.2, 2007, pp. 533-545.
5. Guía De Prácticas Hidrológicas, 5ta edición, Organización Meteorológica Mundial, 1994, pp. 147-173, 227-252
6. Guía para el monitoreo y seguimiento del agua. 2004. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Instituto de Hidrología, meteorología, y Estudios Ambientales. IDEAM. Colombia.
7. H. Hernández, C. Tovilla, 'Water quality and presence of pesticides in a tropical coastal wetland in southern México, Marine Pollution Bulletin Vol. 48, 2004 pp.1130-1141.
8. J. Bartram, R. Balance, Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes, UNEP/WHO. 1996, pp. 609.
9. Jujnovsky, J. Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Tesis de maestría, UNAM, Facultad de Ciencias, 2006.



10. L. F. León, 'Índices de la calidad del agua (ICA), forma de estimarlos y su aplicación en la cuenca Lerma Chápala', Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, 1991, pp. 36.
11. Manual de Monitoreo Biológico y Químico en Arroyos Georgia. 2004. United States Department of Natural Resources Environmental Protection Division. Program Adopt a stream pp. 227
12. NMX-AA-003-1980. Aguas residuales. Muestreo.
13. NMX-AA-005-SCFI-2000 Determinación de Grasas y aceites
14. NMX-AA-007-SCFI-2000. Determinación de la temperatura en aguas naturales y residuales.
15. NMX-AA-028-SCFI-2001. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales
16. NMX-AA-029-SCFI-2001. Determinación De Fósforo Total En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas
17. NMX-AA-034-SCFI-2001. Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
18. NMX-AA-036. Determinación de la acidez total y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
19. NMX-AA-039-SCFI-2001. Determinación de sustancias activas a al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.
20. NMX-AA-079-SCFI-2001. Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.
21. NMX-AA-090-SCFI-1986 Determinación de neblina de ácido fosfórico en los gases que fluyen por un conducto.
22. NMX-AA-099-SCFI-1987 Determinación de Nitrógeno de Nitritos en Agua



23. NMX-AA-102-SCFI-2006. Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva – método de filtración en membrana.
24. NOM-001-ECOL-1996. Límite máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales.
25. NOM-002-ECOL-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado.
26. NOM-003-ECOL-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
27. NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestro de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.
28. R. Brown, L. McClelland, 1970. 'A water quality index-do we dare?' Water Sewage Works Vol. 11, 1970 pp. 339-343.
29. Santiago: DGA, 2004, Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas; realizado por Cade-Idepe Consultores en Ingeniería, Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2007
30. S. H. Dinius, 1987 'Design of an index of water quality', Water Resources Bulletin Vol. 23, No.5, pp 833-842.
31. 40 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1995 19th edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. USA.
32. Water Quality Assessments -A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring, Second Edition World Health Organization, 1996, pp. 651.



33. World Health Organization (WHO), Guidelines for drinking-water quality, 2006.

**Anexo I. Descripción y fotos de los sitios de muestreo**

Tabla 1. Ubicación y descripción de los sitios de muestreo para agua superficial en el río Magdalena.

Sitio	Coordenadas UTM	Ubicación
<i>E1</i>	466688 2126722	4to. Dinamo, Nacimiento del río enfrente de un tronco
<i>E2</i>	465114 2127778	4to. Dinamo primera presa de concreto Cieneguillas
<i>E3</i>	469085 2130253	4to dinamo antes del puente, pasando las ruinas de los dinamos
<i>E4</i>	471291 2132384	3er. Dinamo Atlitic, al final de la comunidad, enfrente del tercer puesto de quesadillas.
<i>E5</i>	473703 2132232	Antes de la planta potabilizadora Magdalena Contreras.
<i>E6</i>	473706 2132235	Después de la planta potabilizadora Magdalena Contreras aguas arriba de la segunda descarga de ésta planta potabilizadora.
<i>E7</i>	473730 2132254	1er Dinamo. Antes del puente de la cañada
<i>E8</i>	475459 2134066	Después de la nueva planta potabilizadora atrás de las casas
<i>E9</i>	473925 2134096	A un lado de la estación de autobuses en la calle Benito Juárez. Aguas arriba de la tercera descarga
<i>E10</i>	475478 2134072	A un lado de la ciclo pista, a un lado del nuevo centro deportivo. Aguas debajo de la tercera descarga
<i>E11</i>	475478	Aguas arriba del río Eslava, enfrente del



	2134072	puente vehicular
E12	475478 2134072	Aguas abajo del río Eslava
E13	477207 2134071	Foro cultural, aguas arriba de la sexta descarga
E14	477222 2134082	Block Búster, enfrente de la avenida Sta. Teresa aguas debajo de la sexta descarga
E15	477222 2134085	Inicio del callejón Sta. Teresa enfrente del Block Búster, aguas abajo de la séptima y octava descarga
E16	477222 2134083	Final del callejón Sta. Teresa enfrente del Block Búster, aguas arriba de la novena y décima descargas
E17	477228 2134091	Atrás del Hotel Camino real cerca a Periférico, entrando por la calle Natán aguas debajo de la novena y decima descargas
E18	477233 2135914	En el colector de la Presa Anzaldo
E19	482479 2139596	Al lado de una pequeña planta potabilizadora entre las Avenidas Churubusco y Coyoacán



Archivo fotográfico. Fotografías de las diecinueve estaciones de muestreos en el río Magdalena.



E1



E2



E3



E4



E5



E6



E7



E8



E9



E10



E11



E12



E13



E14



E15



E16



E17



E18

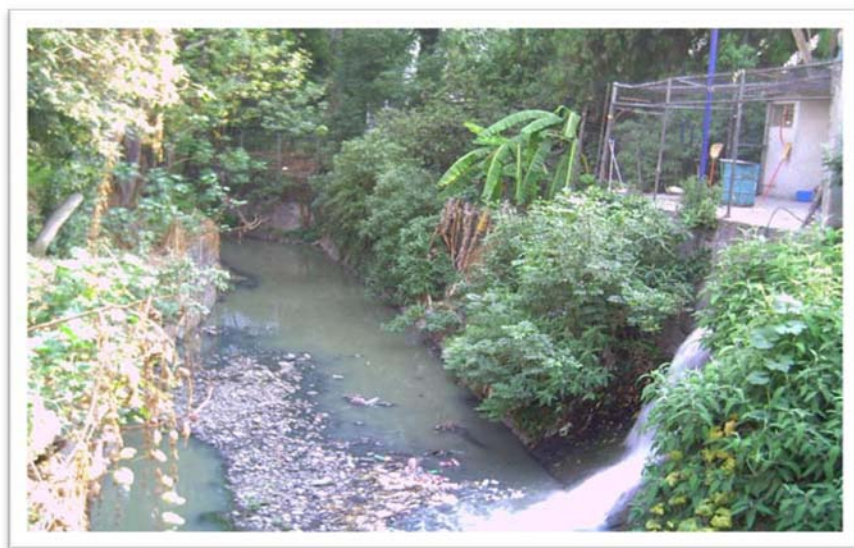
*E19*

Tabla 2. Ubicación y descripción de las descargas en el río Magdalena.

<i>Descarga</i>	<i>Coordenadas UTM</i>	<i>Ubicación</i>
1	465114 2127778	1er Dinamo. Ubicada en la planta potabilizadora (izquierdo)
2	469085 2130253	1er Dinamo. Ubicada en la planta potabilizadora (derecho)
3	471291 2132384	1er Dinamo. Después de la nueva planta potabilizadora, descarga doméstica, ubicada de tras de las casas
4	473703 2132232	Benito Juárez
5	473706 2132235	Edificio del CISEN
6	473730	Colector Av. Sta. teresa/Av. México



	2132254	
7	475459 2134066	Colector Av. Sta. teresa/av. México
8	473925 2134096	Atrás hotel Camino Real y hospital los Ángeles
9	475478 2134072	Atrás hotel camino real y hospital los Ángeles
10	475478 2134072	Drenaje marginal atrás hotel camino real.
11	475478 2134072	Río Eslava

Archivo fotográfico. Fotografías de las descargas directas al río Magdalena.



Descarga 1



Descarga 2



Descarga 3



Descarga 4



Descarga 5



Descarga 6



Descarga 7



Descarga 8



Descarga 9



Descarga 10

Corriente hidrológica del río eslava



Fuente: foto tomada por el instituto de ingeniería, UNAM, se observa un vertedor que presenta escurrimiento al río magdalena.



Anexo II. Mapas

Figura 1. Ubicación de las diecinueve estaciones de muestreo.

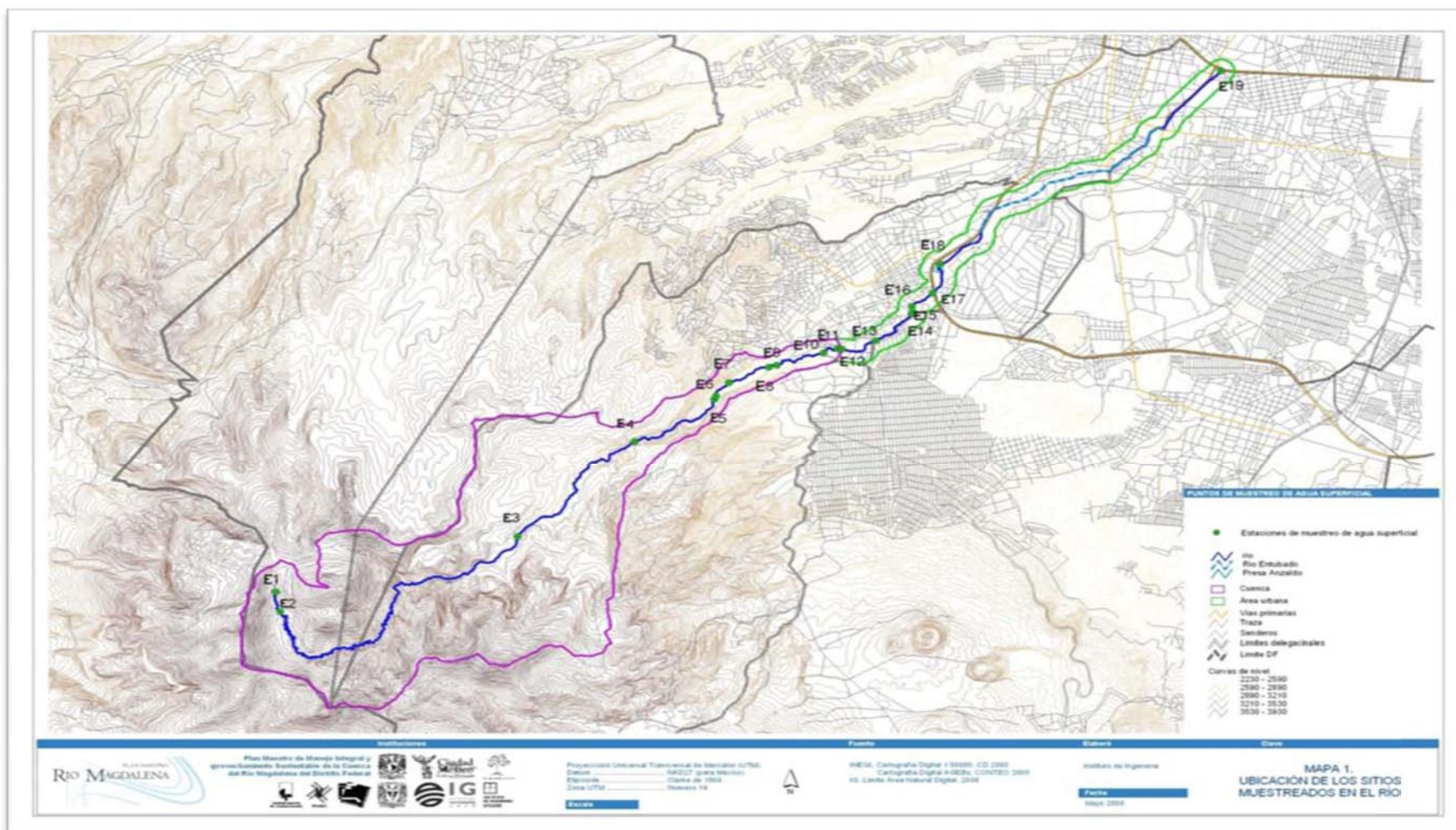




Figura 2. Calidad del agua para consumo humano

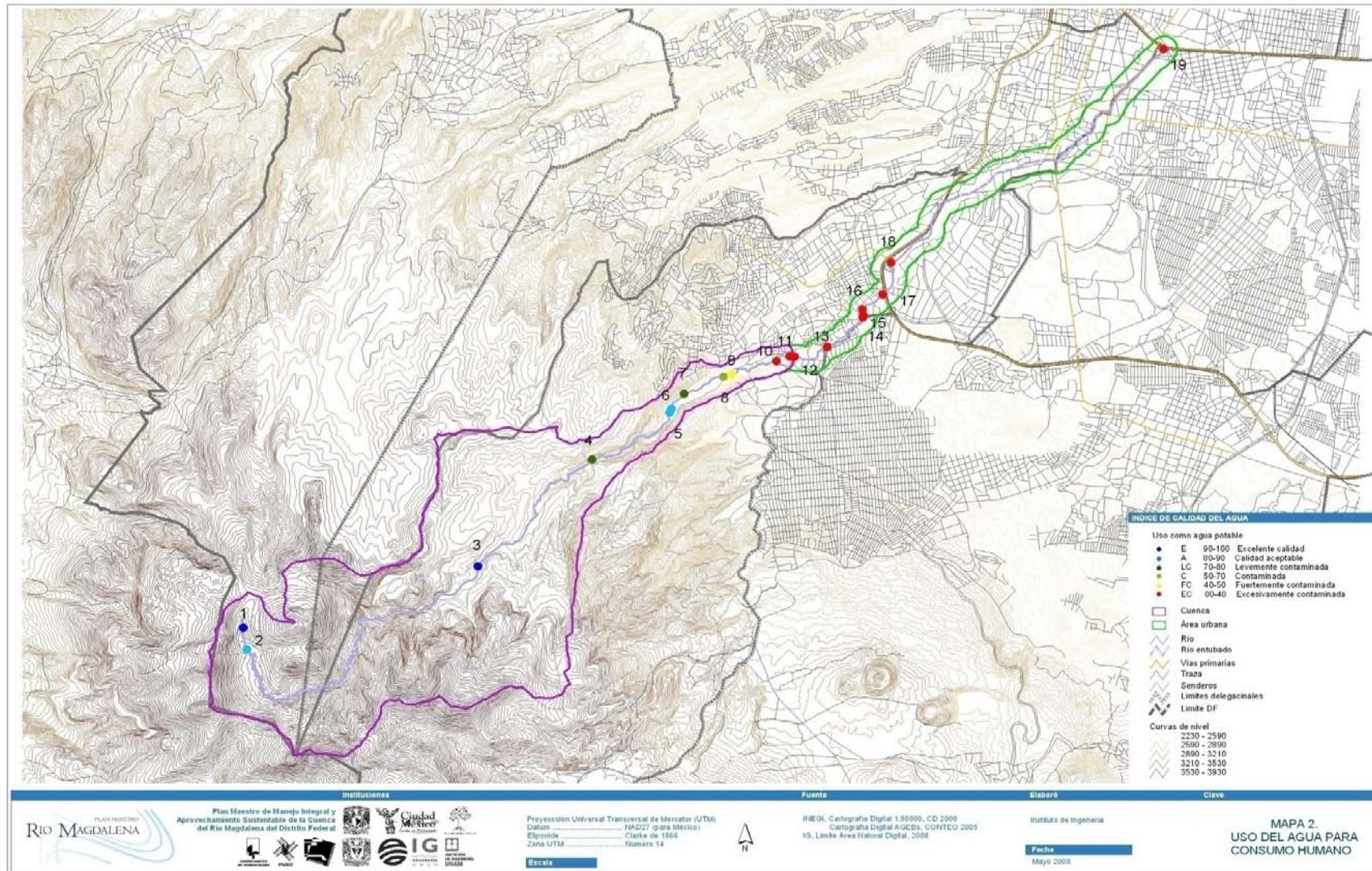




Figura 3. Calidad del agua para uso recreativo.

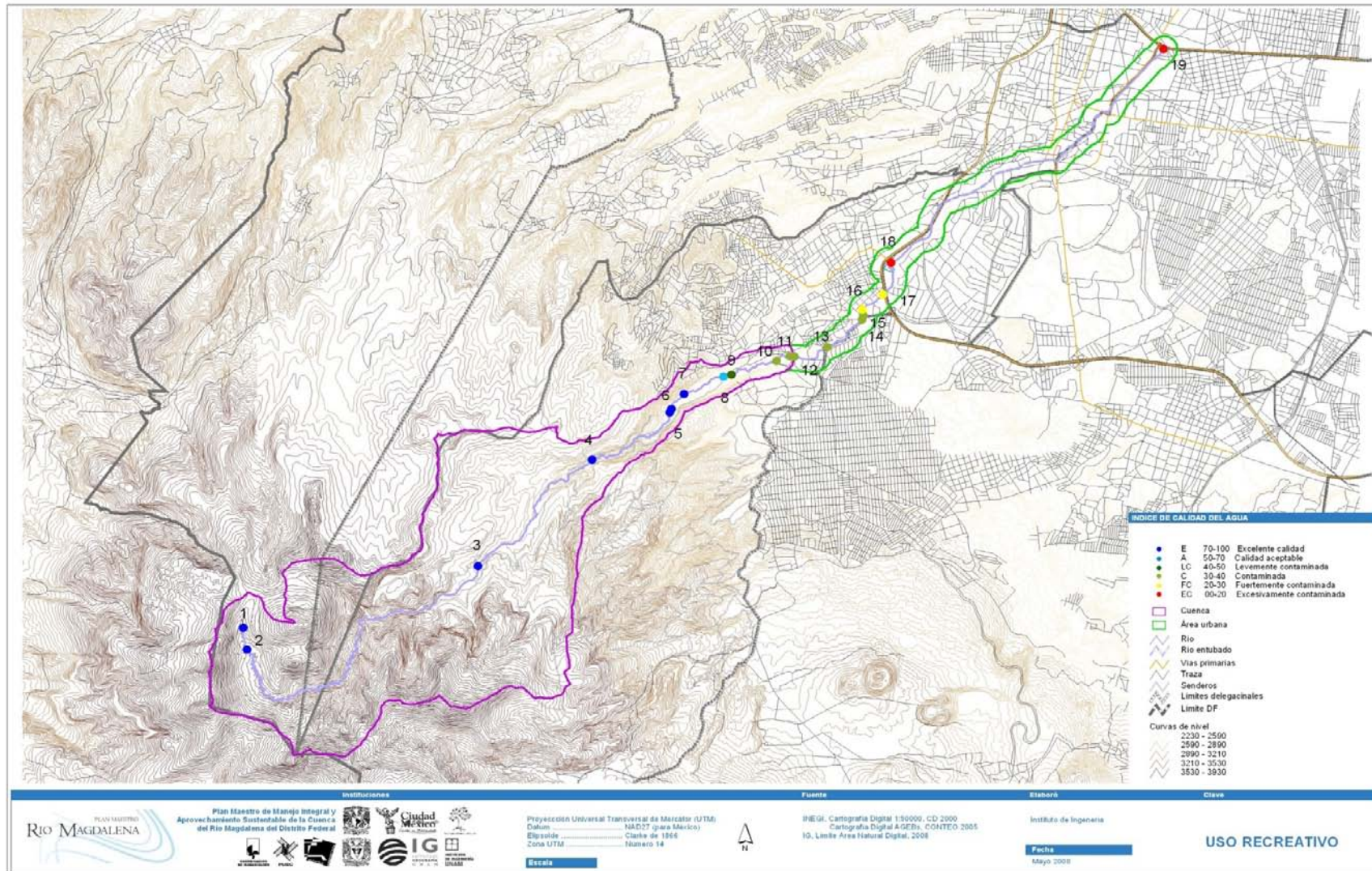




Figura 4. Calidad del agua del río para uso en la agricultura.

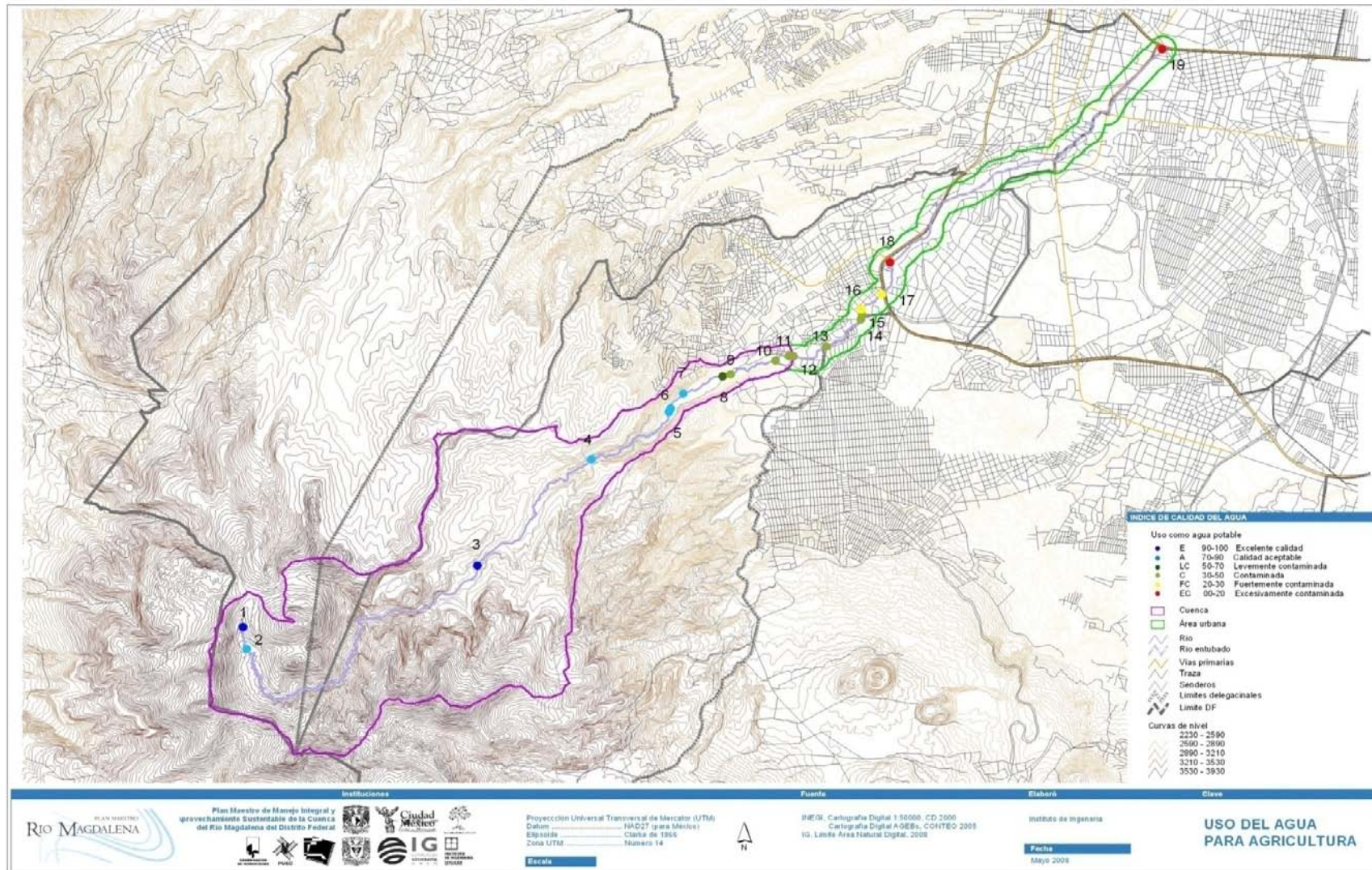
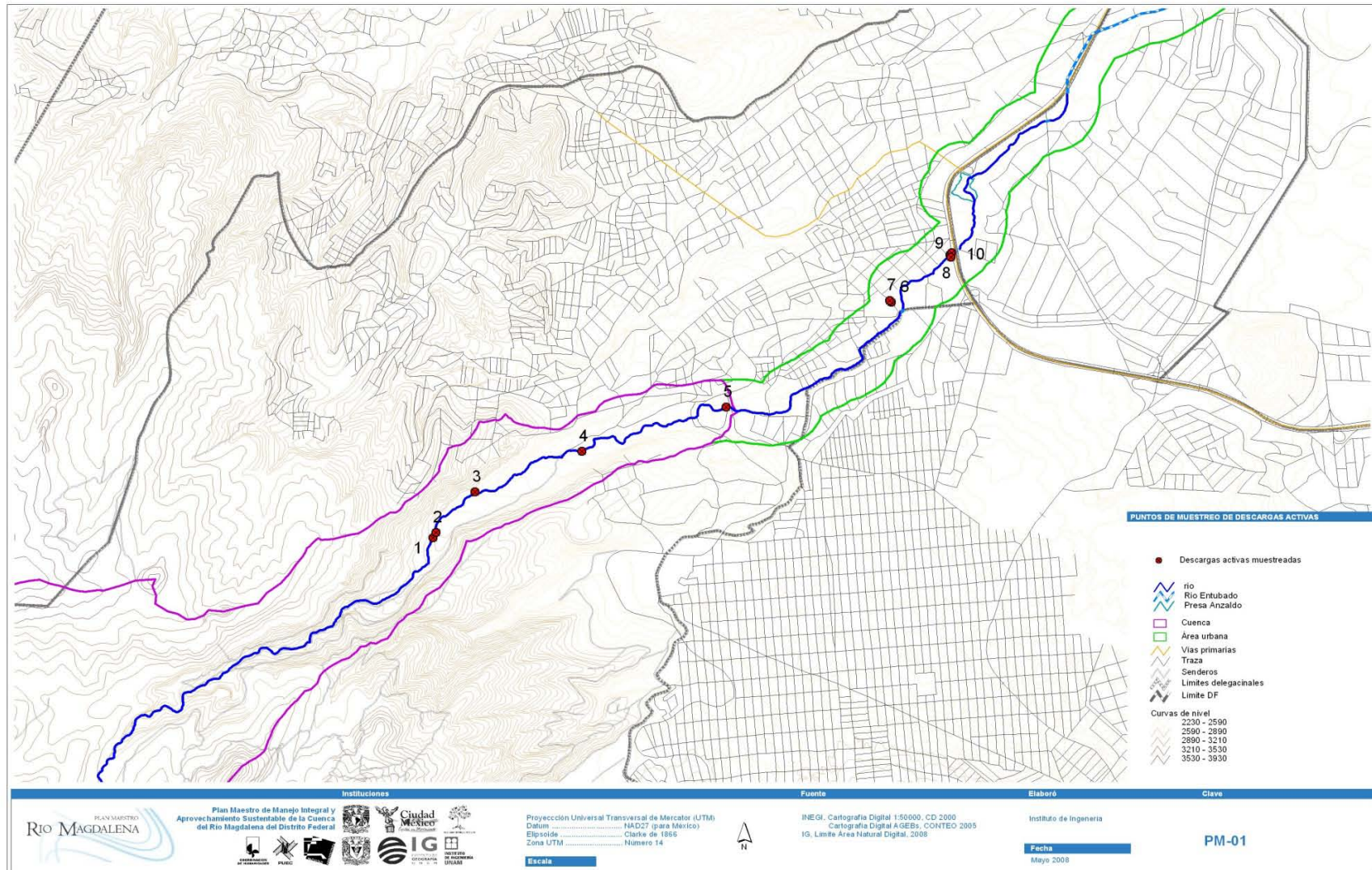




Figura 5. Ubicación de las descargas directas en el río Magdalena.





Anexo III. Toma de muestras

Protocolo para la toma de muestras

Selección de los parámetros de calidad de las aguas

Los parámetros se seleccionaron en función de su relación con la calidad de agua producto del uso actual y potencial de la tierra en la cuenca. Los sitios de muestreo se seleccionaron considerando: los objetivos de muestreo, los análisis de laboratorio, y los requisitos para el manejo de los datos.

La selección de los sitios se realizó en dos fases:

Macro-localización, es decir, la identificación de las áreas de la cuenca que deben ser seleccionadas para satisfacer los objetivos del Plan de Monitoreo.

Micro-localización, es decir, identificando en cada una de las áreas seleccionadas, los sitios que aseguren la representatividad de las muestras y garanticen la seguridad y facilidad en la toma de muestras. Para determinar las condiciones físicas, químicas y biológicas del cuerpo de agua, se revisó la información disponible referente a la ubicación de los sitios de muestreo existentes en la cuenca.

1.3.2 Establecimiento de los sitios de muestreo

Los sitios potenciales de muestreo se seleccionaron y examinaron a través de reconocimientos que aseguraron su localización óptima para proveer datos representativos sobre la calidad del agua.

Se eligieron las secciones del río donde su canal se encontró lo mas plano, derecho, accesible, y uniforme en profundidad, por lo menos 100 metros aguas arriba de una confluencia, y cerca de un punto de referencia. Otra consideración importante es la ubicación de fuentes de contaminación,



aguas arriba y aguas abajo del sitio de muestreo, y su impacto en la calidad del agua.

1.3.3 Localización física del sitio de muestreo

La ubicación y el número de identificación de los sitios de muestreo (punto de monitoreo) de calidad del agua son señalados exactamente en un mapa a escala 1:25,000, con un círculo o punto, con la finalidad de permitir su fácil ubicación en el campo y eventualmente la digitalización de los datos en una base de datos computarizada. Las determinaciones de las coordenadas geográficas de los sitios de muestreo se reportan en UTM, fueron determinadas mediante un instrumento portátil del sistema de posicionamiento global (GPS).

1.3.4 Fotografía de los sitios de muestreo

Se sacaron fotografías de los sitios de muestreo y sus alrededores, con el propósito de documentar los mismos y establecer un archivo completo de fotos. Las fotos se tomaron en cada visita, desde puntos preestablecidos y constantes que se determinaron referenciándolos con respecto a rasgos naturales, como un árbol o roca grande e incluyendo a una persona en la foto para mostrar la escala. Se sacaron dos fotos: una, desde aguas arriba, enfocando al punto de muestreo; y, otra, desde aguas abajo, enfocando el punto de muestreo.

1.3.5 Selección de envases y conservadores

El análisis, el tipo de envases de preservación y el tiempo límite para realizar los análisis de las muestras serán de acuerdo con las condiciones para la extracción de las muestras establecidas en la NOM-014-SSA1-1993.

Los envases para las muestras se etiquetaron, señalando en cada uno el tipo de conservador usado y el parámetro al cual pertenecía. Las hieleras usadas para el transporte de las muestras fueron lo suficientemente



grandes para que se almacenaran todas las muestras siempre se mantenían en la sombra.

Limpieza de envases

La preparación de los envases en los que se colocaban las muestras de agua era de suma importancia, ya que afectan los análisis fisicoquímicos.

Para análisis fisicoquímicos, se seguía el siguiente tratamiento:

Los envases se lavaban perfectamente con detergente y se enjuagan varias veces con agua potable. Posteriormente:

- a) Se enjuagaban con agua destilada.
- b) Se enjuagaban con HC1 al 10% en volumen, mínimo 10 veces utilizando un volumen aproximado de 20 mL cada vez.
- c) Se enjuaga varias veces con agua destilada (15 veces) y 5 veces con agua desionizada.

Para análisis biológicos: se utilizaban bolsas estériles, evitando que se contaminaran las muestras

La obtención de las muestras representativas de agua comúnmente requiere muchas provisiones y equipo; en consecuencia, 24 horas antes del muestreo se revisaba y calibraba el equipo, asegurándose que las baterías (pilas) operaran apropiadamente.

1.3.6.1 Limpieza de los equipos de muestreo

Todos los equipos que tenían contacto con una muestra de calidad del agua se limpiaban cuidadosamente antes de reusarlos. Los equipos de muestreo utilizados se descontaminaban siguiendo el siguiente procedimiento (EPA, 1993):

Limpieza con detergente sin fosfatos.

Enjuague con agua.



Enjuague con una solución al 10% de ácido nítrico (si existe la posibilidad de contaminación con metales).

Enjuague con agua desionizada/destilada.

Enjuague con solvente grado plaguicida (si existe la posibilidad de contaminación con componentes orgánicos semi-volátiles o volátiles).

Enjuague con agua desionizada/destilada, dos veces.

Conservación de las muestras

La conservación y transporte de la toma de muestra se realiza de acuerdo a la NOM-014, (ver Tabla 14).

Tabla 3. Conservación y transporte de las muestras para determinar la calidad del agua en el Río Magdalena (NOM -014)

Parámetro	Material envase	de	Volumen mínimo (ml)	Preservación	Tiempo máx. (almacenar)
Temperatura	p,v	---		Determinar inmediatamente	---
pH	p,v	---		Analizar inmediatamente	---
Conductividad	p,v		200	Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad	28 d
Fosfatos	v		100	Enjuagar el envase con HNO ₃ 1:1. Refrigerar de 4 a 10° C	48 h
Metales	p,v		1000	Enjuagar el envase con HNO ₃ 1:1; adicionar HNO ₃ a pH<2; para metales disueltos, filtrar inmediatamente y adicionar HNO ₃ a pH<2	180 d
Nitratos	p,v		100	Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad	48 h
Nitrógeno amoniacal	p,v		500	Adicionar H ₂ SO ₄ a pH<2 y refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad	28 d
Sólidos	p,v		1000	Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad	7 d



<i>Sulfatos</i>	<i>p, v</i>	<i>100</i>	<i>Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad</i>	<i>28 d</i>
<i>Turbiedad</i>	<i>p, v</i>	<i>100</i>	<i>Refrigerar de 4 a 10° C y en la oscuridad</i>	<i>48 h</i>
<i>Coliformes totales</i>	<i>v, p</i> <i>(resistentes a esterilización en autoclave)</i>	<i>250</i>	<i>Las muestras deben colocarse en hielera con bolsas refrigerantes o hielo para su transporte al laboratorio, de preferencia a una temperatura entre los 4 -10°C cuidando de no congelar las muestras.</i>	
<i>Coliformes fecales</i>	<i>de boca ancha con tapón esmerilado o tapa roscada, o bolsas estériles con cierre hermético</i>	<i>250</i>	<i>Las cajas para transportar las muestras deben estar limpias</i>	<i>6h</i>
<i>DBO₅</i>		<i>1000</i>		

p: plástico, interior de la tapa del envase recubierta con teflón, v: vidrio enjuagado con disolventes orgánicos.

1.3.8 Frecuencia de análisis.

El análisis proporciona una idea de la composición media de una fuente de agua. En algunos casos puede haber factores que originen cambios significativos (condiciones meteorológicas, cantidad de agua extraída, desechos industriales, etc.). Entonces debe recurrirse a análisis frecuentes, cuyo número depende de los factores en cuestión.

En las aguas superficiales (ríos y lagos), es difícil obtener una muestra representativa promedio, ya que su composición varía considerablemente a lo largo del año. En estos casos, en un estudio preliminar, deben realizarse varias tomas abarcando las condiciones extremas, p. ej., en épocas de estiaje y crecida, o según los periodos de lluvias. Con base en estos resultados, se establece el sistema de monitoreo apropiado para cada cuerpo de agua en particular.