

**MODELACIÓN DINÁMICA DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA DE LA
CUENCA DEL LAGO DE TOTA**

LUIS FELIPE GIL VENEGAS

JORGE LUIS RINCON VEGA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO

TUNJA

2015

**MODELACIÓN DINÁMICA DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA DE LA
CUENCA DEL LAGO DE TOTA**

LUIS FELIPE GIL VENEGAS

JORGE LUIS RINCON VEGA

Director: Ing. CAMILO LESMES FABIÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO

TUNJA

2015

ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	1
LISTA DE GRAFICAS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT.....	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	8
3. JUSTIFICACIÓN	10
4. OBJETIVOS	11
Objetivo General	11
Objetivos Específicos.....	11
5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	12
5.1. Antecedentes Históricos.....	12
5.2. Estado del Arte	13
5.3. Aproximación Conceptual.....	21
6. MATERIALES Y MÉTODOS	28
6.1. Revisión Bibliográfica.....	28
6.2. Recolección de Datos	28
6.3. Caracterización de la Contaminación.....	29

6.4.	Desarrollo del Modelo Estático.....	32
6.5.	Construcción del Modelo Dinámico	33
6.6.	Calibración y Validación del Modelo Dinámico.....	40
6.7.	Análisis y Discusión de los Modelos Propuestos.....	41
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
7.1.	Recolección de datos	42
7.2.	Caracterización de la Contaminación de la Cuenca del Lago de Tota.....	44
7.3.	Resultados de la Modelación Dinámico.....	62
8.	CONCLUSIONES	78
9.	RECOMENDACIONES.....	82
	Solución a la Contaminación	82
	Recomendaciones en la Modelación.....	83
10.	GLOSARIO	85
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
12.	ANEXOS	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Calidad De La Fuente (Tabla C.2.1. RAS-2000).....	24
Tabla 2. Promedio índices de contaminación año 2009 a 2011.....	45
Tabla 3. Calificación contaminación índices.	45
Tabla 4. Caudales obtenidos en las microcuencas.	48
Tabla 5. Promedio variaciones de caudal.	49
Tabla 6. Cargas mensuales de contaminación zona alta.	50
Tabla 7. Cargas mensuales de contaminación zona baja.	51
Tabla 8. Cargas medias mensuales de contaminación.	54
Tabla 9. Tasas de carga calculadas.	62
Tabla 10. Tasas de carga y descarga validadas.....	63
Tabla 11. Carga de coliformes totales observada y modelada en UFC/mes.....	64
Tabla 12. Coeficientes de validación modelación de la carga de coliformes totales.	64
Tabla 13. Carga de DBO ₅ observada y modelada en ton/mes.	66
Tabla 14. Coeficientes de validación modelación de la carga de DBO ₅	66
Tabla 15. Carga de fósforo observada y modelada en ton/mes.	68
Tabla 16. Coeficientes de validación modelación de la carga de Fósforo.	68
Tabla 17. Carga de SST observada y modelada en ton/mes.	70
Tabla 18. Coeficientes de validación modelación de la carga de SST.	70
Tabla 19. Carga proyectada de coliformes totales en UFC/mes.	73
Tabla 20. Carga proyectada de DBO ₅ en ton/mes.	74
Tabla 21. Carga proyectada de fósforo en ton/mes.	75
Tabla 22. Carga proyectada de SST en ton/mes.	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Construcción de un modelo	26
Figura 2. Esquema modelo estático	33
Figura 3. Esquema modelo dinámico.....	34
Figura 4. Zonas Cuenca Lago de Tota	35
Figura 5. Esquema modelo dinámico en el software STELLA™.	37
Figura 6. Flujo de escorrentía en STELLA™.	38
Figura 7. Cuadro de dialogo para tasas de carga y descarga.	39
Figura 8. Cuadro de dialogo para cargas de contaminación iniciales.	39
Figura 9. Cuadro de dialogo "Run Specs".	40
Figura 10. Puntos de muestreo de agua.	43

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Cargas de contaminación microcuencas Lago de Tota.....	52
Gráfica 2. Cargas de contaminación microcuencas Lago de Tota (Continuación).....	53
Gráfica 3. Carga de oxígeno disuelto.....	55
Gráfica 4. Carga de demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	57
Gráfica 5. Carga de coliformes totales.....	58
Gráfica 6. Carga de sólidos suspendidos totales.	59
Gráfica 7. Carga de fósforo.....	60
Gráfica 8. Carga de coliformes totales observada y modelada.	65
Gráfica 9. Carga de DBO ₅ observada y modelada.....	67
Gráfica 10. Carga de fósforo observada y modelada.	69
Gráfica 11. Carga de SST observada y modelada.....	71
Gráfica 12. Carga proyectada de coliformes totales.	73
Gráfica 13. Carga proyectada de DBO ₅	74
Gráfica 14. Carga proyectada de fósforo.	75
Gráfica 15. Carga proyectada de SST.....	76

RESUMEN

El lago de Tota, el más grande de Colombia, con una superficie de 55 km² y una cuenca hidrográfica de 20.100 ha, es un importante recurso natural ubicado en el departamento de Boyacá. Una gran población (25.000 personas aproximadamente) vive en la cuenca cuya economía se basa en las actividades agrícolas, turísticas, industriales y comerciales en las zonas urbanas. Debido a estas actividades, hay una contaminación constante de los cuerpos de agua ocasionada por pesticidas, fertilizantes, productos químicos industriales y aguas residuales domésticas. Por lo tanto, es necesaria una evaluación del riesgo ambiental con el fin de establecer el status de la contaminación del agua en la cuenca, y por consiguiente tomar las decisiones necesarias para disminuir las amenazas presentes y que las explotaciones de los recursos naturales del lago se hagan de forma sostenible. Esta investigación propone un modelo dinámico basado en la metodología “Análisis de flujo de Materiales” y “Sistemas Dinámicos” para estudiar el comportamiento de las cargas de contaminación del agua. En primer lugar, este modelo determina las cargas actuales de contaminación del agua en toda la cuenca y luego las proyecta a un determinado tiempo. Los resultados buscan diagnosticar los niveles y zonas de contaminación en la región, y evaluar las fluctuaciones de las cargas de contaminación en el largo plazo.

ABSTRACT

The Tota Lake, the largest in Colombia, with a surface of 55 km² and a hydrographic watershed of 20.100 ha, is an important natural resource located in the department of Boyacá. A large population (25.000 people approximately) live in the watershed whose economy is based in agricultural, touristic, industrial and commercial activities. Due to these activities, there is a constant pollution in the water bodies caused by pesticides, fertilizers, industrial chemical products and domestic wastewater. Therefore, an evaluation of the environmental risk is required in order to establish the pollution status of the water in the basin, and afterwards, to make the necessary decisions to decrease the risks and to exploit the natural resources in a more sustainable way. This investigation proposes a dynamic model based in the methodology “Material Flow Analysis” and “Systems Dynamics” to study the behavior of the pollution loads of the water. In first place, this model determines the current pollution loads of the water through the basin and then estimates pollution values in the long term. The results focus in the diagnostic of the pollution levels, their distribution in the watershed and also in the evaluation of the pollution fluctuation in the long term.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento indispensable para la conservación de la vida en el planeta, ayudando a la sostenibilidad de los diferentes ecosistemas en los cuales se desarrollan los animales y plantas. Por esto, es necesario el cuidado y conservación de las fuentes naturales que generan este precioso líquido. Colombia se caracteriza por poseer una gran diversidad de fuentes de agua y de gran valor ambiental entre ellas paramos y lagos, como el Lago de Tota, el cual es el más grande del país, ubicado en el departamento de Boyacá en la zona rural de los municipios de Tota, Cuitiva y Aquitania. Su cuenca tiene un área aproximada de 95.8 Km² y está dividida en 4 microcuencas: *Pozos*, la cual es la más pequeña, *Hato Laguna*, *Olarte* y por ultimo *Tobal* con la mayor extensión.

La cuenca del Lago de Tota es un importante recurso natural aprovechado por muchas actividades económicas ya que tanto sus zonas rurales como urbanas explotan el recurso hídrico para actividades agrícolas, industriales, turísticas y consumo doméstico. Sin embargo, estas labores están causando una constante contaminación que pone en riesgo la calidad y utilidad del agua a largo plazo. Según la regulación colombiana (RAS-2000), la calidad del agua debe cumplir una serie de parámetros mínimos para preservar la salud de la población. Sin embargo, la cuenca del Lago de Tota se encuentra en un alto riesgo de contaminación debido a las actividades económicas, lo cual conlleva al incumplimiento de los límites permisibles de estos parámetros causando enfermedades y disminuyendo la calidad de vida de la población.

Un estudio de la calidad del agua en la cuenca del Lago de Tota, en conjunto con las cargas de contaminación del agua, es indispensable para determinar el nivel de contaminación del agua y establecer las fuentes de riesgo. Por consiguiente, este proyecto de investigación tiene como primer objetivo realizar una evaluación de los índices de contaminación del agua para conocer el estado actual y de esta forma desarrollar un modelo estático de balance de masas, con el cual se puedan calcular las cargas de contaminación en las zonas altas y bajas de cada una de las microcuencas. Con base en el cálculo de las cargas de contaminación se desarrollará un modelo dinámico para estudiar los flujos de las cargas de contaminación en la cuenca del Lago de Tota. Con este modelo es posible no solo determinar el estado actual del nivel de contaminación de la cuenca, sino estimar el riesgo ambiental en el largo plazo bajo las condiciones actuales de explotación agrícola, industrial, turística y doméstica.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El Lago de Tota con sus recursos naturales es una importante fuente económica para las poblaciones en la cuenca. Sin embargo, la explotación de recursos no es regulada por lo que un estudio de la sostenibilidad en las actividades económicas que dependen del lago, es crucial para garantizar el sustento para las generaciones futuras

Un estudio del ciclo hidrológico del agua en la cuenca del Lago de Tota en conjunto con las cargas de contaminación del agua es indispensable para determinar el nivel de contaminación del agua y establecer las fuentes de riesgo. Por consiguiente, este proyecto de investigación busca el desarrollo de un modelo dinámico para estudiar los flujos de agua en la cuenca del Lago de Tota estudiando las cargas de contaminación. Con este modelo es posible no solo determinar el estado actual del nivel de contaminación de la cuenca, sino estimar el riesgo ambiental en el largo plazo bajo las condiciones actuales de explotación agrícola e industrial.

De esta manera, este trabajo se plantea las siguientes preguntas de investigación.

a) Pregunta General de Investigación:

¿Cómo se podría modelar estática y dinámicamente las cargas de contaminación actuales con el fin de evaluar la situación actual de contaminación y estimar las fluctuaciones en el futuro de dicha contaminación en la cuenca de Lago de Tota?

b) Preguntas de Investigación Específicas

- ¿Cuáles son las cargas de contaminación actuales de la cuenca del Lago de Tota?
- ¿Cómo se podría modelar estáticamente las cargas de contaminación para saber las zonas más afectadas de la cuenca del Lago de Tota?
- ¿Cómo se podría modelar dinámicamente las cargas de contaminación para saber su influencia a largo plazo en la cuenca del Lago de Tota?

3. JUSTIFICACIÓN

Debido a la continua contaminación del agua en la cuenca del Lago de Tota, existe un alto riesgo para la salud de los habitantes y para las distintas actividades económicas, las cuales se abastecen del agua de los afluentes y del lago. Por esta razón, es necesario conocer los factores que causan la contaminación de la cuenca del Lago de Tota.

Existen muchos estudios sobre la caracterización de la calidad del agua en la cuenca. Sin embargo, no existen estudios sobre la modelación de parámetros como las cargas de contaminación del agua. Por esta razón el presente proyecto plantea el desarrollo de un modelo dinámico que incluye cargas de contaminación del agua como coliformes fecales, DBO₅, sólidos suspendidos totales y fósforo, las cuales son calculadas en base a parámetros de calidad anteriormente medidos o mediante nuevas mediciones. El modelo permite estudiar el recorrido, comportamiento, fluctuación y transformación de estas cargas de contaminación durante todo el recorrido de los cuerpos de agua en la cuenca del Lago de Tota.

Este proyecto tiene una gran importancia en el área de ingeniería civil ya que no solo combina conceptos de hidrología, ingeniería ambiental y metodologías matemáticas, sino que además las estimaciones matemáticas permiten llegar a conclusiones relevantes para las autoridades o agentes involucrados en la toma de decisiones para llevar a cabo proyectos de mitigación de la contaminación con las comunidades locales y por consiguiente mejorar su calidad de vida.

4. OBJETIVOS

Objetivo General

Modelar estática y dinámicamente las cargas de contaminación del agua de la cuenca del Lago de Tota con el fin de caracterizar su nivel de contaminación actual y estimar sus fluctuaciones a largo plazo.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la calidad del agua de la cuenca del Lago de Tota mediante índices de contaminación del agua.
- Modelar estáticamente las cargas de contaminación del agua según el ciclo hidrológico.
- Modelar dinámicamente las cargas de contaminación del agua para estimar su comportamiento en el largo plazo.
- Identificar las fuentes y lugares de contaminación más críticos en la cuenca del Lago de Tota para definir un programa estratégico de solución a la contaminación.

5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Antecedentes Históricos

La cuenca del Lago de Tota es una fuente económica de gran importancia para la población, ya que esta recoge una gran cantidad de agua que es usada para el consumo humano, la piscicultura y el cultivo de diferentes alimentos como la cebolla, papa y otras hortalizas. Debido a esta gran cantidad de usos, esta fuente hídrica está en constante riesgo de contaminación y por esto se han realizado diferentes estudios que se explicaran a continuación.

La Corporación Autónoma de Boyacá (2009) en su estudio titulado “*Reglamentación del uso del recurso hídrico en las microcuencas de los Pozos, Hato Laguna, Olarte y Tobal, afluentes del lago de tota y motores eléctricos y/o otros combustibles que deriven agua del Lago de Tota*”¹ realiza una serie de descripciones sobre diferentes parámetros que indican el grado de contaminación en la cuenca del Lago de Tota. Algunos de los parámetros medidos son pH, oxígeno disuelto, sólidos totales entre otros. En este estudio no se hace una proyección a largo plazo del estado de la cuenca dejando incierto el futuro de este recurso hídrico que es sustento para la vida tanto de fauna y flora como de los pobladores circundantes.

La Organización Panamericana de la Salud y la Organización Mundial de la Salud con ayuda del biólogo Javier A. Molina A. (2013), en su informe “*Lago de Tota*”² describen los problemas existentes como la progresiva eutrofización, multiplicidad de los usos del

¹ (CORPOBOYACA, 2009)

² (Javier A. Molina A., 2013)

agua (agricultura, industria, consumo humano y piscicultura), uso de fertilizantes e irrigación por la expansión agrícola y desarrollo de actividades recreativas. También realizan una descripción de las posibles causas de los problemas que se presentan en esta fuente de agua y por ultimo plantean una serie de soluciones para cada uno de estos problemas, pero no visualizan el estado de la cuenca al no realizar estos procesos que conlleven al mejoramiento actual de la cuenca, dado que los recursos económicos para este tipo de dificultades del medio ambiente no son de la proporción adecuada.

Estado del Arte

Keshta (2009) en su trabajo “*A generic system dynamics model for simulating and evaluating the hydrological performance of reconstructed watersheds*”³ evaluó el rendimiento hidrológico de cuencas reconstruidas por medio de un modelo genérico dinámico. Los procesos hidrológicos de una cuenca a escala fueron representados con la ayuda de sistemas dinámicos de cuenca; el modelo contaba con el parámetro de humedad del suelo como variable importante, para poder evaluar satisfactoriamente el rendimiento de la cuenca. Una vez se realizaron las respectivas modelaciones, con la información recolectada se construye el modelo genérico dinámico de cuencas. Este modelo es capaz de simular varios componentes de la hidrología de una cuenca, debido a que usa parámetros meteorológicos, de vegetación, e hidrológicos para evaluar diferentes procesos diariamente. Es importante resaltar la incorporación de variables determinantes en el desarrollo de modelos dinámicos, además que al complementar sistemas previamente desarrollados con nuevas variables se obtendrán resultados más confiables y

³ (N. Keshta, 2009)

el modelo se asemejará más a las condiciones reales. Aunque el modelo tiene en cuenta un gran número de variables no se incluyen parámetros de contaminación del agua, lo cual deja de lado una parte muy importante en el ecosistema de una cuenca y no permite conocer la calidad del agua que puede llegar a tener esta.

José L. J. Ledesma (2012) en su artículo “*Long-term dynamics of dissolved organic carbon: implications for drinking water supply*”⁴ explica la investigación que tiene como objetivo estudiar la dinámica de las concentraciones de carbono orgánico total a largo plazo en el Río Fyris. La simulación es basada en el modelo “*Integrated Catchments model for Carbon*”, el cual estudia los flujos y concentraciones diarias de carbono orgánico aunque este puede llegar a fallar en las predicciones cuando las concentraciones son muy altas. Esto es un grave problema porque el propósito del desarrollo de un modelo dinámico es predecir condiciones futuras para prevenir problemas. Como resultado se encuentra que no se ha completado el entendimiento de los procesos del carbono, por esto se ve la necesidad de incorporar nuevos conocimientos para que se mejore la modelación, ya que con un modelo lo suficientemente adaptado a la realidad se podrían crear planes de contingencia para problemas futuros. Una de las grandes desventajas del modelo es que es únicamente aplicable para entender la dinámica de un único parámetro que en este caso es el carbono orgánico, por lo cual es necesario realizar modelos independientes para llegar a conocer el comportamiento de otros parámetros.

⁴ (José L. J. Ledesma, 2012)

Tracy J. Baker (2013) en *“Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed”*⁵ busca evaluar el impacto del uso de tierra en los recursos hídricos en una cuenca en el Este de África usando la herramienta de valoración de suelo y agua. La investigación es realizada debido a los cambios de la respuesta hídrica del Valle de Kenya, el cual es de gran importancia para el Lago Nakuru. Con la modelación SWAT calibrada por medio de datos observados se simuló la respuesta hídrica de la cuenca evaluando el impacto que tiene la cobertura del suelo y el uso de este. Los resultados obtenidos de la modelación muestran que los cambios en el uso del suelo incrementan la superficie de escorrentía y disminuye la recarga de agua subterránea. Estos cambios tienen implicaciones negativas para la salud ecológica del Lago Nakuru. Se puede observar que los cambios aguas arriba de la cuenca siempre repercutirán en las salidas del sistema hídrico de la cuenca. Esto hace ver que las obras realizadas necesitan de un estudio de impacto hídrico por medio de modelaciones dinámicas a futuro. Aunque el modelo sea muy completo en el estudio hidrológico, deja de lado variables importantes en términos de calidad del agua, lo cual es indispensable para un aprovechamiento total de este recurso.

Yamen M. Hoque (2012) en su investigación *“Watershed reliability, resilience and vulnerability analysis under uncertainty using water quality data”*⁶ estudia la confiabilidad, capacidad de recuperación y la vulnerabilidad de una cuenca usando información de calidad del agua y un algoritmo para cuantificar el estado de la cuenca. Es necesario implementar este algoritmo debido a que los datos de calidad del agua son

⁵ (Tracy J. Baker, 2013)

⁶ (Yamen M. Hoque, 2012)

usualmente dispersos. Considerando un periodo de incertidumbre en la información se observó que los resultados de la cuenca de estudio corresponden a los valores de pesticidas seleccionados, amonio y fósforo total. Los resultados indican que la simulación esta correlacionada con los datos reales, lo cual revela que la calibración del sistema es correcta. Además este método puede ser usado para valorar los efectos de diferentes factores de estrés en una cuenca. La calibración de los modelos dinámicos debe ser la más precisa posible para poder confiar en los resultados, así se podrán predecir las condiciones futuras y los efectos de nuevas variables hipotéticas. El modelo muestra deficiencias en cuanto a la limitación de poderlo usar para simular el comportamiento de cualquier contaminante, teniendo como únicos resultados confiables pesticidas, amonio y fósforo, lo cual genera una necesidad de la creación de un modelo capaz de evaluar la dinámica de distintos parámetros.

M. B. McGechan (2008) en el estudio “*A river water pollution model for assessment of best management practices for livestock farming*”⁷ se basa en la modelación de la polución del agua en un rio para evaluar la mejor practica de manejo de la ganadería. Debido a la extensa contaminación del agua ocasionada por las excreciones del ganado en el suelo, es necesario evaluar los mecanismos de transporte para disminuir la contaminación. Se estudian las soluciones de mitigación a la contaminación del agua con la ayuda de un modelo dinámico que describe el transporte de amonio y *Escherichia Coli* en campos individuales, sumado a un modelo de red de canales que simula la entrega de los contaminante al rio. La investigación concluye que el uso de bebederos para evitar la

⁷ (M. B. McGechan, 2008)

excreción en las márgenes de las corrientes y el evitar el desbordamiento de agua conlleva grandes beneficios en la reducción de la contaminación. Se puede observar que es posible conectar varios modelos para que estos trabajen en distintos ambientes (suelo y agua), para que así se observe el comportamiento de la totalidad del escenario estudiado.

O. Naughton (2013) en su investigación *“Public awareness, behaviours and attitudes towards domestic wastewater treatment systems in the Republic of Ireland”*⁸ tiene como objetivo estudiar la conciencia pública, comportamiento y actitudes hacia los sistemas de tratamiento de aguas residuales domesticas específicamente en la República de Irlanda. Con el análisis de cuestionarios estructurados se puede identificar que existen brechas de conocimiento en un número significativo de usuarios acerca de prácticas incorrectas del uso de agua subterránea, lo cual está asociado a incrementar la vulnerabilidad de contaminación. El estudio da recomendaciones basadas en las evidencias encontradas ante problemas causados por prácticas incorrectas del uso de agua, para así poder mejorar la política ambiental y mejorar la calidad de vida de la población. En estudios donde se vea involucrada la comunidad es necesario mostrar que tan afectada puede llegar a estar el área de estudio, teniendo de esta forma la obligación de realizar simulaciones y proyecciones a largo plazo para evidenciar las consecuencias de que persistan el problema. Es de vital importancia aportar el resultado de las investigaciones de todo tipo a la comunidad, enfocando soluciones a los problemas encontrados a lo largo del desarrollo de estudio.

⁸ (O. Naughton, 2013)

Z. Y. Shen (2013) en el trabajo *“A comprehensive study of the effect of GIS data on hydrology and non-point source pollution modeling”*⁹ tiene como objetivo entender el efecto de implementar sistemas de información geográfica en la modelación de la contaminación hidrológica. Con la ayuda del sistema SWAT se cuantifica el efecto que tiene la aplicación de datos obtenidos de sistemas de información geográfica en la modelación de la cuenca Daning en China. En consecuencia del análisis se evidencia que los SIG causan un impacto limitado en las predicciones de escorrentía y nitrógeno, pero en las simulaciones de sedimentación y fosforó se observa que son altamente sensibles a los datos aplicados del SIG. La investigación demuestra que llegado a un punto la calidad de la predicción no aumentará si son más precisos los datos del sistema de información geográfica. Esto demuestra que los modelos dinámicos tienen un límite de exactitud en los resultados sin importar la precisión de los datos de entrada. La complejidad de los modelos dinámicos puede llegar a traer más problemas que beneficios, debido a que existe diversidad de casos de estudio en donde no se posea una amplia cantidad de datos. Esto se evidencia aún más en la utilización de modelos como el presente, donde se hace necesarias información geográfica. Es importante también enfocarse en escenarios con escasos de datos, donde se pueda llegar a realizar una simulación confiable a pesar de la poca información.

Lucy O'Shea (2009) presenta en *“Controlling nitrate pollution: An integrated approach”*¹⁰ una combinación de un marco de optimización económica con una simulación del transporte de nitrato por medio de un modelo dinámico en la captación

⁹ (Z. Y. Shen, 2013)

¹⁰ (Lucy O'Shea, 2009)

Kennet, para reducir las concentraciones de nitrato en el río Kennet producto de las decisiones tomadas en las granjas. Se encuentra un impuesto sobre el nitrógeno como la mejor política en términos de costo y efectividad para el medio ambiente. Esto involucra una considerable reducción en el uso de fertilizante, pero es una política muy radical que presentaría problemas al aplicarla espontáneamente, y aún más ante la demanda de alimentos que existe. La investigación encontró la acción entre las granjas y la concentración de nitratos en el agua de las corrientes. Además se observa que se requiere explorar los efectos de la retención de nitratos en la zona insaturada y en el agua subterránea. Es evidente que ante la toma de decisiones políticas radicales en cuanto a mejorar el medio ambiente, se vean afectadas en mayor medida las comunidades agrícolas. Por esto se deben buscar las alternativas que perjudiquen menos todos los sectores implicados, además de que se realicen estudios que abarquen la mayor cantidad posible de variables, ya que como en este caso solo se estudia en nitrato, no se tiene en cuenta los demás contaminantes lo cual solo genera una solución parcial.

Gerald Shelke (2005) en *“System Dynamics Modeling of Transboundary Systems: The Bear River Basin Model”*¹¹ hace uso de un sistema dinámico asistido por computadora el cual fue desarrollado para evaluar sistemas hídricos complejos de gran tamaño. Usando este programa se pretendía modelar la cuenca del Río Bear, la cual tiene la particularidad de poseer partes de otras regiones (Idaho, Utah y Wyoming). Como resultado de las modelaciones se observó que el sistema dió una respuesta satisfactoria en la integración de la superficie del agua tanto superficial como subterránea, para así evidenciar la

¹¹ (Gerald Sehlke, 2005)

interacción entre las diferentes fuentes. También se encontró que el modelo es idóneo para el procesamiento de información hidrológica compleja con el fin de facilitar la toma de decisiones en un sistema específico. Cabe destacar que el mayor número de modelos hidrológicos dinámicos como el presentado están basados en cuencas donde no se incluyen lagos, lo cual genera una gran necesidad de avance en este sentido.

Ivan Luiz Zilli Bacic (2008) expone en *“Applicability of a distributed watershed pollution model in a data-poor environment in santa catarina state, brazil”*¹², un modelo distribuido de la contaminación de una cuenca en una situación donde se tiene información pobre del entorno. El lugar de la investigación es en el estado de Santa Catarina en Brasil, donde existe una intensiva producción de cerdo lo cual genera acumulación de estiércol ocasionando así contaminación del agua. Para superar el inconveniente de los datos pobres de entorno se hace uso del modelo distribuido del ambiente AgNPS, simulando la cuenca del Rio Ariranhazinho. En el proceso de simulación se realiza una previa preparación de la información y la selección del tamaño de celdas del modelo distribuido, una vez realizado esto se calibra y aplica el modelo. Como resultado de las simulaciones realizadas se observó que las predicciones de las concentraciones de sedimentaciones fueron de seis a diez veces la cantidad observada. Las concentraciones de Nitrógeno y Fósforo simuladas están solo un poco debajo de las regulaciones de la norma. Se puede concluir que debido a la información pobre de este modelo no se logró calibrar satisfactoriamente, pero aún así se pueden realizar relaciones basadas en las predicciones para el desarrollo de una nueva investigación.

¹² (Ivan Luiz Zilli Bacic, 2008)

Aproximación Conceptual

5.1.1. El Agua: Recurso Indispensable

El agua es el principal recurso natural esencial para el ser humano y para la vida en general. El agua en el planeta tierra está distribuida en un 97.5% de agua salada en mares y océanos, y solo un 2.5% en agua dulce, la cual es de consumo humano. Del agua dulce encontrada en el planeta, el 30% está en acuíferos y en la humedad del suelo. Por otro lado, únicamente un 1% se encuentra en arroyos, ríos, lagos y lagunas.¹³

El agua es el núcleo de la existencia de la vida en la tierra siendo la sustancia con mayor presencia en el planeta. Es el mayor componente presente en los seres vivos y genera cambios constantes en la superficie terrestre ya que tiene el poder de generar sus propios caminos. La climatización de nuestro planeta para la existencia de vida y su evolución es gracias al agua.

La hidrología se encarga del estudio de todas las fases del agua en la tierra, siendo una materia de gran importancia para el entendimiento y posibles reacciones de esta, ayudando al diseño de estructuras hidráulicas, tratamiento y disposición de aguas residuales, generación hidroeléctrica, control de inundaciones, disminución de la contaminación, caracterización del agua, entre otras.

Según Ven Te Chow, "...Las ciencias hídricas están relacionadas con las aguas de la Tierra: su distribución y circulación, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el ambiente y con los seres vivos y en particular con los seres humanos. Puede

¹³ (Mazatlan)

considerarse que la hidrología abarca todas las ciencias hídricas. En una forma más estricta, puede definirse como el estudio del ciclo hidrológico, es decir, la circulación ininterrumpida del agua en la Tierra y la atmosfera. El conocimiento hidrológico se aplica al uso y control de los recursos hidráulicos en los continentes del planeta...”¹⁴

Las actividades humanas generan cambios en diferentes parámetros que tienen afectación sobre el ciclo hidrológico, un ejemplo de esto es el uso indiscriminado de fertilizantes, irrigación de cultivos, deforestación de bosques, arrojo de basuras a los ríos, lagos y mares, degenerando la calidad del agua en la naturaleza.¹⁵

La contaminación se produce por el cambio de las propiedades naturales del suelo mediante la aplicación de compuestos químicos como pesticidas, fertilizantes. También las filtraciones de los líquidos producidos por las basuras (lixiviados) y desechos industriales (metales, solventes, derivados del petróleo) generan una gran degradación del ambiente generando una contaminación de niveles superlativos los cuales son difíciles de disminuir y no se podrá dejar en su estado natural.

La contaminación se viene generando en la tierra desde que el ser humano ha intentado obtener el suministro de agua sin contaminación pero ha sido imposible porque no existían ni existen técnicas para el tratamiento y disposición de aguas residuales. Este problema se ha venido agudizando en el transcurso de la historia del hombre por el crecimiento de la población y la creación de asentamiento humanos (Urbes), lo cual ha

¹⁴ (Ven Te Chow, 1994)

¹⁵ (CORPOBOYACA, 2009)

venido desarrollando nuevos problemas que afectan directamente al medio ambiente entre estos esta la disposición de las basuras producidas.

A través de la historia se ha evidenciado que el ser humano genera estos asentamientos cerca a lugares como ríos y lagos que sean de fácil acceso para la obtención de este líquido esencial para la vida. En el departamento de Boyacá, Colombia, existe un gran recurso en el Lago de Tota siendo este el más grande del país, el cual tiene una superficie de 55 km² y una cuenca hidrográfica de 21000 ha, y está ubicado a una altitud 3015 m. De este se abastecen 25000 habitantes que viven en la cuenca cuya economía se basa en las actividades agrícolas, turísticas, industriales y comerciales relacionadas con las zonas urbanas. Debido a estas actividades, hay una contaminación constante de los cuerpos de agua como ríos debido a los pesticidas, fertilizantes y productos químicos industriales.

5.1.2. Calidad Del Agua

De acuerdo al RAS-2000 el término calidad del agua se define como conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua (Economico, 2000). De lo anterior se puede inferir que la calidad del agua es el cumplimiento de una serie de características propias del agua ante unos parámetros establecidos previamente. Aunque estos varían dependiendo del uso al cual sea destinada el agua, ya sea para fines industriales, recreativos, o de consumo.

Para poder medir la calidad del agua se tienen unos parámetros establecidos, los cuales están relacionados con características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas, entre estos están: pH, Conductividad, Sólidos Totales Disueltos, DQO, DBO, Sulfatos,

Cloruros, Nitratos, Turbiedad, Coliformes. Con la medición de estos en una fuente se puede evaluar el nivel de calidad del agua de acuerdo al grado de polución de esta, como se indica en la Tabla 1.¹⁶

Tabla 1. Calidad De La Fuente (Tabla C.2.1. RAS-2000).

<i>Parámetros</i>	<i>Análisis Según</i>		<i>Nivel De Calidad De Acuerdo Al Grado De Polución</i>			
	<i>Norma Técnica NTC</i>	<i>Standard Method ASTM</i>	<i>Fuente Aceptable</i>	<i>Fuente Regular</i>	<i>Fuente Deficiente</i>	<i>Fuente Muy Deficiente</i>
DBO 5 días	3630	-	-	-	-	-
Promedio mensual mg/L	-	-	≤ 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4	> 4
Máximo diario mg/L	-	-	1 - 3	03-abr	04-jun	> 6
Coliformes Totales (NMP/100 mL)						
Promedio mensual	-	D-3870	0 - 50	-	-	-
Oxígeno Disuelto mg/L	4705	D-888	≥ 4	≥ 4	≥ 4	≥ 4
PH promedio	3651	D-1293	6.0 - 8.5	5.0 - 9.0	3.8 - 10.5	-
Turbiedad (UNT)	4707	D-1889	<2	2 - 40	40 - 150	≥ 150
Color Verdadero (UPC)	-	-	< 10	10 - 20	20 - 40	≥ 40
Gusto y Olor	-	D-1292	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo
Cloruros (mg/L - Cl)	-	C-512	< 50	50 - 150	150 - 200	300
Fluoruros (mg/L - F)	-	D-1179	< 1.2	< 1.2	< 1.2	< 1.7

5.1.3. Índices de Calidad del Agua

En Colombia los índices de calidad del agua han sido desarrollados por Ramírez, a los cuales denominó ICO (Índices de Contaminación) y comprenden el índice de contaminación por mineralización (ICOMI), el índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), el índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) y el índice de contaminación trófico (ICOTRO), los cuales están basados en reglamentaciones colombianas e internacionales y se definen en la sección de materiales y métodos.¹⁷

¹⁶ (Economico, 2000)

¹⁷ (Nelson Josue Fernandez Parada)

5.1.4. Teoría de la Modelación

La construcción de modelos es fundamental para comprender fenómenos del mundo real. Todos nosotros creamos modelos mentales del mundo que nos rodea, analizando nuestras observaciones en causa y efecto. Tales modelos mentales nos hacen posible, por ejemplo, cruzar satisfactoriamente una calle concurrida. Ingenieros, biólogos, y científicos de las ciencias sociales simplemente simulan sus observaciones de manera formal. Con la llegada de computadores personales y de la programación gráfica, se pueden crear modelos más complejos de los fenómenos del mundo que nos rodea. Como Heinz Pagels notó, el proceso de modelación por computadora es a la mente lo que el telescopio y el microscopio son al ojo. Se pueden modelar los resultados macroscópicos de micro fenómenos, y viceversa. También se pueden simular los distintos futuros posibles de procesos dinámicos. Con la modelación se puede empezar a explicar incluso predecir.¹⁸

Frecuentemente, los fenómenos que ocurren en el mundo real son multifacéticos, interrelacionados y difíciles de entender. Para entender estos fenómenos, se extraen los detalles y se intenta concentrar en una gran imagen un grupo particular de atributos del mundo real o la estructura de los procesos que guían a los resultados observados. Los modelos son como abstracciones de la realidad. Los modelos fuerzan enfrentar los resultados de la estructura y dinámica de supuestos realizados en las síntesis.

El proceso de la construcción de un modelo puede ser bastante complicado. Sin embargo, es posible identificar un conjunto de procedimientos generales que son frecuentemente

¹⁸ (Ford, 2009)

seguidos. Estos procedimientos generales son mostrados de la siguiente forma simplificada.

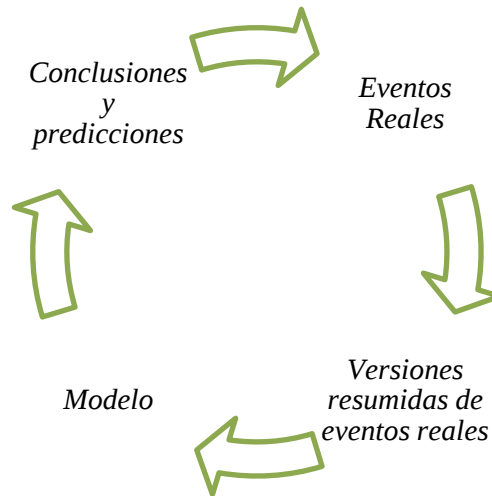


Figura 1. Construcción de un modelo

Los eventos reales estimulan la curiosidad sobre un fenómeno particular. Esta curiosidad puede ser transformada en una pregunta o un grupo de preguntas sobre eventos observados y los procesos que conllevan estos eventos. Los elementos claves de procesos y observaciones pueden ser identificados para formar una versión resumida de eventos reales. Particularmente, se puede querer identificar las variables que describen estos eventos, trazar la relación entre estas variables y de este modo establecer la estructura del modelo. Basándose en el rendimiento y los resultados de operar o correr el modelo, se pueden bosquejar conclusiones y proveer predicciones acerca de eventos por experimentar u observar. Estas conclusiones y predicciones pueden ser comparadas con eventos reales y pueden llegar a la aceptación, rechazo o revisión del modelo. Cuando se está cruzando una calle concurrida, nosotros hacemos una estimación del ancho de la

calle, el número y velocidad de los vehículos que se acercan, y nuestra velocidad. Nosotros podemos separar detalles extraños como son el color de los carros o las especies de las aves en los árboles que están al otro lado de la calle.¹⁹

Una vez realizamos nuestras observaciones o estimaciones, y nuestras abstracciones, relacionamos las varias piezas de información entre sí para desarrollar un modelo. Antes de cruzar la calle ejecutamos el modelo en nuestra mente, considerando los resultados, y luego decidiendo si tenemos una oportunidad de llegar al otro lado a salvo. Si nosotros lo logramos, usaremos este modelo nuevamente. Si no lo logramos, pero somos lo suficientemente afortunados, revisamos el modelo y usamos esa versión revisada para nuestra próxima decisión. Quizás las aves en los arboles al otro lado de la calle son buitres y deberíamos haber usado esa información como una señal de que este es un punto particularmente peligroso para cruzar. Deberíamos haber sido más precisos en la estimación de la velocidad de los carros o el ancho de la calle.

La modelación es un proceso sin fin que se construye, revisa, compara y cambia. Con cada ciclo, se mejora la comprensión de la realidad.²⁰

¹⁹ (Ford, 2009)

²⁰ (Ford, 2009)

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Teniendo en cuenta los objetivos anteriormente definidos, esta investigación se desarrolló en las siguientes fases: revisión bibliográfica, recolección de datos, caracterización de la contaminación, definición de la modelación estática, definición de la modelación dinámica, calibración y validación de la modelación dinámica y análisis de los resultados. Estas fases se explican a continuación:

Revisión Bibliográfica

Se investigan estudios previos sobre hidrología, calidad del agua, metodologías de modelación estática y dinámica, y previas publicaciones sobre modelaciones dinámicas relacionadas con contaminación y calidad del agua.

Recolección de Datos

Luego de la revisión bibliográfica, se extrae la información de caudales necesaria para la realización de los modelos estáticos y dinámicos del estudio “*Reglamentación del uso del recurso hídrico en las microcuencas de los pozos, Hato Laguna, Olarte y Tobal, afluentes del Lago de Tota y motores eléctricos y/o otros combustibles que deriven agua del Lago de Tota*”²¹. Los parámetros del análisis fisicoquímico del agua (Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno “DBO₅”, Sólidos Suspendidos Totales, Fósforo y Coliformes Totales) son aportados por muestreos realizados por CORPOBOYACA.

²¹ (CORPOBOYACA, 2009)

Caracterización de la Contaminación

El nivel de contaminación es determinado en 22 puntos de muestreo de la cuenca del Lago de Tota para los años 2009 a 2011, mediante el cálculo del Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO), Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS) e Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO), caudales y cargas de contaminación. El cálculo de estos índices se describe a continuación:

a) *ICOMO: Índice de contaminación por materia orgánica*

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{DBO} + I_{Coliformes} + I_{\%Oxigeno})$$

$$I_{DBO} = -0.05 + 0.70 \log_{10} DBO(mg/lt)$$

Para DBO mayor a 30 mg/lt el índice será de 1 y para DBO menor a 2 mg/lt el índice será de 0.

$$I_{Coliformes\ Totales} = -1.44 + 0.56 \log_{10} Coliformes\ Totales\ (NMP/100ml)$$

Para coliformes totales mayor a 20000 $NMP/100ml$ se toma un índice de 1 y para coliformes totales menores de 500 $NMP/100ml$ se toma un índice de 0.

$$I_{\%Oxigeno} = 1 - 0.01 \cdot \%Oxigeno$$

Para porcentajes de oxígeno mayores a 100% se obtiene un índice de oxígeno de cero.

Para sistemas lénticos con eutrofización y porcentajes de saturación mayores al 100% se usa la siguiente expresión.

$$I_{\% \text{ Oxígeno}} = 0.01 \cdot \% \text{ Oxígeno} - 1$$

b) ICOSUS: Índice de contaminación por sólidos suspendidos

$$ICOSUS = -0.02 + 0.003 \text{ Sólidos Suspendidos (mg/lt)}$$

Para valores de sólidos suspendidos mayores a 340 *mg/lt* se tiene un índice de 1 y para valores menores a 10 *mg/lt* se tiene un índice de 0.

c) ICOTRO: Índice de contaminación por trófico

Es calculado en base a la concentración de Fósforo Total en *mg/lt*.

Oligotrofia: < 0.01

Mesotrofia: 0.01 – 0.02

Eutrofia: 0.02 – 1.00

Hipereutrofia: > 1.00

Para una mejor apreciación de resultados, se realiza un promedio de los índices de contaminación (ICOMO, ICOSUS, e ICOTRO) para cada punto de muestreo.

d) Caudales

Los caudales usados para el cálculo de las cargas de contaminación son determinados en base a datos medios mensuales de caudal en las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos* para los años 1971 a 2004 medidos por el IDEAM, además de caudales medidos en las zonas altas y bajas de los cauces principales de las microcuencas en el 2013.

Con la información recolectada se obtienen las variaciones medias de los caudales para las zonas altas y bajas, usando la siguiente relación para cada mes.

$$Qzb_{1971-2004} = \text{Caudal medio mensual (1971 – 2004) zona baja}$$

$$Qzb_{2013} = \text{Caudal medio mensual (2013) zona baja}$$

$$Qza_{2013} = \text{Caudal medio mensual (2013) zona alta}$$

$$Qza_e = \text{Caudal medio mensual estimado zona baja}$$

$$dQ = \text{Variación de caudal}$$

$$Qza_e = \frac{Qzb_{1971-2004} - Qza_{2013}}{Qzb_{2013}}$$

$$dQ = \frac{Qza_e}{Qzb_{1971-2004}}$$

Se promedian las variaciones de caudales (dQ) de microcuenca, ya que solo existen datos para las zonas altas en los meses de marzo, mayo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Los caudales finales para la zona alta se calculan con los caudales medios mensuales de la zona baja o desembocadura así:

$$Qza = Qzb \cdot dQ$$

e) Cargas de contaminación

Las cargas de contaminación de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), coliformes totales, sólidos suspendidos totales y fósforo para las zonas altas y bajas son calculadas

teniendo en cuenta los resultados del análisis fisicoquímico del agua de los cauces principales de las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos*, además de un volumen mensual estimado determinado a partir del caudal medio mensual.

$$V_{ij} = \text{Volumen de agua para un mes "i" y microcuenca "j"}$$

$$Carga_{ij} = \text{Carga de contaminación en mes "i" y microcuenca "j"}$$

$$V_{ij} (l) = Q_i \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot \text{Numero de días del mes}$$

$$Carga_{ij} = \text{Concentración}_{ij} \cdot V_{ij}$$

Se escogen las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos*, así como las cargas de contaminación de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), coliformes totales, sólidos suspendidos totales, fósforo y demás parámetros del análisis fisicoquímico del agua para realizar el estudio, ya que gran mayoría de los datos se encuentran incompletos en la microcuenca *Rio Tobal*.

Desarrollo del Modelo Estático

Mediante la aplicación de la metodología “análisis del flujo de materiales”, se desarrolla un modelo estático que representa los flujos de cargas de contaminación en la cuenca del Lago de Tota. Esta metodología busca cuantificar los flujos de materiales que entran y salen de un sistema, estableciendo un límite espacial y temporal en donde actúan una serie procesos los cuales se conectan entre sí por medio de flujos.

Gráficamente la línea punteada en el esquema del modelo estático establece el límite de espacio temporal como la Cuenca del Lago de Tota (Figura 2) y el límite de tiempo los datos obtenidos entre 2009 y 2011. Los cuadros son los procesos: superficie, corrientes, acuíferos, y lago. Las flechas son los flujos: escorrentía, infiltración, flujo superficial y recarga. Las entradas del sistema son: precipitación y vertimientos. Las salidas del sistema son: captaciones y pozos profundos.

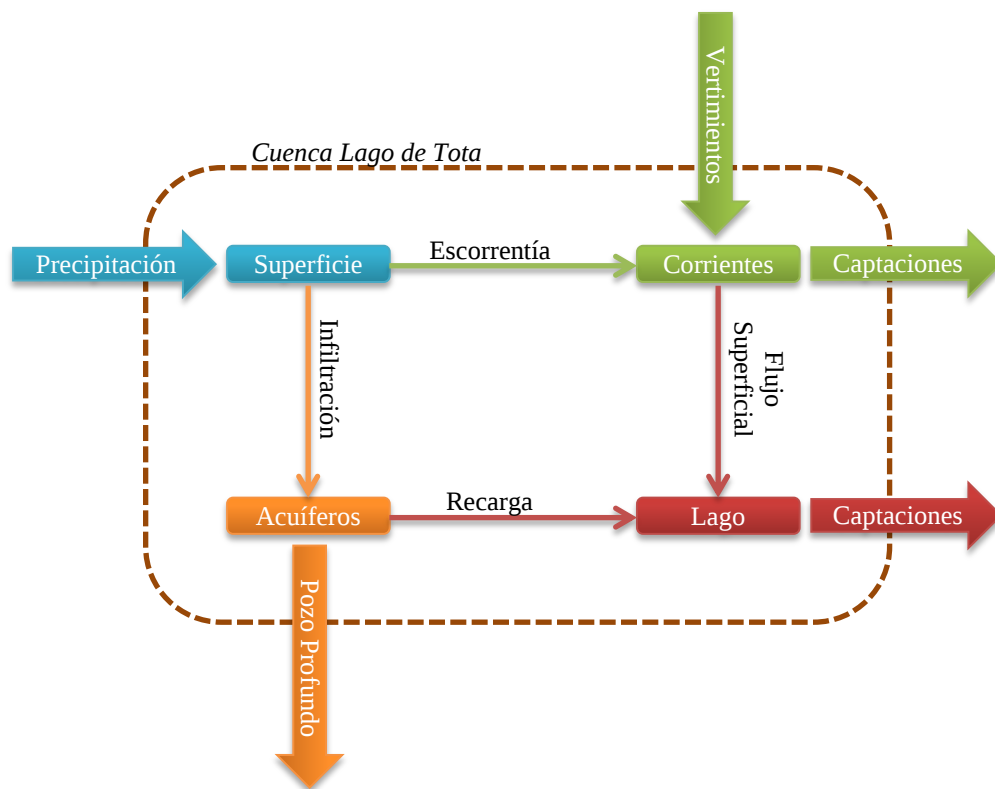


Figura 2. Esquema modelo estático

Construcción del Modelo Dinámico

Se realiza un modelo dinámico basado en la metodología “sistemas dinámicos”, que consiste en la descripción de sistemas mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales

las cuales hacen uso de parámetros variables en el tiempo para poder simular los procesos que ocurren en un escenario específico. El modelo es desarrollado para explicar el comportamiento, recorrido, fluctuación y transformación de las cargas de contaminación en determinados intervalos de tiempo, para esto son usados los datos resultantes de la caracterización de la contaminación presente en la cuenca del Lago de Tota.

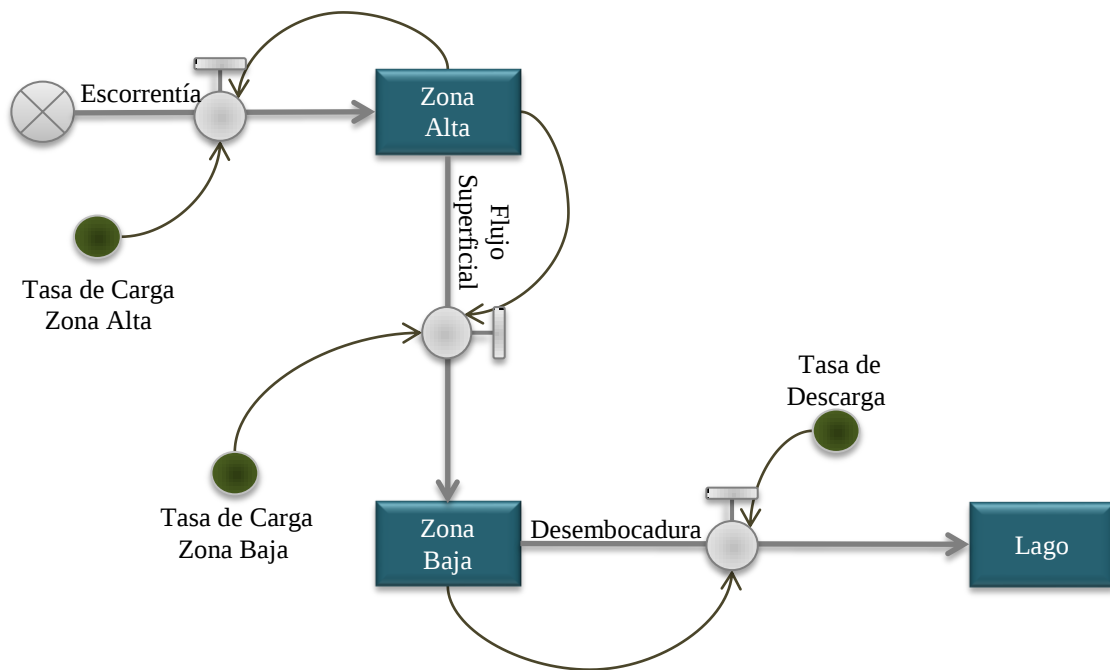


Figura 3. Esquema modelo dinámico

El modelo dinámico de cargas de contaminación está compuesto de por masas y flujos. Las masas están definidas en tres almacenamientos temporales: zona alta, zona baja y lago, estos están conectados mediante los flujos de escorrentía, flujo superficial y desembocadura, los cuales se encuentran regulados por medio de tasas de carga en la zona alta y baja, y de descarga en la desembocadura hacia el lago. El funcionamiento del modelo está definido mediante el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales:

$$Zona\ Alta\ (t) = Zona\ Alta\ (t - dt) + (Escorrentía - Flujo\ Superficial) \cdot dt$$

$$Escorrentía = Zona\ Alta \cdot Tasa\ De\ Carga\ Zona\ Alta$$

$$Flujo\ Superficial = Zona\ Alta \cdot Tasa\ De\ Carga\ Zona\ Alta$$

$$Zona\ Baja\ (t) = Zona\ Baja\ (t - dt) + (Flujo\ Superficial - Desagüe) \cdot dt$$

$$Desagüe = Tasa\ De\ Descarga \cdot Zona\ Baja$$

$$Lago(t) = Lago(t - dt) + Desagüe \cdot dt$$

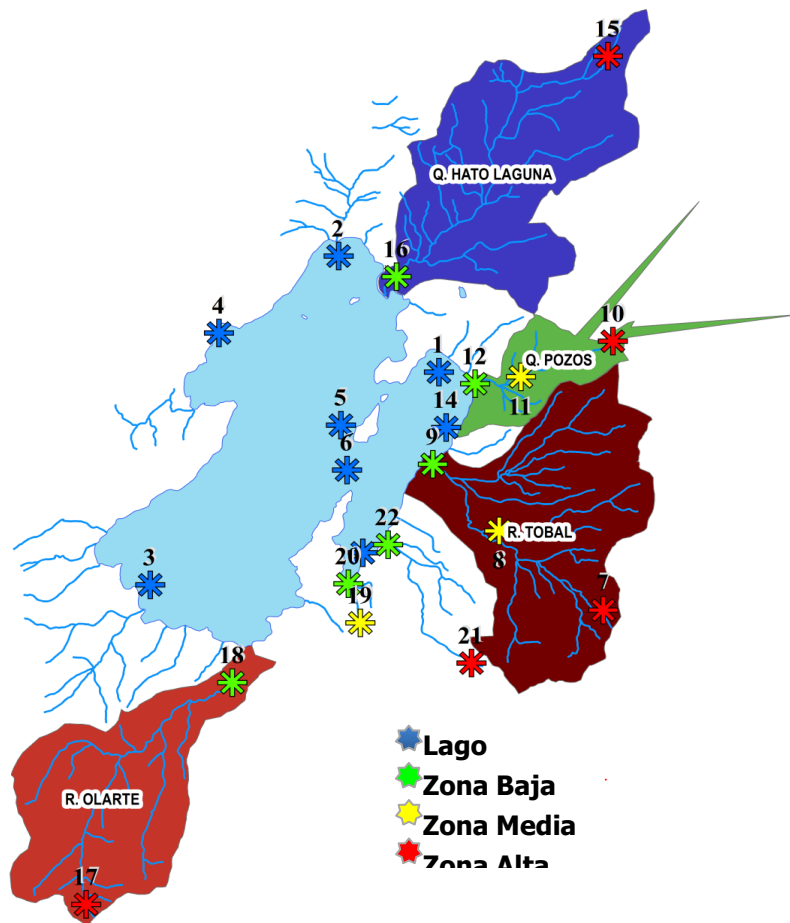


Figura 4. Zonas Cuenca Lago de Tota

a) Tasas de Carga de Contaminación

Las tasas de variación de contaminación en las microcuencas son determinadas de acuerdo a las cargas medias anuales de contaminación de la zona alta y baja. Para las tasas de carga en la zona alta se usa una relación que depende únicamente de las cargas en esta zona, teniendo así:

$$Crg_{ZAf} = \text{Carga Año Actual Zona Alta}$$

$$Crg_{ZAi} = \text{Carga Año Anterior Zona Alta}$$

$$Tcrg_{ZA} = \frac{Crg_{ZAf}}{Crg_{ZAi}}$$

En donde $Tcrg_{ZA}$ es la tasa de carga de la zona alta.

El cálculo para determinar las tasas de carga en la zona baja tiene en cuenta tanto los datos de esta zona como los de la zona alta de un mismo año, de la siguiente manera:

$$Crg_{ZA} = \text{Carga Zona Alta}$$

$$Crg_{ZB} = \text{Carga Zona Baja}$$

$$Tcrg_{ZA} = \frac{Crg_{ZB} - Crg_{ZA}}{Crg_{ZA}}$$

b) Modelación

Para el modelo son necesarios los datos iniciales de las cargas de contaminación en la zona alta y baja, así como una única tasa de contaminación en la zona alta y baja de cada microcuenca, por esto se debe realizar un promedio de las tasas de carga.

El ingreso de los datos al modelo dinámico de cargas de contaminación se hace por medio del software STELLA™. Como primer paso se realiza el esquema del modelo, el cual se puede observar en la Figura 4. Además se agregan las salidas de datos en forma de gráfica y de tabla.

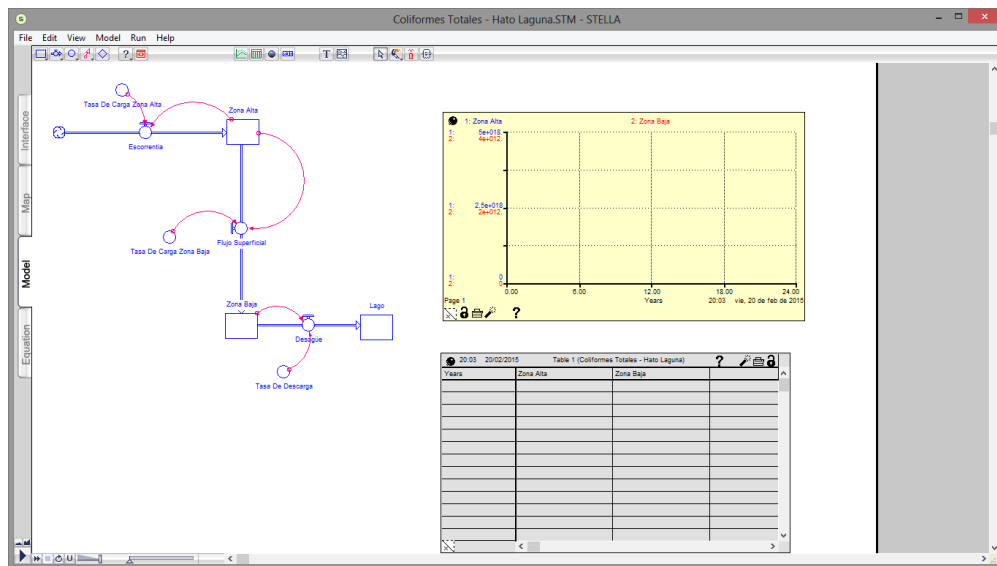


Figura 5. Esquema modelo dinámico en el software STELLA™.

Posteriormente se procede a ingresar la fórmula que relaciona la carga de contaminación inicial y las tasas de carga y descarga para establecer los flujos del modelo dinámico. En la Figura 5, se observa como se establece el flujo de escorrentía en el software. Este

proceso es realizado de igual manera para el flujo superficial y la desembocadura, relacionando las tasas de carga y descarga con la zona alta y baja respectivamente.

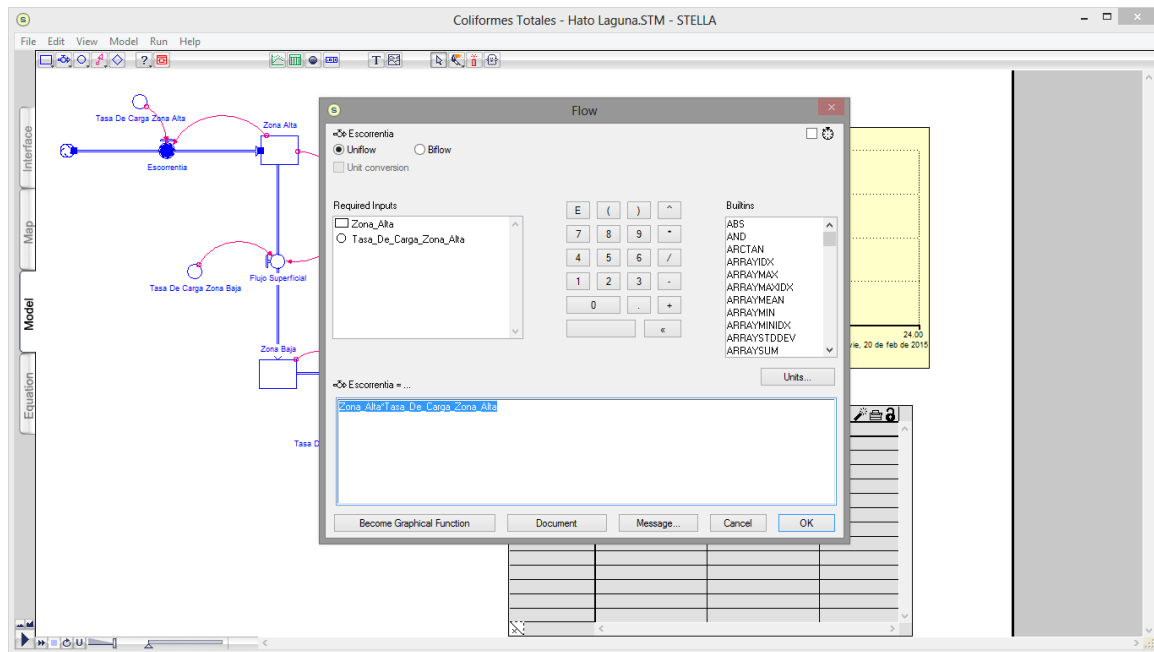


Figura 6. Flujo de escorrentía en STELLA™.

Los últimos datos a ingresarse en el software son las tasas de carga, descarga y los valores iniciales de cargas de contaminación para cada parámetro y microcuenca. Las cargas de contaminación iniciales son las calculadas para el año 2009. En las siguientes figuras se pueden ver los cuadros de dialogo donde son ingresados los valores iniciales.

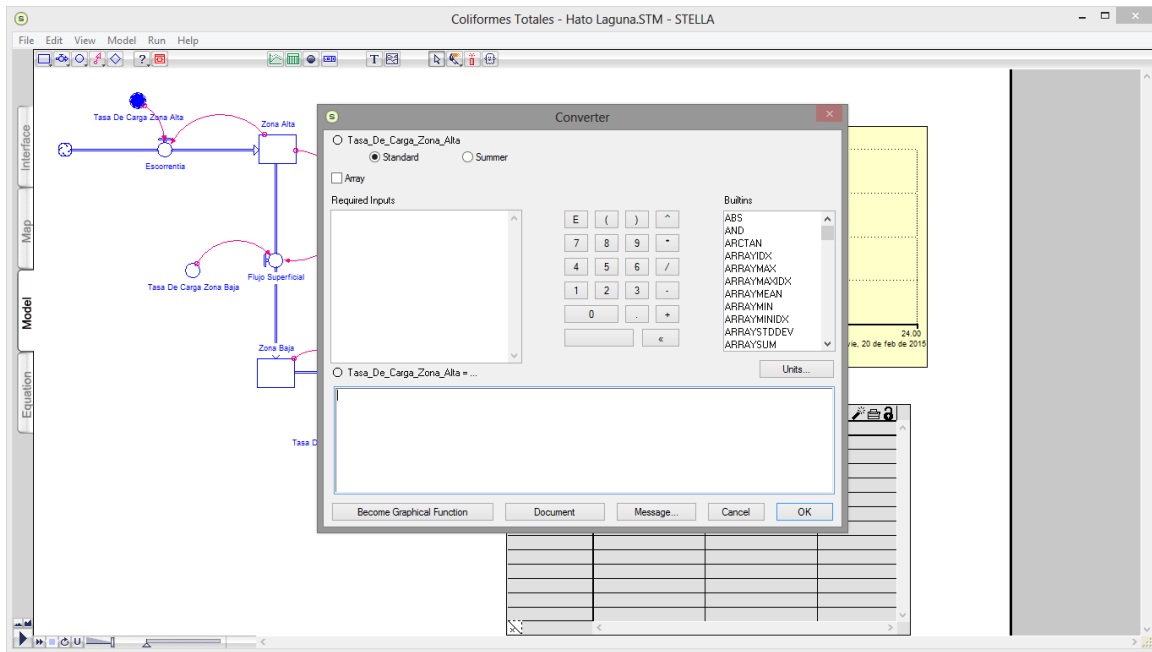


Figura 7. Cuadro de dialogo para tasas de carga y descarga.

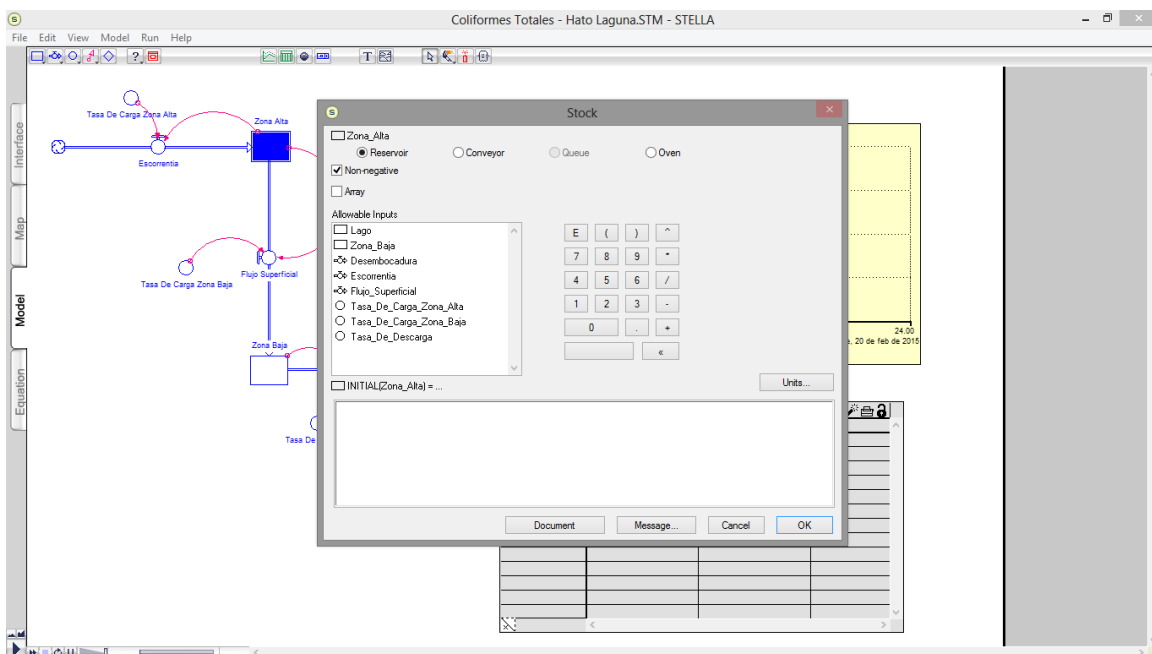


Figura 8. Cuadro de dialogo para cargas de contaminación iniciales.

Finalmente se establecen los parámetros para ejecutar el modelo en el cuadro de dialogo “Run Specs” encontrado en el menú “Run”. Para el presente modelo se determina un periodo de modelación de 0 a 24 años, teniendo como resultado los valores de los años 2009 a 2011 para la validación y los años 2012 a 2033 para la proyección de las cargas de contaminación. Una vez se tengan todos los valores asignados se ejecuta el modelo mediante la opción “Run” o mediante el comando Ctrl+R.

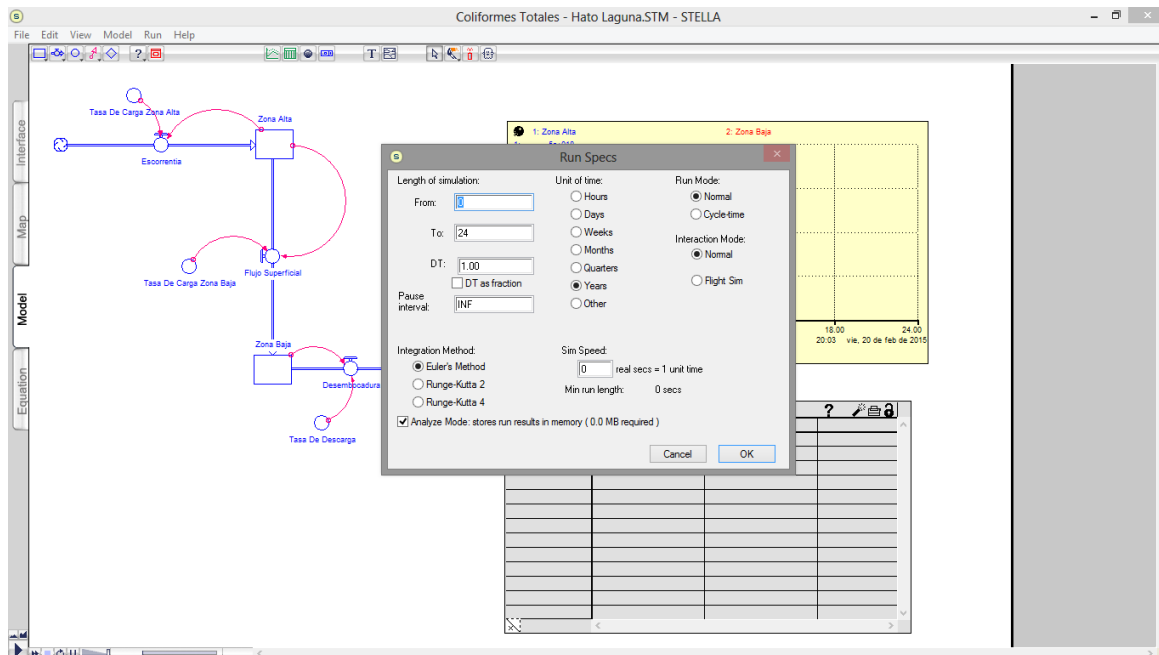


Figura 9. Cuadro de dialogo "Run Specs".

Calibración y Validación del Modelo Dinámico

Con la obtención de los resultados de las primeras simulaciones del modelo dinámico, se realiza una calibración por medio de una comparación entre datos arrojados por la modelación y los datos observados (cargas de contaminación) variando la tasas de carga y descarga, para así proceder a la validación del modelo de manera iterativa.

Análisis y Discusión de los Modelos Propuestos

Al tener la modelación dinámica de las cargas de contaminación del agua de la cuenca del Lago de Tota se realiza una comparación con las modelaciones que posean una gran similitud con el estudio realizado, las cuales se explican en el estado del arte proveniente de bases de datos y tesis anteriormente desarrolladas. Se observa el comportamiento en cuanto a tendencia y magnitud de los datos procesados, además de los procesos que componen cada una de estas modelaciones. Los resultados obtenidos de la modelación dinámica muestran el nivel de contaminación al que puede llegar la cuenca del Lago de Tota. Identificando las fuentes y lugares de contaminación se define un programa estratégico de solución a la contaminación.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Recolección de datos

Los datos de los análisis fisicoquímicos fueron tomados por la Corporación Autónoma de Boyacá (CORPOBOYACA) en 22 puntos de la cuenca del Lago de Tota como se indica en la Figura 9. Los puntos de muestreo están distribuidos en las zonas altas y bajas de las corrientes principales de cada una de las microcuencas, así como en el perímetro del lago. Se tiene un histórico de datos desde el año 2004 al 2011 con alrededor de 3 tomas de datos anuales y una toma de datos para el año 2013. Esto se debe a que las fechas de las mediciones no son realizadas con un orden cronológico exacto, sino en diferentes meses cada año. Estos análisis fisicoquímicos muestran ausencia de datos en algunos parámetros como: demanda química de oxígeno, sólidos totales, acidez, alcalinidad, color real y oxígeno disuelto. Además el parámetro de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) no posee los datos correspondientes a los años 2007 a 2008.

En la revisión de la información de los análisis fisicoquímicos se encontraron una serie de datos anormales y ocasionalmente de datos faltantes en algunos parámetros. La razón de esto puede ser por errores de digitación o cambio de personal en la toma de mediciones. En el histórico de datos se encuentra el cálculo de índices de calidad del agua, el cual no es confiable, ya que se hace necesaria la totalidad de los parámetros del análisis fisicoquímico para que el resultado sea acertado. Por esto la investigación plantea una caracterización de la cuenca del Lago de Tota mediante el cálculo de índices de contaminación del agua.

La información recolectada de caudales está compuesta por caudales medios mensuales tomados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en las desembocaduras de las microcuencas al Lago de Tota, con un histórico de datos del año 1968 a 2004. Adicionalmente se obtuvieron los caudales medidos por CORPOBOYACA en la zonas altas y bajas de cada una de las corrientes principales de las microcuencas para el año 2013. Esta última serie de datos tiene el inconveniente de no poseer información de años anteriores para poder realizar un estudio significativo, en consecuencia se realizan unas relaciones de caudales entre el histórico de datos para los años 1968 a 2004 y los medidos en el año 2013.

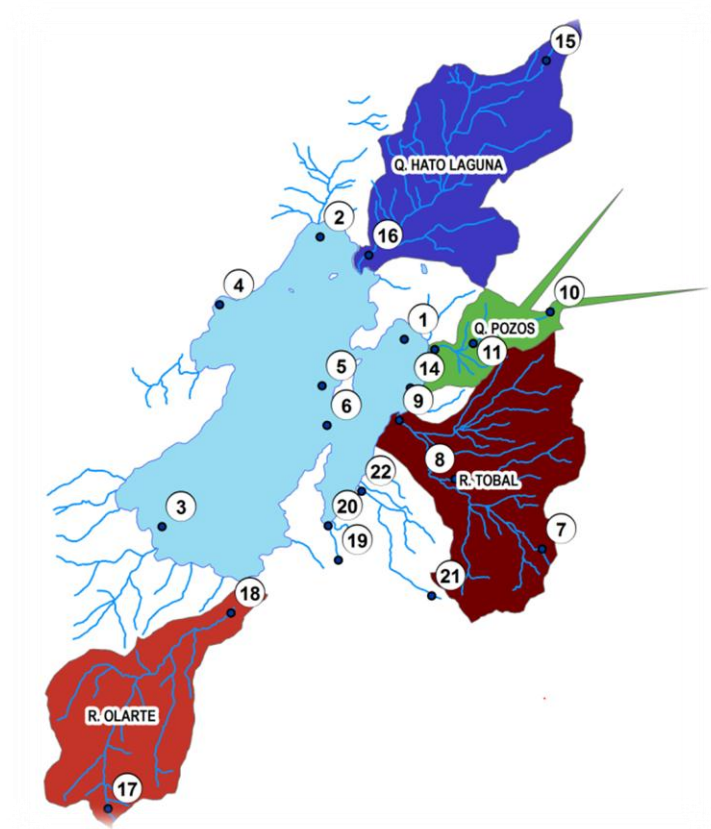


Figura 10. Puntos de muestreo de agua.

Caracterización de la Contaminación de la Cuenca del Lago de Tota

Índices de contaminación

Los índices de contaminación del agua: índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), índice de contaminación por sólidos suspendidos totales (ICOSUS) y el índice de contaminación trófico (ICOTRO), fueron calculados en los 22 puntos de muestreo de la cuenca del Lago de Tota, con el fin de diagnosticar el estado actual de esta. El presente estudio no está enfocado en los índices de calidad del agua (ICA) debido a la falta de resultados del análisis fisicoquímico como se explicó anteriormente. Por ello son calculados los índices de contaminación del agua para los años 2009 a 2011, a causa de que el parámetro oxígeno disuelto no presenta datos históricos anteriores, lo cual es fundamental para el cálculo del índice de contaminación por materia orgánica.

Aunque existen algunos datos faltantes para el periodo seleccionado, se puede realizar el cálculo de los índices de contaminación, ya que la información a procesar es representativa. Luego de obtener los resultados para cada serie de datos, se realiza un promedio aritmético de estos para tener una mejor visión del estado actual de la cuenca de Lago de Tota.

Mediante el resultado del cálculo de los índices de contaminación anteriormente mencionados, es realizada la caracterización de la cuenca del Lago de Tota. Los datos están documentados en la Tabla 2. Con esta información es posible observar fácilmente el estado general de la cuenca para el periodo seleccionado y así tener una primera vista de los problemas presentes.

Tabla 2. Promedio índices de contaminación año 2009 a 2011.

Punto	ICOMO				ICOSUS				ICOTRO (mg/L)			
1	0.41	±	0.06	n= 7	0.00	±	0.00	n= 7	0.10	±	0.07	n= 7
2	0.38	±	0.01	n= 6	0.00	±	0.00	n= 6	0.06	±	0.04	n= 6
3	0.32	±	0.05	n= 4	0.00	±	0.00	n= 4	0.05	±	0.04	n= 4
4	0.31	±	0.04	n= 4	0.00	±	0.00	n= 4	0.25	±	0.31	n= 4
5	0.32	±	0.14	n= 7	0.00	±	0.00	n= 7	0.13	±	0.06	n= 7
6	0.26	±	0.21	n= 8	0.00	±	0.00	n= 8	0.14	±	0.11	n= 8
7	0.47	±	0.05	n= 2	0.00	±	0.00	n= 2	0.00	±	0.00	n= 2
8	0.50	±	0.20	n= 6	0.00	±	0.00	n= 6	0.06	±	0.03	n= 6
9	0.76	±	0.12	n= 6	0.02	±	0.02	n= 6	0.17	±	0.04	n= 6
10	0.11	±	0.00	n= 1	0.00	±	0.00	n= 1	0.12	±	0.00	n= 1
11	0.66	±	0.15	n= 7	0.00	±	0.00	n= 7	0.15	±	0.20	n= 7
12	0.87	±	0.07	n= 7	0.03	±	0.02	n= 7	0.14	±	0.09	n= 7
13	0.50	±	0.04	n= 4	0.00	±	0.00	n= 4	0.08	±	0.05	n= 4
14	0.32	±	0.14	n= 6	0.00	±	0.00	n= 6	0.10	±	0.07	n= 6
15	0.57	±	0.05	n= 7	0.00	±	0.00	n= 7	0.12	±	0.07	n= 7
16	0.62	±	0.15	n= 7	0.00	±	0.01	n= 7	0.16	±	0.16	n= 7
17	0.47	±	0.13	n= 7	0.00	±	0.00	n= 7	0.07	±	0.04	n= 7
18	0.63	±	0.07	n= 6	0.00	±	0.00	n= 6	0.11	±	0.06	n= 6
19	0.52	±	0.07	n= 6	0.01	±	0.02	n= 6	0.13	±	0.14	n= 6
20	0.88	±	0.08	n= 6	0.05	±	0.08	n= 6	0.16	±	0.12	n= 6
21	0.82	±	0.08	n= 6	0.11	±	0.06	n= 6	0.22	±	0.14	n= 6
22	1.00	±	0.03	n= 6	0.23	±	0.25	n= 6	1.03	±	0.86	n= 6

Tabla 3. Calificación contaminación índices.

ICOMO	Calificación	ICOSUS	Calificación	ICOTRO (mg/L)	Calificación
0.00 - 0.25	Baja	0.00 - 0.25	Baja	<0.01	Oligotrofia
0.26 - 0.50	Media Baja	0.26 - 0.50	Media Baja	0.01 - 0.02	Mesotrofia
0.51 - 0.70	Media	0.51 - 0.70	Media	0.02 - 1.00	Eutrofia
0.71 - 0.90	Media Alta	0.71 - 0.90	Media Alta	>1.00	Hipereutrofia
0.91 - 1.00	Alta	0.91 - 1.00	Alta		

El índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) se encuentra en un nivel medio, observando que en un 50% de los puntos de muestreo la presencia de materia orgánica tiene grado “medio bajo”, mientras que el 50% restante tiene grado “medio alto”

de contaminación. Así mismo al observar una a una las microcuencas del Lago de Tota, se determina que la microcuenca *Olarte* presenta los niveles más bajos de contaminación por presencia de materia orgánica seguida de la microcuenca *Hato Laguna*. Por otra parte las microcuencas que se encuentran con los niveles más altos (medio alto en las desembocaduras) son las microcuencas *Pozos* y *Tobal*.

Los puntos más críticos de contaminación por materia orgánica se presentan en las desembocaduras de las microcuencas al Lago de Tota. Esto era previsible ya que se produce una acumulación de las sustancias contaminantes provenientes de la zona alta. Además se determina que la zona más contaminada por presencia de materia orgánica de la cuenca del Lago de Tota es la quebrada *Mugre* con los puntos 20, 21 y 22. Por otra parte, los lugares con menor índice de contaminación por materia orgánica se presentan en la zona alta de las microcuencas y en los puntos 3, 4, 5, 6 y 14, los cuales representan el perímetro del lago. Su bajo nivel de contaminación es debido a que aumenta drásticamente el volumen de agua, generando así una disminución en la solución de los agentes contaminantes.

La cuenca del lago de Tota posee en general niveles bajos de contaminación por sólidos suspendidos totales. Este índice se debe mantener o mejorar para reducir el riesgo de contaminación futura. Nuevamente el punto más contaminado (punto 22) se encuentra en la quebrada *Mugre*, a pesar de que sigue en el rango bajo de contaminación por sólidos suspendidos totales. Este se encuentra al límite de la contaminación media baja.

El índice de contaminación trófico, el cual está asociado a la presencia de fósforo en el agua, se encuentra en niveles de “eutrofización” a lo largo de toda la cuenca del Lago de Tota, a excepción de los puntos 7 y 22. Se puede afirmar que los altos niveles de fósforo presentados en el agua de la zona de estudio se deben a la gran cantidad de cultivos que existen en la cuenca. Cabe destacar que el punto con índice de contaminación igual a cero (punto 7) se encuentra en el nacimiento de la microcuenca *Tobal*, y el punto con mayor índice de contaminación (punto 22) vuelve a ser en la desembocadura de la quebrada *Mugre* presentando “hipereutrofización”.

En resumen se puede determinar que el nivel de contaminación de la cuenca del Lago de Tota, se encuentra en nivel medio de contaminación por materia orgánica, nivel bajo de contaminación por sólidos suspendidos totales, y en un proceso de eutrofización en términos del índice de contaminación trófico.

Caudales

Procesando la información de caudales medidos del año 2013 por la Corporación Autónoma de Boyacá (CORPOBOYACA) y los caudales medios mensuales para la serie de datos de los años 1968 a 2004, se obtienen los caudales de la microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos* en las zonas altas y bajas. Esto con el fin de realizar el cálculo de las cargas de contaminación respectivas a cada una de estas, teniendo como resultado lo indicado en la Tabla 4.

El cálculo de caudales es realizado únicamente en las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos*, exceptuando la microcuenca *Tobal* ya que hay información faltante o errónea en los análisis fisicoquímicos y en los caudales para el año 2013.

Las tres microcuencas de estudio *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos* poseen caudales similares en los meses de Enero a Abril, en cambio en el resto de los meses se puede evidenciar que la microcuenca *Olarte* es la que presenta mayor caudal seguida de la microcuenca *Hato Laguna*, siendo así la microcuenca *Pozos* la que menor caudal aporta.

Tabla 4. Caudales obtenidos en las microcuencas.

<i>Hato Laguna</i>				<i>Olarte</i>			
<i>Zona Baja</i>		<i>Zona Alta</i>		<i>Zona Baja</i>		<i>Zona Alta</i>	
<i>Mes</i>	<i>Caudal (m3/s)</i>	<i>Mes</i>	<i>Caudal (m3/s)</i>	<i>Mes</i>	<i>Caudal (m3/s)</i>	<i>Mes</i>	<i>Caudal (m3/s)</i>
Enero	0.10	Enero	0.10	Enero	0.20	Enero	0.35
Febrero	0.10	Febrero	0.10	Febrero	0.10	Febrero	0.18
Marzo	0.20	Marzo	0.20	Marzo	0.10	Marzo	0.18
Abril	0.30	Abril	0.30	Abril	0.30	Abril	0.53
Mayo	0.40	Mayo	0.40	Mayo	0.80	Mayo	1.42
Junio	0.60	Junio	0.59	Junio	1.10	Junio	1.95
Julio	0.90	Julio	0.89	Julio	1.60	Julio	2.83
Agosto	1.00	Agosto	0.99	Agosto	1.60	Agosto	2.83
Septiembre	0.70	Septiembre	0.69	Septiembre	1.10	Septiembre	1.95
Octubre	0.60	Octubre	0.59	Octubre	0.80	Octubre	1.42
Noviembre	0.60	Noviembre	0.59	Noviembre	0.60	Noviembre	1.06
Diciembre	0.30	Diciembre	0.30	Diciembre	0.30	Diciembre	0.53

<i>Pozos</i>			
<i>Zona Baja</i>		<i>Zona Alta</i>	
<i>Mes</i>	<i>Caudal (m3/s)</i>	<i>Mes</i>	<i>Caudal (m3/s)</i>
Enero	0.10	Enero	0.13
Febrero	0.10	Febrero	0.13
Marzo	0.10	Marzo	0.13
Abril	0.20	Abril	0.26
Mayo	0.40	Mayo	0.52
Junio	0.50	Junio	0.65
Julio	0.60	Julio	0.78
Agosto	0.50	Agosto	0.65
Septiembre	0.30	Septiembre	0.39
Octubre	0.30	Octubre	0.39
Noviembre	0.30	Noviembre	0.39
Diciembre	0.10	Diciembre	0.13

De acuerdo a las variaciones de caudal presentadas en la Tabla 5, se observa que la microcuenca *Hato Laguna* posee caudales menores en la zona alta en comparación a la zona baja, y por el contrario las microcuencas *Pozos* y *Olarte* tienen un mayor caudal en la zona alta que en la zona baja, siendo esta ultima la que mayor relación de caudal tiene aguas arriba. Esto sucede porque es posible que en el curso del agua existan captaciones para las diferentes actividades agrícolas y domésticas en la zona.

Tabla 5. Promedio variaciones de caudal.

<i>Microcuenca</i>	<i>Promedio dQ</i>
Hato Laguna	0.99 ± 0.08
Olarte	1.77 ± 0.70
Pozos	1.30 ± 1.94

Cargas de Contaminación

Las cargas mensuales de contaminación: oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales, sólidos suspendidos totales y fósforo para las zonas altas y bajas de las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos* para los años 2009 a 2011 se encuentran en la Tabla 6 para la zona alta, y en la Tabla 7 para la zona baja. Como se explicó anteriormente el estudio se enfoca en las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos*, por lo cual no se presentan las cargas de contaminación de la microcuenca *Tobal*. La información faltante en las tablas (representada como “-”) es consecuencia de datos erróneos o faltantes de los análisis fisicoquímicos del agua; sin embargo, con los datos existentes se puede conseguir una muestra significativa para el correcto desarrollo de la investigación.

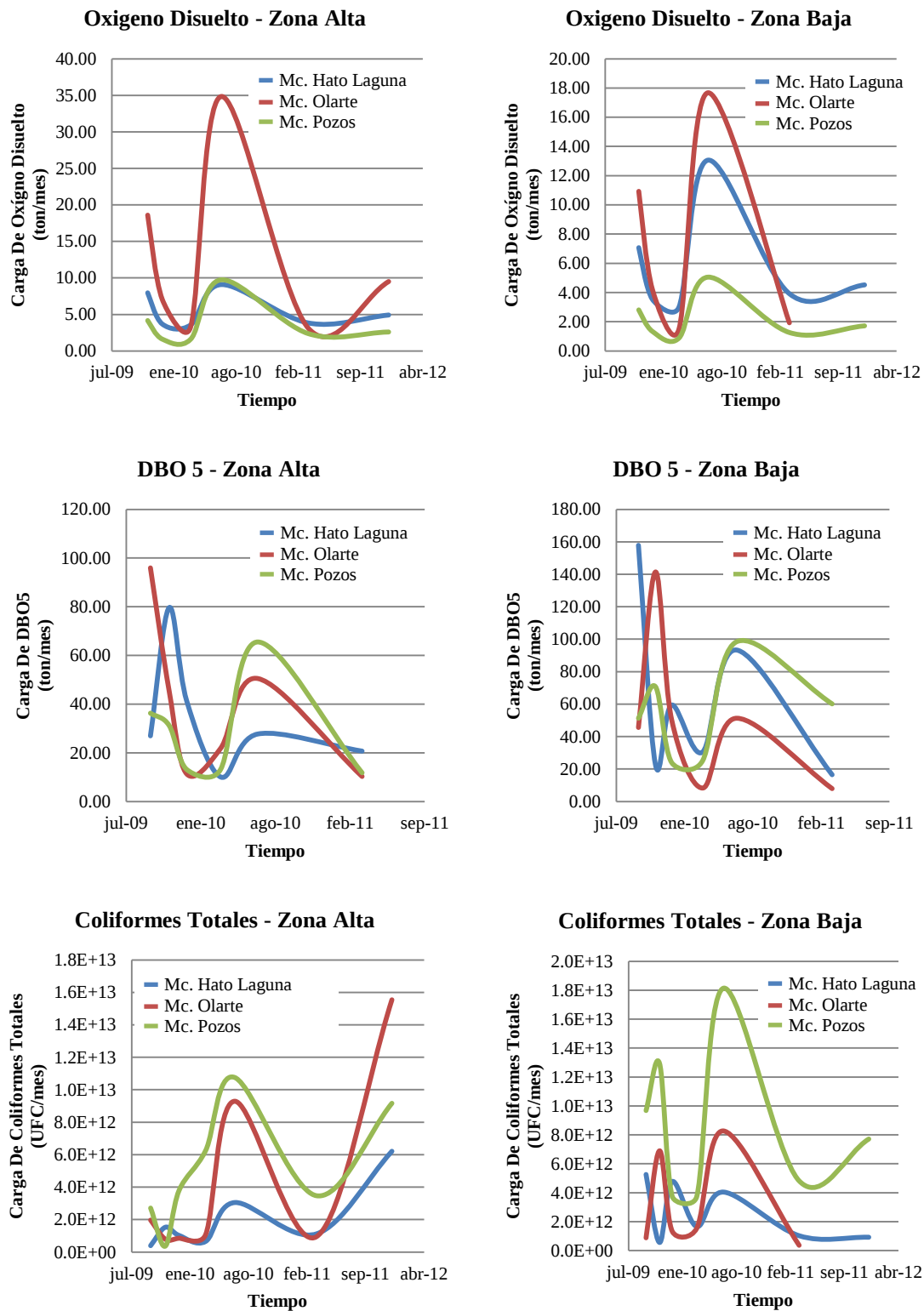
Tabla 6. Cargas mensuales de contaminación zona alta.

<i>Microcuenca Hato Laguna</i>								
<i>Carga</i>	<i>Unidades</i>	<i>sep-09</i>	<i>oct-09</i>	<i>dic-09</i>	<i>mar-10</i>	<i>jun-10</i>	<i>mar-11</i>	<i>dic-11</i>
Oxígeno Disuelto	(ton/mes)	-	7.96	3.69	3.56	9.09	3.83	4.92
DBO ₅	(ton/mes)	26.97	79.63	41.41	10.09	27.74	20.70	-
Coliformes Totales	(UFC/mes)	4.0E+11	1.5E+12	1.0E+12	6.6E+11	3.1E+12	1.1E+12	6.2E+12
SST	(ton/mes)	8.45	7.64	3.66	2.50	7.24	2.50	3.58
Fósforo	(ton/mes)	0.41	0.22	0.07	-	0.22	0.29	0.08
<i>Microcuenca Olarte</i>								
<i>Carga</i>	<i>Unidades</i>	<i>sep-09</i>	<i>oct-09</i>	<i>dic-09</i>	<i>mar-10</i>	<i>jun-10</i>	<i>mar-11</i>	<i>dic-11</i>
Oxígeno Disuelto	(ton/mes)	-	18.60	7.05	3.27	34.85	3.10	9.51
DBO ₅	(ton/mes)	95.96	45.55	11.39	21.82	50.50	10.30	-
Coliformes Totales	(UFC/mes)	2.0E+12	8.0E+11	8.5E+11	1.1E+12	9.3E+12	9.5E+11	1.6E+13
SST	(ton/mes)	23.74	18.98	6.69	2.85	23.74	2.23	9.96
Fósforo	(ton/mes)	0.51	0.23	0.16	0.03	0.35	0.00	0.14
<i>Microcuenca Pozos</i>								
<i>Carga</i>	<i>Unidades</i>	<i>sep-09</i>	<i>oct-09</i>	<i>dic-09</i>	<i>mar-10</i>	<i>jun-10</i>	<i>mar-11</i>	<i>dic-11</i>
Oxígeno Disuelto	(ton/mes)	-	4.17	1.62	1.60	9.74	2.37	2.60
DBO ₅	(ton/mes)	36.29	31.25	13.19	13.19	65.53	11.81	-
Coliformes Totales	(UFC/mes)	2.7E+12	3.6E+11	3.8E+12	6.3E+12	1.1E+13	3.5E+12	9.2E+12
SST	(ton/mes)	8.06	6.25	3.47	2.71	7.90	1.63	-
Fósforo	(ton/mes)	0.05	0.10	0.01	0.03	0.17	0.19	-

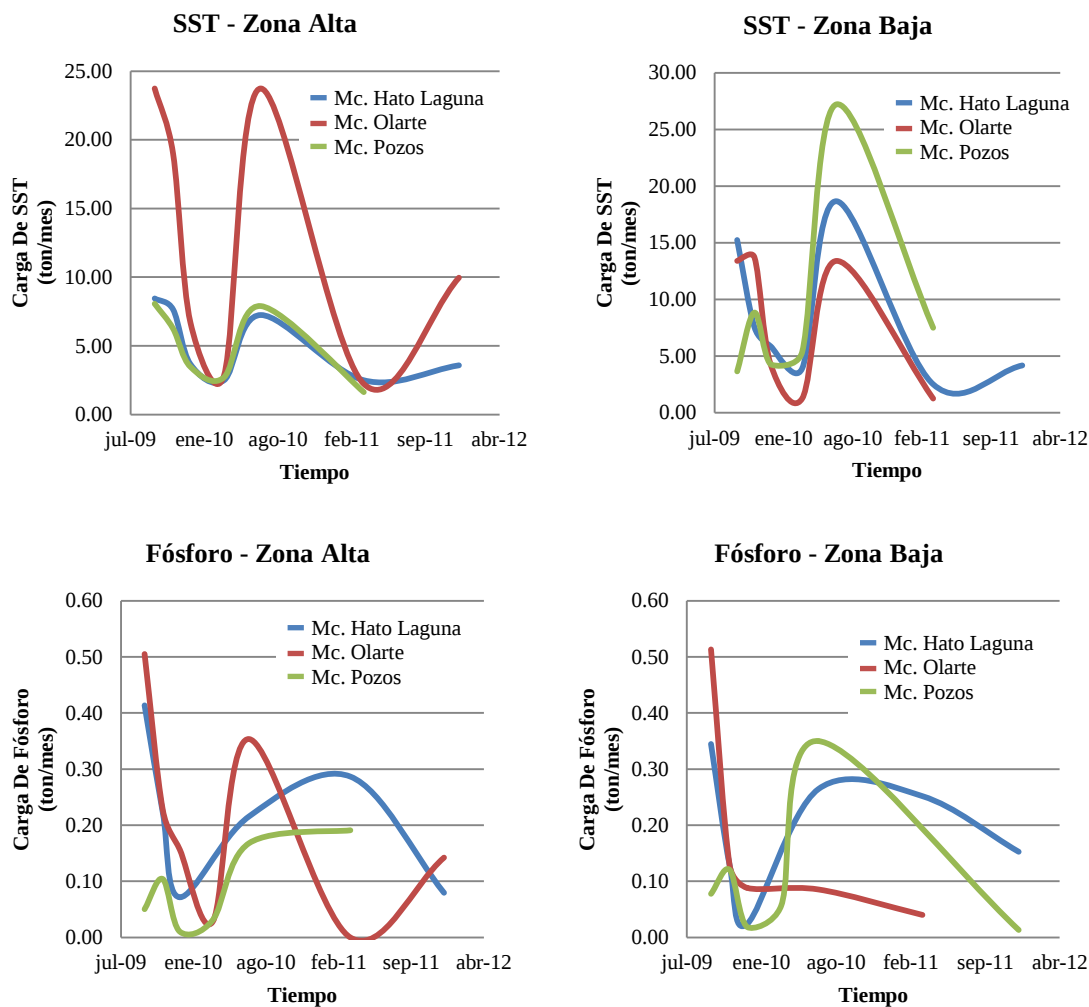
Tabla 7. Cargas mensuales de contaminación zona baja.

Microcuenca Hato Laguna								
Carga	Unidades	sep-09	oct-09	dic-09	mar-10	jun-10	mar-11	dic-11
Oxígeno Disuelto	(ton/mes)	-	7.07	3.53	3.00	13.06	3.92	4.52
DBO ₅	(ton/mes)	157.85	22.50	59.46	30.53	93.31	16.50	-
Coliformes Totales	(UFC/mes)	5.3E+12	5.6E+11	4.8E+12	1.7E+12	4.0E+12	1.0E+12	9.2E+11
SST	(ton/mes)	15.24	7.55	5.87	3.91	18.66	2.52	4.18
Fósforo	(ton/mes)	0.34	0.13	0.02	-	0.26	0.25	0.15
Microcuenca Olarte								
Carga	Unidades	sep-09	oct-09	dic-09	mar-10	jun-10	mar-11	dic-11
Oxígeno Disuelto	(ton/mes)	-	10.93	4.19	1.50	17.68	1.93	-
DBO ₅	(ton/mes)	45.62	141.42	50.62	8.30	51.32	7.95	-
Coliformes Totales	(UFC/mes)	8.8E+11	6.9E+12	1.3E+12	1.5E+12	8.3E+12	3.7E+11	-
SST	(ton/mes)	13.40	13.71	4.26	1.26	13.40	1.26	-
Fósforo	(ton/mes)	0.51	0.13	0.09	-	0.09	0.04	-
Microcuenca Pozos								
Carga	Unidades	sep-09	oct-09	dic-09	mar-10	jun-10	mar-11	dic-11
Oxígeno Disuelto	(ton/mes)	-	2.81	1.34	0.88	5.05	1.26	1.72
DBO ₅	(ton/mes)	51.32	70.71	24.11	25.18	98.50	60.16	-
Coliformes Totales	(UFC/mes)	9.7E+12	1.3E+13	3.7E+12	3.7E+12	1.8E+13	4.8E+12	7.7E+12
SST	(ton/mes)	3.65	8.84	4.29	5.36	27.22	7.50	-
Fósforo	(ton/mes)	0.08	0.12	0.02	0.06	0.35	-	0.01

Con las cargas de contaminación se puede realizar un análisis histórico de los datos, comprendiendo así los cambios que ha venido teniendo la cuenca del Lago de Tota y su estado actual. De igual manera, se observará la tendencia a un posible aumento o disminución de la contaminación. En la Gráfica 1, se puede visualizar la fluctuación y el comportamiento de las cargas de contaminación con respecto al tiempo, y se presentan los datos obtenidos para la zona alta y baja de las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos*, haciendo posible una comparación entre estas.



Gráfica 1. Cargas de contaminación microcuencas Lago de Tota.



Gráfica 2. Cargas de contaminación microcuencas Lago de Tota (Continuación).

De acuerdo a el comportamiento general observado en el registro histórico de las cargas de contaminación en las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos*, se puede inferir que existe un periodo con alta contaminación, la cual empieza alrededor de los meses de Mayo y Junio con un máximo en el mes de Agosto, y termina entre los meses de Septiembre y Octubre. Esto se puede relacionar con la temporada de baja pluviosidad en Colombia la cual se presenta de Julio a Agosto, coincidiendo con los puntos más altos de contaminación. El aumento de las cargas de contaminación se debe a que al existir una

menor precipitación el nivel de las sustancias contaminantes será mayor. Las variaciones constantes y abruptas en las cargas de contaminación dificultan el análisis de la tendencia de los datos. Por esta razón se realiza una estandarización de los datos por medio de un promedio aritmético, dando como resultado cargas medias mensuales de contaminación para los años 2009 a 2011 en las zonas altas y bajas de las microcuencas como se muestra en la Tabla 8.

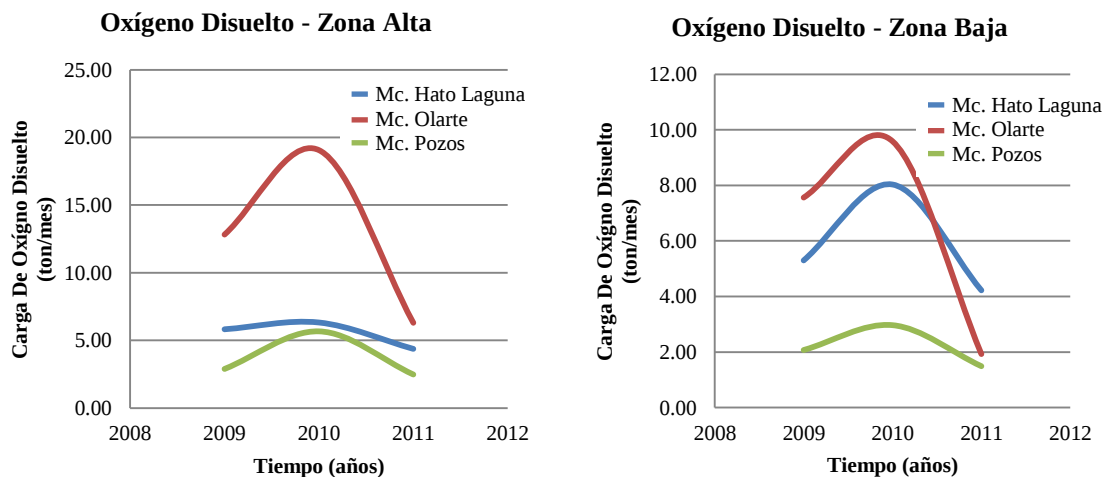
Tabla 8. Cargas medias mensuales de contaminación.

<i>Microcuenca Hato Laguna</i>							
		<i>Zona Alta</i>			<i>Zona Baja</i>		
<i>Carga</i>	<i>Unidades</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
Oxígeno Disuelto	(ton/mes)	5.82	6.32	4.38	5.30	8.03	4.22
DBO ₅	(ton/mes)	49.34	18.91	20.70	79.94	61.92	16.50
Coliformes Totales	(UFC/mes)	9.84E+11	1.85E+12	3.67E+12	3.54E+12	2.85E+12	9.76E+11
SST	(ton/mes)	6.59	4.87	3.04	9.55	11.29	3.35
Fósforo	(ton/mes)	0.24	0.22	0.18	0.17	0.26	0.20
<i>Microcuenca Olarte</i>							
		<i>Zona Alta</i>			<i>Zona Baja</i>		
<i>Carga</i>	<i>Unidades</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
Oxígeno Disuelto	(ton/mes)	12.82	19.06	6.30	7.56	9.59	1.93
DBO ₅	(ton/mes)	50.96	36.16	10.30	79.22	29.81	7.95
Coliformes Totales	(UFC/mes)	1.21E+12	5.18E+12	8.25E+12	3.04E+12	4.91E+12	3.67E+11
SST	(ton/mes)	16.47	13.29	6.10	10.46	7.33	1.26
Fósforo	(ton/mes)	0.30	0.19	0.07	0.24	0.09	0.04
<i>Microcuenca Pozos</i>							
		<i>Zona Alta</i>			<i>Zona Baja</i>		
<i>Carga</i>	<i>Unidades</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
Oxígeno Disuelto	(ton/mes)	2.89	5.67	2.48	2.07	2.97	1.49
DBO ₅	(ton/mes)	26.91	39.36	11.81	48.71	61.84	60.16
Coliformes Totales	(UFC/mes)	2.29E+12	8.50E+12	6.32E+12	8.79E+12	1.09E+13	6.27E+12
SST	(ton/mes)	5.93	5.30	1.63	5.59	16.29	7.50
Fósforo	(ton/mes)	0.05	0.10	0.19	0.07	0.20	0.01

a) Carga de Oxígeno Disuelto

De acuerdo a la información procesada y trazada en la Gráfica 3, se logra observar que los niveles de oxígeno disuelto presentaron valores máximos en el año 2010, y que estos tienden a disminuir en el tiempo. La microcuenca *Olarte* presenta los mayores niveles de carga y reducción de oxígeno disuelto, siendo la zona baja la más contaminada debido a los niveles inferiores de oxígeno disuelto. Por otra parte en la microcuenca Pozos se evidencian las menores cargas, indicando así una alta contaminación.

La disminución de niveles de oxígeno disuelto puede ser debida a: un aumento en la temperatura de los cuerpos de agua, presencia de detergentes, aumento en concentración por materia orgánica ocasionada por vertimientos o por la presencia de residuos de fertilizantes. Además de la aparición de microorganismos en presencia de bajos niveles de oxígeno disuelto, esto puede provocar la muerte de peces y otros organismos

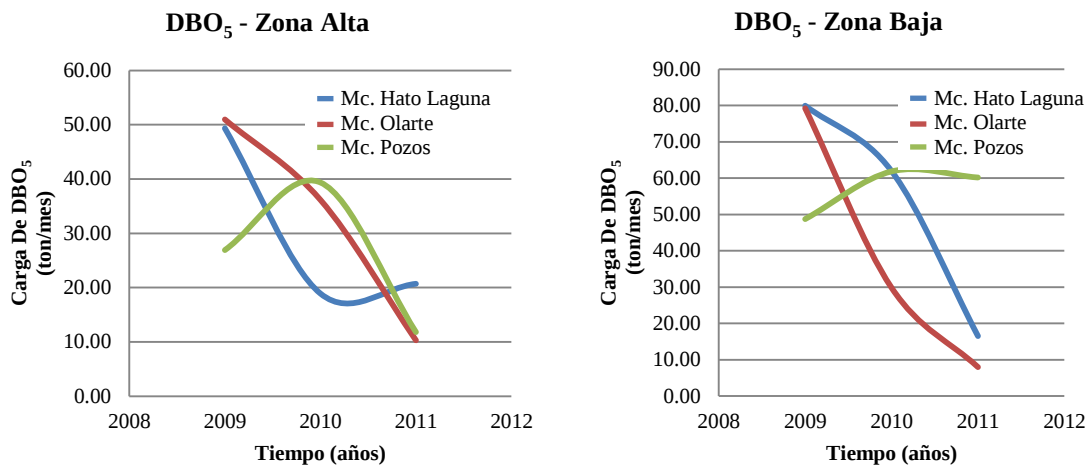


Gráfica 3. Carga de oxígeno disuelto.

b) Carga de Demanda Bioquímica de Oxígeno

Como se observa en la Gráfica 4, en las zonas altas y bajas existe una reducción de la polución, a excepción de la microcuenca *Pozos* en la zona baja, donde se está produciendo un aumento en la carga de sustancias contaminantes. La microcuenca *Hato Laguna* posee una mayor contaminación al final de la serie de datos para la zona alta en comparación con las microcuencas *Olarte* y *Pozos*. Por otra parte la microcuenca *Pozos* tiene la mayor carga en la zona baja, seguida de *Hato Laguna* y *Olarte*. A su vez los resultados en la zona baja son mayores, aunque estos tienden a igualar los valores de la zona alta al final de la serie, excluyendo nuevamente la microcuenca *Pozos* la cual se encuentra en aumento, indicando una acumulación de contaminación aguas abajo.

La disminución de la carga de demanda bioquímica de oxígeno en las microcuencas *Olarte*, *Hato Laguna* y *Pozos* a excepción de la zona baja de esta última, indica una reducción en la contaminación del agua, lo cual beneficia al Lago de Tota. Sin embargo los valores de DBO son mayores a los de oxígeno disuelto, lo cual provoca un riesgo para los organismos acuáticos y la calidad del agua de la cuenca. Por otra parte el aumento de la carga de demanda bioquímica de oxígeno en la zona baja de la microcuenca *pozos* sugiere un aumento en la contaminación por materia orgánica, a causa de posibles vertimientos.

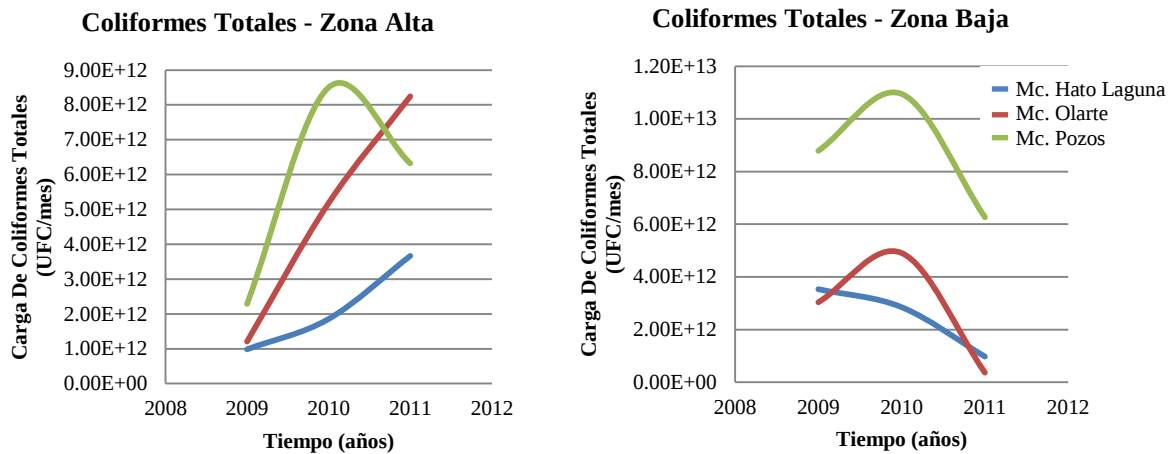


Gráfica 4. Carga de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

c) Carga de Coliformes Totales

La contaminación por coliformes totales se encuentra en aumento en la zona alta de las microcuencas como se puede percibir en la Gráfica 5. A diferencia la zona baja presenta una disminución en la carga de contaminación. Además se evidencia un aumento significativo de sustancias contaminantes en el año 2010. De igual manera se observa que las cargas contaminantes tienden a ser mayores en la zona alta, debido a una posible remoción aguas abajo de las microcuencas, exceptuando la microcuenca *Pozos*, la cual presenta valores mayores en la zona baja, señalando una concentración de contaminación aguas abajo. Con respecto al volumen de carga de coliformes totales, la microcuenca *Pozos* posee la mayor cantidad de esta y la microcuenca *Hato Laguna* la menor. La presencia de coliformes totales en el agua se ve asociada con la contaminación por excrementos o vertimientos de alcantarillas, y a su vez refleja la posible existencia de patógenos que pueden causar enfermedades. Por esta razón la zona alta está en una

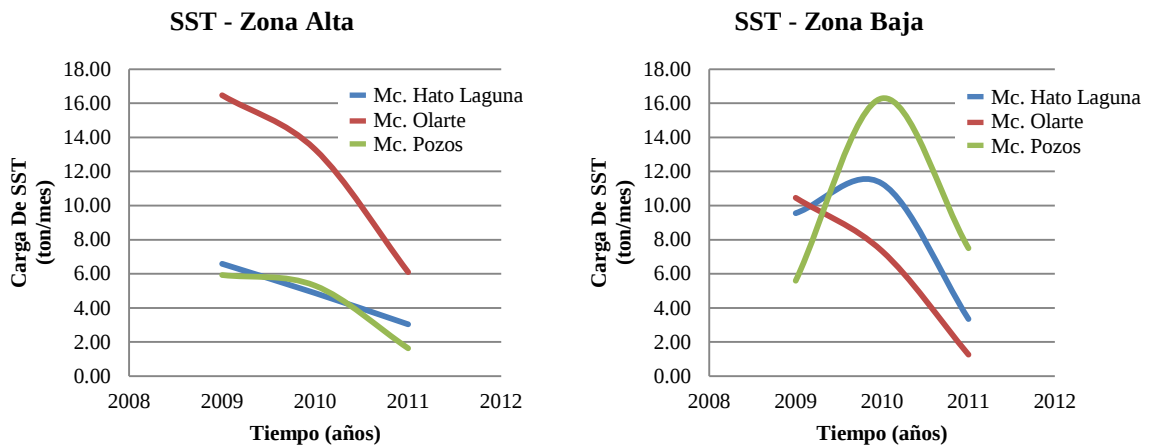
elevada amenaza en términos de salubridad, y de igual manera lo está la microcuenca *Pozos* en la zona baja.



Gráfica 5. Carga de coliformes totales.

d) Carga de Sólidos Suspendidos Totales

La Gráfica 6, muestra la disminución de las cargas de sólidos suspendidos totales en las zonas altas y bajas, en contraste la zona baja de la microcuenca *Pozos* traza un aumento de contaminación. A su vez en la zona baja de la microcuenca *Olarte* existe una reducción de la contaminación con respecto a los valores de la zona alta. Por el contrario los datos en las microcuencas *Hato Laguna* y *Pozos* son mayores en la zona baja, indicando una concentración de la contaminación aguas abajo. Por otra parte la zona alta de la microcuenca *Olarte* es la que posee mayor contaminación, al igual que la zona baja de la microcuenca *Pozos*. Los sólidos suspendidos pueden presentarse por materia orgánica o inorgánica, así como por existencia de microorganismos.



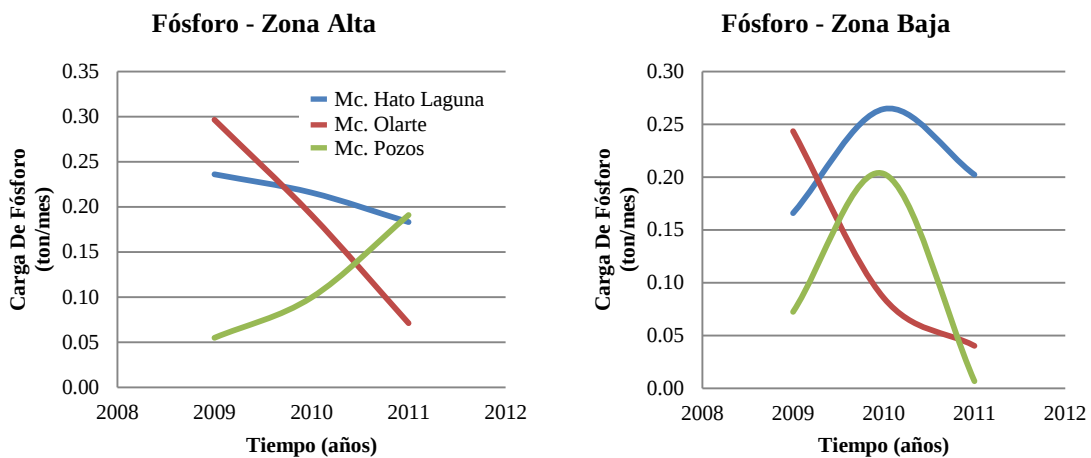
Gráfica 6. Carga de sólidos suspendidos totales.

e) Carga de Fósforo

Por último la carga de fósforo del agua presenta distintos comportamientos en las tres microcuencas como lo describe la Gráfica 7. La microcuenca *Olarte* presenta una disminución de la contaminación en el tiempo y hacia la zona baja de esta. La contaminación en la microcuenca *Hato Laguna* disminuye en el tiempo en la zona alta, no obstante en la zona baja aumenta. Se debe agregar que existe una mayor carga de fósforo en la zona baja de la microcuenca, donde se presentan los niveles más altos entre las tres microcuencas. Finalmente la microcuenca *Pozos* evidencia un aumento de la contaminación en el tiempo para zona alta y una disminución en la zona baja.

La existencia de altos contenidos de fósforo en el agua se debe principalmente a residuos de fertilizantes, esto conduce al crecimiento de algas en aguas superficiales, las cuales usan grandes cantidades de oxígeno e impiden el paso de los rayos del sol en el agua desencadenando el proceso de eutrofización, afirmando los resultados del índice de contaminación trófico. La eutrofización altera el ecosistema causando una reducción de la

biodiversidad, y aún peor puede llegar a causar una colmatación del Lago de Tota, la cual consiste en la acumulación de grandes depósitos de sedimentos o material orgánico que transforma el lago en pantano y posteriormente en bosque o pradera, aunque este proceso puede llevar siglos, es un riesgo ambiental muy alto.



Gráfica 7. Carga de fósforo.

En síntesis, la microcuenca con valores más altos de contaminación es la microcuenca *Pozos*, a pesar de que esta tenga los menores niveles de carga de sólidos suspendidos totales y posea valores bajos de fósforo en la zona baja. Además ésta evidencia un riesgo ambiental alto, ya que están en aumento la mayoría de las cargas contaminantes. La microcuenca *Olarte* presenta una contaminación relativamente baja en comparación con las demás microcuencas. No obstante presenta una alta contaminación de sólidos suspendidos en la zona alta. Sumado a lo anterior se observa que la mayor contaminación de la cuenca del Lago de Tota se presenta en la zona baja, esto es debido mayormente a la concentración de agentes contaminantes procedentes de aguas arriba de las microcuencas. Finalmente, se debe mencionar que así como existen zonas donde se presenta un aumento

de la contaminación, como es el caso de la carga de oxígeno disuelto en la zona baja de la microcuenca *Olarte* y la carga de fósforo en la zona alta de la microcuenca *Pozos*, también hay otras zonas donde no ocurre esto como en la carga de sólidos suspendidos totales de la microcuenca *Olarte* donde se evidencia una disminución de la contaminación con respecto al tiempo.

Es necesario agregar que este proyecto se enfocó principalmente en las cargas de contaminación a diferencia de los mencionados anteriormente en el capítulo de revisión bibliográfica, obtenido así un producto nuevo y una perspectiva diferente en cuanto a la modelación de la contaminación y su adecuación a la cuenca del Lago de Tota.

Resultados de la Modelación Dinámico

7.1.1. Tasas de Carga de Contaminación

Con el objetivo de evaluar y estimar los niveles de sustancias contaminantes en el agua de la cuenca del Lago de Tota se realizó la modelación dinámica de cargas de contaminación. Para iniciar con la modelación se calculan las tasas de carga de contaminación para los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales, sólidos suspendidos totales y fósforo. Esto es realizado en las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos*. De la modelación se excluye la carga de oxígeno disuelto, puesto que el comportamiento de este parámetro se ve altamente relacionado con las demás cargas, obteniendo así los mismos resultados.

Las tasas de carga obtenidas están consignadas en la Tabla 9. Estas permiten tener un valor de referencia para comenzar el proceso de la simulación de la contaminación en la cuenca del Lago de Tota. Aunque estos datos no sean los definitivos dejan ver el comportamiento de las cargas en términos de tiempo y recorrido de la zona alta a la zona baja de las microcuencas, ya que las tasas de carga de la zona alta relacionan valores históricos, y las tasas de carga de la zona baja relacionan los valores entre zonas altas y bajas.

Tabla 9. Tasas de carga calculadas.

<i>Carga</i>	<i>Microcuenca Hato Laguna</i>		<i>Microcuenca Olarte</i>		<i>Microcuenca Pozos</i>	
	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>
Oxígeno Disuelto	0.89	0.05	0.91	-0.53	1.20	-0.39
DBO ₅	0.74	0.90	0.50	0.05	0.88	1.83
Coliformes Totales	1.93	0.80	2.94	0.17	2.23	1.04
SST	0.68	0.62	0.63	-0.54	0.60	1.87
Fósforo	0.88	0.01	0.51	-0.39	1.86	0.13

7.1.2. Calibración y Validación del Modelo Dinámico

Con el cálculo inicial de las tasas de carga se procede a iniciar la simulación de las cargas de contaminación del agua. La simulación es realizada en primera instancia para los años 2009 a 2011, continuando con la validación de los datos obtenidos con respecto a los observados anteriormente en la sección de cargas de contaminación. La calibración es realizada de manera iterativa variando las tasas de carga e incluyendo la tasa de descarga, hasta que los datos modelados se adapten a las cargas históricas. Para efectuar una correcta comparación de los datos simulados versus los datos observados se hace uso de los coeficientes de correlación y R^2 .

El proceso de calibración y validación del modelo dinámico da como resultado las tasas de carga y descarga consignadas en la Tabla 10.

Tabla 10. Tasas de carga y descarga validadas.

<i>Carga</i>	<i>Microcuenca Hato Laguna</i>			<i>Microcuenca Olarte</i>			<i>Microcuenca Pozos</i>		
	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>	<i>Descarga</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>	<i>Descarga</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>	<i>Descarga</i>
Coliformes Totales	0.90	0.00	0.35	1.93	0.68	0.30	1.48	1.44	0.50
DBO ₅	0.45	0.90	1.10	0.00	0.42	1.00	0.76	0.93	0.34
Fósforo	0.00	0.14	0.15	0.00	0.39	1.10	0.86	0.13	0.30
SST	0.32	0.62	0.45	0.37	0.64	1.20	0.50	0.76	0.40

A continuación se muestran las cargas observadas y modeladas luego de la calibración y validación para los parámetros: coliformes totales, demanda bioquímica de oxígeno, fósforo y sólidos suspendidos totales, en las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos*.

a) Carga de Coliformes Totales

La modelación de la carga de coliformes totales da resultados muy satisfactorios en las microcuencas *Hato Laguna* y *Olarte*, exceptuando la zona baja de la microcuenca *Olarte*, donde se presenta una tendencia de los datos obtenidos contraria a la de los datos observados, esto es más fácil de evidenciar en la Gráfica 8. Debido a la alta similitud de estos datos se obtendrán proyecciones confiables y ajustadas a la realidad. Los valores más bajos de los coeficientes de correlación y R^2 consignados en la Tabla 12, se observan en la microcuenca *Pozos*, lo cual da como resultado una falencia del modelo en la proyección de los datos mencionados.

Tabla 11. Carga de coliformes totales observada y modelada en UFC/mes.

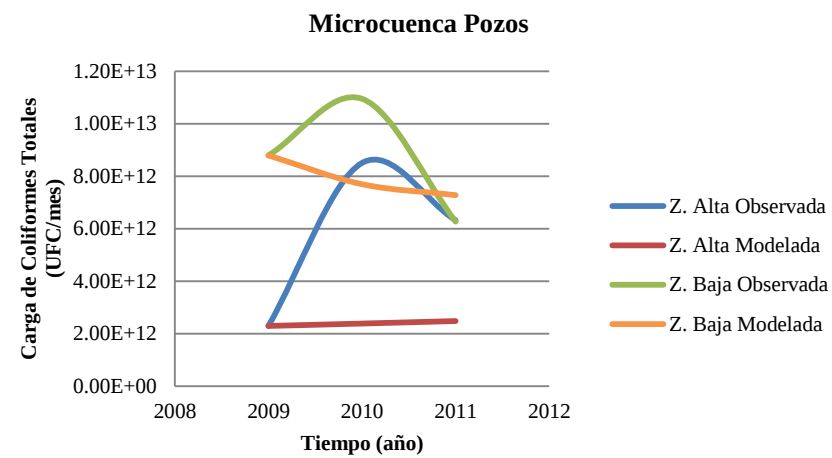
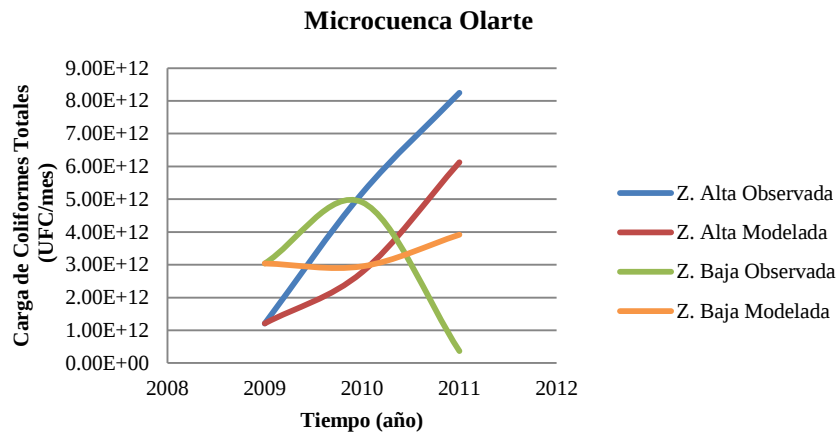
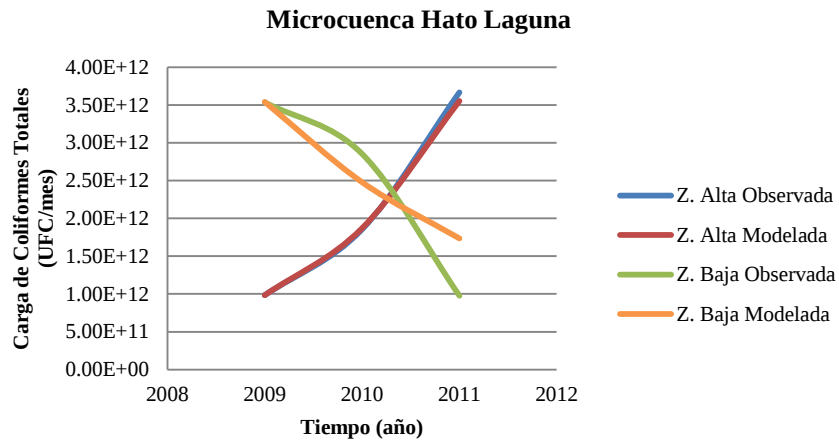
<i>Microcuenca Hato Laguna</i>						
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>			<i>Baja</i>		
<i>Año</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
<i>Observada</i>	9.84E+11	1.85E+12	3.67E+12	3.54E+12	2.85E+12	9.76E+11
<i>Modelada</i>	9.84E+11	1.87E+12	3.55E+12	3.54E+12	2.48E+12	1.73E+12

<i>Microcuenca Olarte</i>						
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>			<i>Baja</i>		
<i>Año</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
<i>Observada</i>	1.21E+12	5.18E+12	8.25E+12	3.04E+12	4.91E+12	3.67E+11
<i>Modelada</i>	1.21E+12	2.77E+12	6.13E+12	3.04E+12	2.95E+12	3.92E+12

<i>Microcuenca Pozos</i>						
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>			<i>Baja</i>		
<i>Año</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
<i>Observada</i>	2.29E+12	8.50E+12	6.32E+12	8.79E+12	1.09E+13	6.27E+12
<i>Modelada</i>	2.29E+12	2.38E+12	2.48E+12	8.79E+12	7.69E+12	7.28E+12

Tabla 12. Coeficientes de validación modelación de la carga de coliformes totales.

<i>Microcuenca Hato Laguna</i>			<i>Microcuenca Olarte</i>		<i>Microcuenca Pozos</i>	
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>
<i>Correlación</i>	1.00	0.93	0.96	-0.94	0.63	0.31
<i>R²</i>	1.00	0.87	0.92	0.89	0.40	0.10



Gráfica 8. Carga de coliformes totales observada y modelada.

b) Carga de Demanda Bioquímica de Oxígeno

Como se puede observar en la Tabla 13 y en la Tabla 14, los valores más acertados en la modelación de la demanda bioquímica de oxígeno se vuelven a presentar en las microcuencas *Hato Laguna* y *Olarte*, dando así una continuidad en el correcto desempeño del modelo dinámico de cargas de contaminación en estos casos. De igual manera la microcuenca *Pozos* posee nuevamente los valores menores de los coeficientes de validación, aunque en este caso solo son presentados en la zona alta, dando así una obtención acertada de proyecciones en la zona baja.

Tabla 13. Carga de DBO₅ observada y modelada en ton/mes.

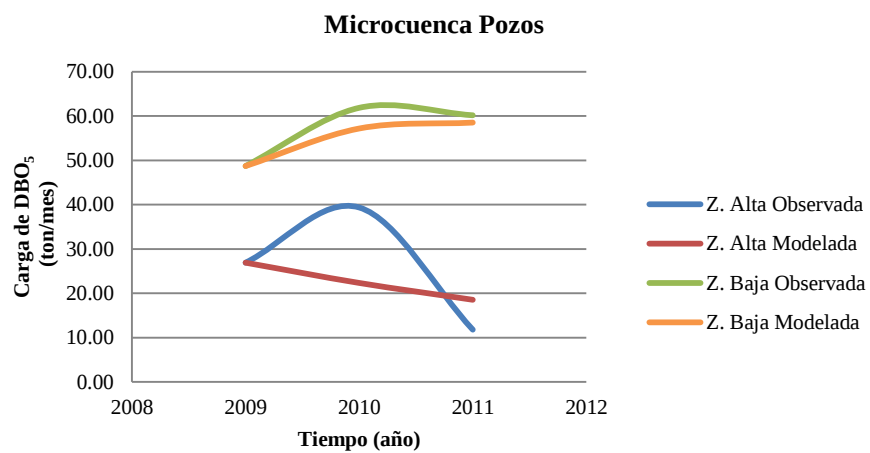
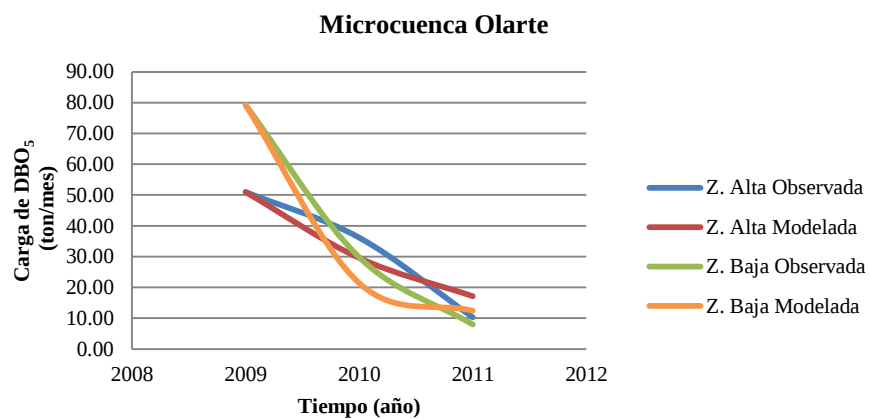
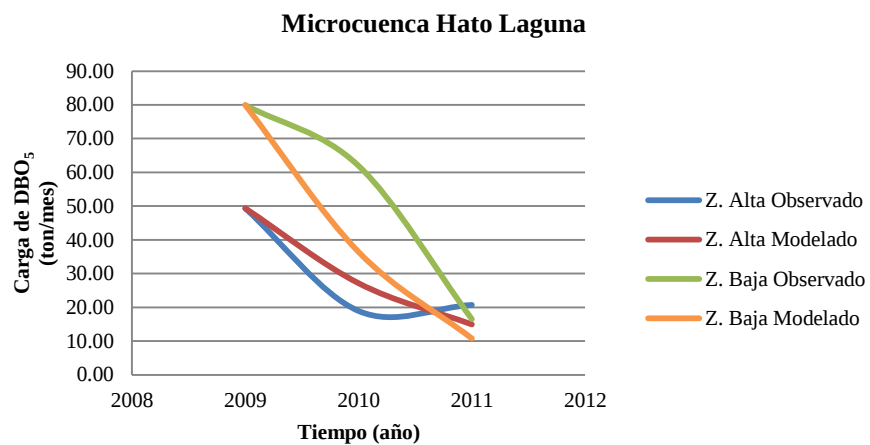
<i>Microcuenca Hato Laguna</i>						
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>			<i>Baja</i>		
<i>Año</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
<i>Observada</i>	49.34	18.91	20.70	79.94	61.92	16.50
<i>Modelada</i>	49.34	27.14	14.93	79.94	36.41	10.78

<i>Microcuenca Olarte</i>						
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>			<i>Baja</i>		
<i>Año</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
<i>Observada</i>	50.96	36.16	10.30	79.22	29.81	7.95
<i>Modelada</i>	50.96	29.56	17.14	79.22	21.40	12.41

<i>Microcuenca Pozos</i>						
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>			<i>Baja</i>		
<i>Año</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
<i>Observada</i>	26.91	39.36	11.81	48.71	61.84	60.16
<i>Modelada</i>	26.91	22.34	18.54	48.71	57.17	58.51

Tabla 14. Coeficientes de validación modelación de la carga de DBO₅.

<i>Microcuenca Hato Laguna</i>			<i>Microcuenca Olarte</i>		<i>Microcuenca Pozos</i>	
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>
<i>Correlación</i>	0.92	0.92	0.95	0.98	0.50	0.97
<i>R²</i>	0.84	0.85	0.91	0.97	0.25	0.94



Gráfica 9. Carga de DBO_5 observada y modelada.

c) Carga de Fósforo

En el caso de la modelación de la carga de fósforo se sigue la consecución de resultados acertados en las microcuencas *Hato Laguna* y *Olarte*, seguido de la zona alta de la microcuenca *Pozos*. Aunque los valores de la zona baja de la microcuenca *Hato Laguna* no son tan precisos como los de las anteriores modelaciones, se obtendrán proyecciones con una alta confiabilidad. Cabe destacar que una vez más la zona baja de la microcuenca *Pozos* evidencia valores bajos para la validación, siendo en este caso en específico los menores de todas las modelaciones.

Tabla 15. Carga de fósforo observada y modelada en ton/mes.

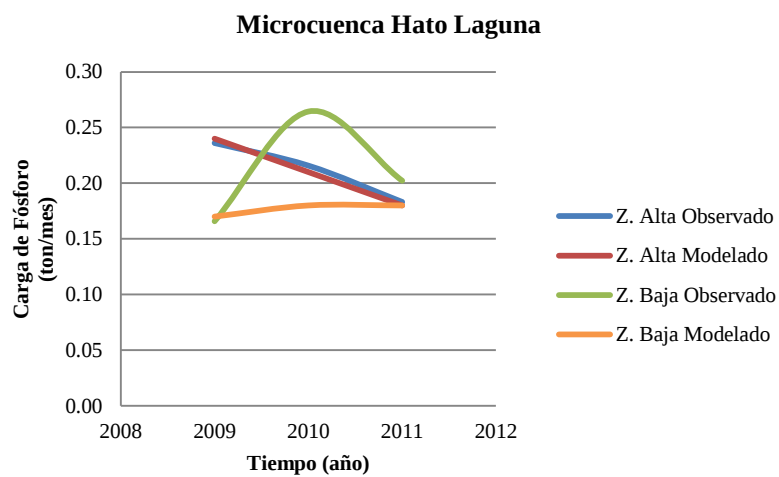
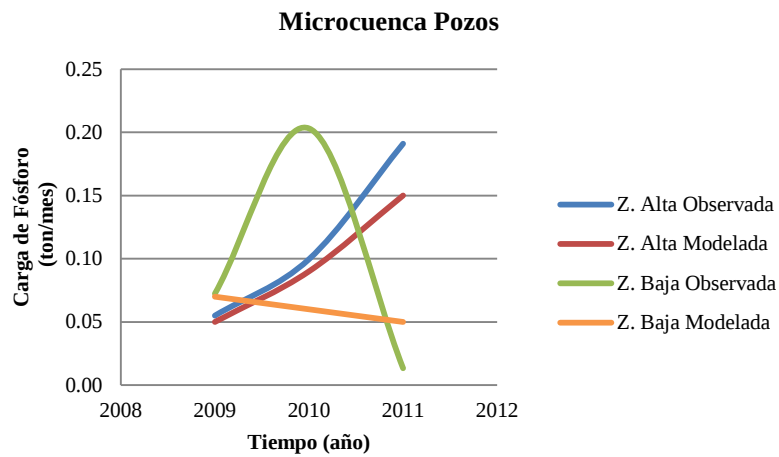
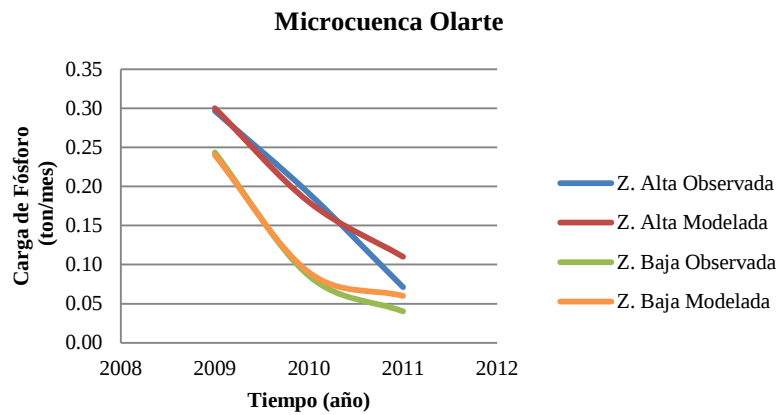
<i>Microcuenca Hato Laguna</i>						
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>			<i>Baja</i>		
<i>Año</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
<i>Observada</i>	0.24	0.22	0.18	0.17	0.26	0.20
<i>Modelada</i>	0.24	0.21	0.18	0.17	0.18	0.18

<i>Microcuenca Olarte</i>						
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>			<i>Baja</i>		
<i>Año</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
<i>Observada</i>	0.30	0.19	0.07	0.24	0.09	0.04
<i>Modelada</i>	0.30	0.18	0.11	0.24	0.09	0.06

<i>Pozos</i>						
<i>Zona</i>	<i>Alta</i>			<i>Baja</i>		
<i>Año</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
<i>Observada</i>	0.05	0.10	0.19	0.07	0.20	0.01
<i>Modelada</i>	0.05	0.09	0.15	0.07	0.06	0.05

Tabla 16. Coeficientes de validación modelación de la carga de Fósforo.

Microcuenca Hato Laguna			Microcuenca Olarte		Microcuenca Pozos	
Zona	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
Correlación	0.99	0.78	0.98	1.00	1.00	0.30
R²	0.98	0.61	0.97	1.00	0.99	0.09



Gráfica 10. Carga de fósforo observada y modelada.

d) Carga de Sólidos Suspendidos Totales

Siguiendo el comportamiento anteriormente presentado por el modelo dinámico de cargas de contaminación, la validación es correcta en la zona alta de la microcuenca *Pozos* y en ambas zonas de las microcuencas *Hato Laguna* y *Olarte*, fallando de nuevo la correlación de los datos en la zona baja de la microcuenca *Pozos*. Los mejores resultados obtenidos en la modelación de la carga de sólidos suspendidos totales es en las zonas alta de las microcuencas *Hato Laguna* y *Olarte*. El comportamiento de las cargas modeladas versus las observadas se puede visualizar claramente en la Gráfica 11.

Tabla 17. Carga de SST observada y modelada en ton/mes.

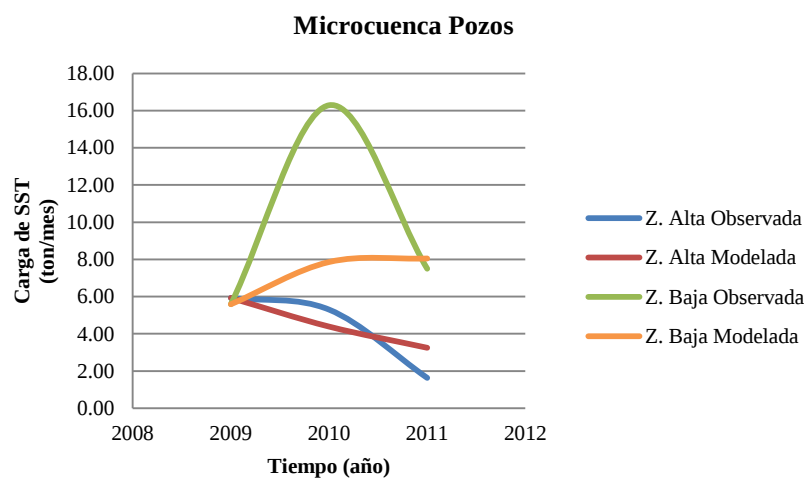
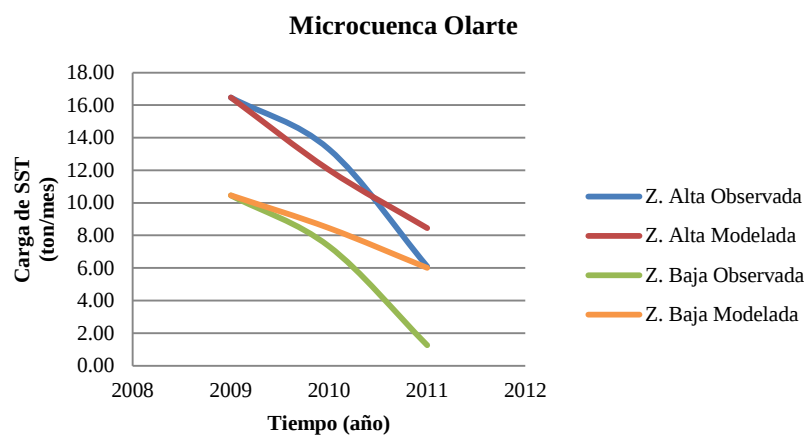
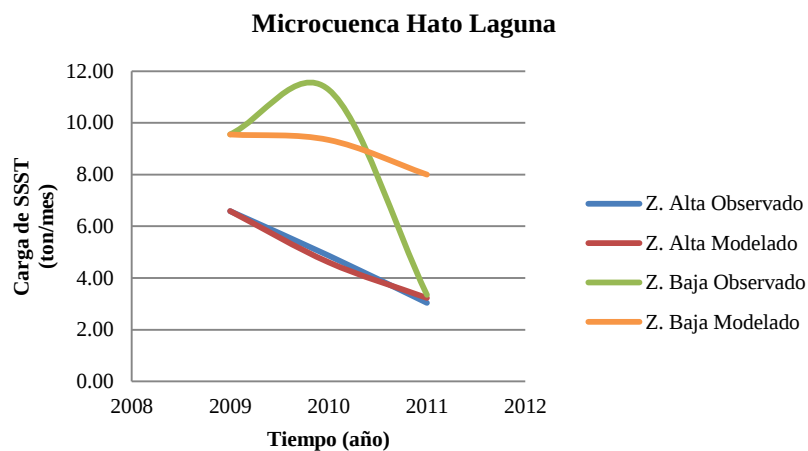
Microcuenca Hato Laguna						
Zona	Alta			Baja		
Año	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Observada	6.59	4.87	3.04	9.55	11.29	3.35
Modelada	6.59	4.61	3.23	9.55	9.34	8.00

Microcuenca Olarte						
Zona	Alta			Baja		
Año	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Observada	16.47	13.29	6.10	10.46	7.33	1.26
Modelada	16.47	12.02	8.45	10.46	8.45	6.01

Microcuenca Pozos						
Zona	Alta			Baja		
Año	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Observada	5.93	5.30	1.63	5.59	16.29	7.50
Modelada	5.93	4.39	3.25	5.59	7.86	8.05

Tabla 18. Coeficientes de validación modelación de la carga de SST.

		Microcuenca Hato Laguna		Microcuenca Olarte		Microcuenca Pozos	
Zona		Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
Correlación		0.99	0.94	0.96	0.99	0.89	0.58
R²		0.99	0.89	0.92	0.98	0.79	0.34



Gráfica 11. Carga de SST observada y modelada.

El modelo dinámico de cargas de contaminación tuvo un buen desempeño en general para el estudio actual. Las mejores simulaciones de carga se presentaron en las microcuencas *Hato Laguna* y *Olarte*, siendo ligeramente mejor en la zona alta. Por otro lado en la microcuenca *Pozos* no se obtuvieron buenos resultados. Las deficiencias en estas modelaciones pueden ser debidas a datos erróneos en los análisis fisicoquímicos, y a variables externas que aumentan o disminuyen la contaminación de los afluentes como es el caso de vertimientos de aguas residuales. Aún así la microcuenca *Pozos* tuvo buenas predicciones en la zona baja para la carga de demanda bioquímica de oxígeno y en zona alta para las cargas de sólidos suspendidos totales y de fósforo.

En cuanto al rendimiento del modelo dinámico frente a los diferentes parámetros de cargas de contaminación, los mejores resultados se obtuvieron en las cargas de sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno y fósforo, dejando a un lado la carga de coliformes totales, la cual presentó un valor atípico en la zona baja de la microcuenca *Olarte*, que presenta una tendencia contraria a la serie de datos históricos.

En conclusión se puede afirmar que el modelo dinámico de cargas de contaminación propuesto en este proyecto presentó una alta precisión en términos globales, dando un alto grado de confianza en las proyecciones que se mostrarán a continuación. Aún así se pueden esperar datos erróneos en las proyecciones de carga de coliformes totales en la zona baja de la microcuenca *Olarte*, y en las proyecciones de carga de coliformes totales y demanda bioquímica de oxígeno en la zona alta de la microcuenca *Pozos*, al igual de las cargas de fósforo y coliformes totales en la zona baja.

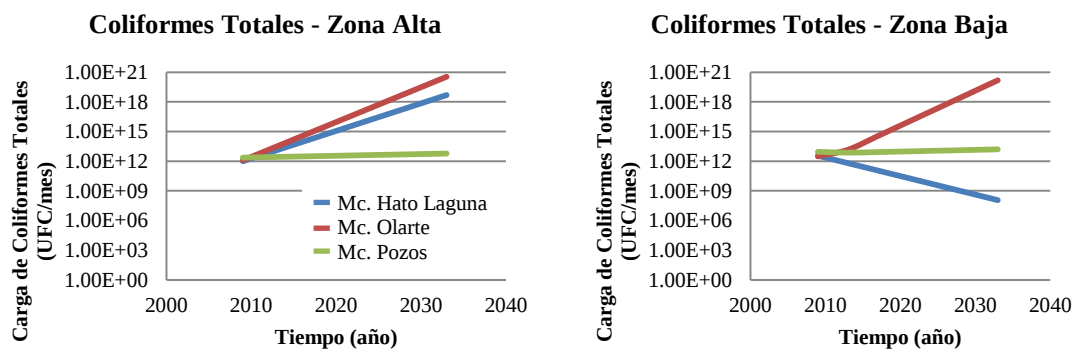
7.1.3. Resultados de la Modelación Dinámica

a) Carga de Coliformes Totales

La proyección de carga de coliformes totales permite observar la existencia de un gran aumento de la contaminación en la zona alta de las microcuencas *Hato Laguna* y *Olarte*, a diferencia de la microcuenca *Pozos* la cual mantiene valores relativamente constantes con un aumento poco significativo tanto en la zona alta como en la zona baja. Por otra parte la zona baja de la microcuenca *Hato Laguna* presenta una gran disminución de la carga de contaminación y la microcuenca *Olarte* evidencia un aumento, sin embargo esto es discutible ya que en la validación se obtuvo un coeficiente de correlación negativo, indicando una tendencia contraria a los datos observados, siendo así, la microcuenca *Olarte* debería presentar un comportamiento similar al de la microcuenca *Hato Laguna*.

Tabla 19. Carga proyectada de coliformes totales en UFC/mes.

	M. Hato Laguna		M. Olarte		M. Pozos	
Año	Zona Alta	Zona Baja	Zona Alta	Zona Baja	Zona Alta	Zona Baja
2009	9.84E+11	3.54E+12	1.21E+12	3.04E+12	2.29E+12	8.79E+12
2013	1.28E+13	6.32E+11	3.10E+13	1.42E+13	2.68E+12	7.31E+12
2017	1.67E+14	1.13E+11	7.95E+14	3.49E+14	3.13E+12	8.37E+12
2021	2.18E+15	2.01E+10	2.04E+16	8.94E+15	3.67E+12	9.78E+12
2025	2.84E+16	3.59E+09	5.22E+17	2.29E+17	4.29E+12	1.14E+13
2029	3.70E+17	6.42E+08	1.34E+19	5.87E+18	5.02E+12	1.34E+13
2033	4.82E+18	1.15E+08	3.43E+20	1.50E+20	5.87E+12	1.57E+13



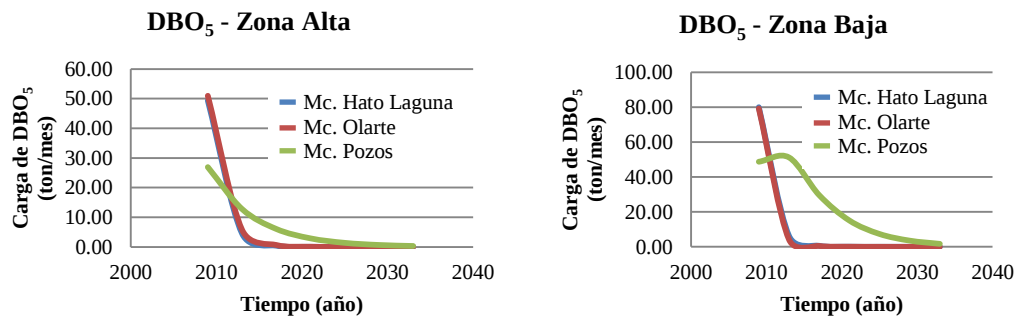
Gráfica 12. Carga proyectada de coliformes totales.

b) Carga de Demanda Bioquímica de Oxígeno

La carga de demanda bioquímica de oxígeno proyectada tiene valores muy similares en las microcuencas *Hato Laguna* y *Olarte*, tanto para la zona alta como para la zona baja; con respecto a la microcuenca *Pozos* los datos obtenidos de la simulación indican una reducción de la contaminación en general, aunque en la zona baja se produce un leve aumento en el año 2013, cabe recordar que la validación de la zona alta de la microcuenca *Pozos* no fue del todo precisa, generando así incertidumbre en la magnitud de los resultados evidenciados. De acuerdo a la Gráfica 13 la contaminación se reducirá en su totalidad en el año 2025 para la microcuenca *Hato Laguna* y en el año 2029 para la microcuenca *Olarte*, pero la microcuenca *Pozos* presentará valores mínimos en el año 2033.

Tabla 20. Carga proyectada de DBO₅ en ton/mes.

	M. Hato Laguna		M. Olarte		M. Pozos	
Año	Zona Alta	Zona Baja	Zona Alta	Zona Baja	Zona Alta	Zona Baja
2009	49.34	79.94	50.96	79.22	26.91	48.71
2013	4.51	6.25	5.77	4.18	12.77	51.17
2017	0.41	0.57	0.65	0.47	6.06	29.61
2021	0.04	0.05	0.07	0.05	2.88	15.06
2025	0.00	0.00	0.01	0.01	1.37	7.34
2029	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	3.52
2033	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	1.68



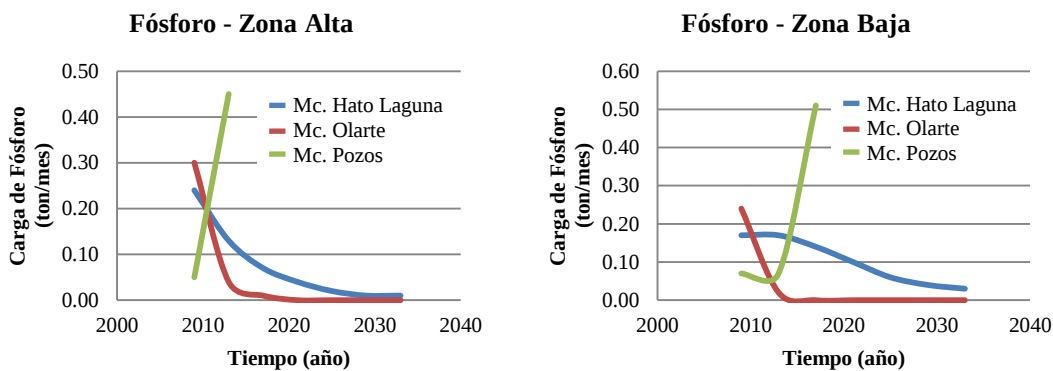
Gráfica 13. Carga proyectada de DBO₅.

c) Carga de Fósforo

A primera vista de la proyección de carga de fósforo se destaca la microcuenca *Pozos*, presentado valores que aumentan rápidamente, siendo tales que no se graficaron la totalidad de los presentados en la Tabla 21. Esto indica un peligro de contaminación inminente, aunque la calibración de la zona baja no se logró adecuadamente, la de la zona alta si lo fue. Simultáneamente las microcuencas *Olarte* y *Hato Laguna* evidencian una disminución de la contaminación, siendo la microcuenca *Olarte* la que llega a valores nulos en el año 2017. La reducción de la contaminación se ve más pausada en la zona baja de la microcuenca *Hato Laguna* en comparación con la zona alta de esta y con la microcuenca *Olarte*.

Tabla 21. Carga proyectada de fósforo en ton/mes.

	<i>M. Hato Laguna</i>		<i>M. Olarte</i>		<i>M. Pozos</i>	
<i>Año</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>
2009	0.24	0.17	0.30	0.24	0.05	0.07
2013	0.13	0.17	0.04	0.02	0.45	0.07
2017	0.07	0.14	0.01	0.00	4.01	0.51
2021	0.04	0.10	0.00	0.00	35.94	4.54
2025	0.02	0.06	0.00	0.00	321.89	40.63
2029	0.01	0.04	0.00	0.00	2883.31	363.91
2033	0.01	0.03	0.00	0.00	25827.15	3259.74



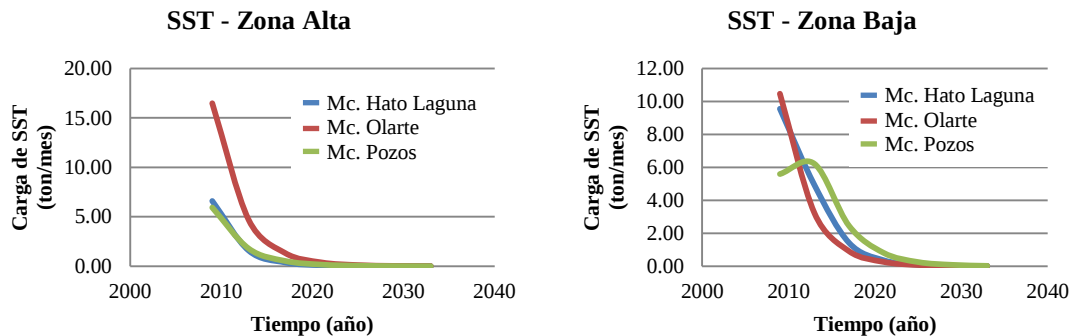
Gráfica 14. Carga proyectada de fósforo.

d) Carga de Sólidos Suspendidos Totales

La modelación de la carga de sólidos suspendidos totales fue la que obtuvo los mejores resultados en la calibración y validación del modelo dinámico (exceptuando la zona baja de la microcuenca Pozos), esto encamina a proyecciones correctas de la contaminación del agua. Se observa una disminución de la contaminación en las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte*, y *Pozos* llegando a valores cercanos a cero en el año 2033. Aunque esto indica que se va a llegar un punto en el que ya no exista contaminación por sólidos suspendidos sin tomar ninguna medida, no es totalmente seguro que sea así, ya que debido al aumento de población y turismo en el Lago de Tota, estos valores podrían cambiar drásticamente de forma inesperada.

Tabla 22. Carga proyectada de SST en ton/mes.

	<i>M. Hato Laguna</i>		<i>M. Olarte</i>		<i>M. Pozos</i>	
<i>Año</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>	<i>Zona Alta</i>	<i>Zona Baja</i>
2009	6.59	9.55	16.47	10.46	5.93	5.59
2013	1.58	4.92	4.68	3.22	1.78	6.21
2017	0.38	1.42	1.33	0.91	0.53	2.45
2021	0.09	0.36	0.38	0.26	0.16	0.81
2025	0.02	0.09	0.11	0.07	0.05	0.25
2029	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.08
2033	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02



Gráfica 15. Carga proyectada de SST.

Teniendo una perspectiva global de las proyecciones de contaminación realizadas en las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y *Pozos*, se puede concluir que las cargas de demanda bioquímica de oxígeno y de sólidos suspendidos totales no representan una amenaza para la cuenca del Lago de Tota. Así mismo la carga de fósforo presenta una disminución de la contaminación para las microcuencas de *Olarte* y *Hato Laguna*, siendo esta última de manera más lenta, aún así la microcuenca *Pozos* muestra unos niveles que se incrementan drásticamente causando así un peligro inminente para el ecosistema. La carga de coliformes totales especialmente en la zona alta de las microcuencas *Olarte* y *Hato Laguna* también representa una gran amenaza de contaminación a la cuenca del Lago de Tota, aunque la microcuenca *Pozos* presenta niveles con un aumento relativamente bajo, de igual manera hay riesgo de llegar a un punto de contaminación irreversible.

8. CONCLUSIONES

Los índices de contaminación del agua ICOMO, ICOSUS, e ICOTRO, permitieron observar el estado general de contaminación de la cuenca del Lago de Tota, siendo estos, valores medios de contaminación por materia orgánica, nivel bajo de contaminación por sólidos suspendidos totales y un nivel de eutrofización producido por el contenido de fósforo en el agua.

La zona que presentó la mayor contaminación por materia orgánica y fósforo es la quebrada *Mugre* seguida de la microcuenca *Pozos*, al igual que las desembocaduras al Lago de Tota de las microcuencas *Tobal*, *Hato Laguna* y *Olarte*.

Se observó que la contaminación del agua se acumula en las zonas bajas y en las desembocaduras de las microcuencas y cauces de la cuenca del Lago de Tota, debiéndose a la concentración de sustancias contaminantes que provienen de la zona alta.

Los puntos de muestreo ubicados en el perímetro del Lago de Tota presentaron bajos índices de contaminación, a causa de que las concentraciones de los contaminantes bajan al llegar a un gran volumen de agua, como es en este caso el lago.

De acuerdo a la caracterización de la contaminación, se encontró que la concentración por sólidos suspendidos totales es baja en toda la cuenca del Lago de Tota.

La quebrada *Mugre* es la zona más contaminada de la cuenca del Lago de Tota, por esto se hace necesario un estudio minucioso enfocado a esta corriente.

La microcuenca *Olarte* presentó el mayor aporte de caudal a la cuenca del Lago de Tota, seguida de la microcuenca *Hato Laguna*, siendo así la microcuenca *Pozos* la que menor caudal presentó.

Las microcuencas *Olarte* y *Pozos* evidenciaron un caudal mayor en la zona baja y la microcuenca *Hato Laguna* en la zona alta.

La temporada de baja pluviosidad de Colombia en los meses de Julio a Agosto genera un aumento en la contaminación del agua, considerando el incremento en las concentraciones de sustancias contaminantes por un menor volumen de agua.

Existe un riesgo para los organismos acuáticos y la calidad del agua de la cuenca del Lago de Tota, por la ausencia de oxígeno disuelto suficiente para lograr cumplir la demanda de bioquímica de oxígeno generada por microorganismos patógenos.

En términos de carga de contaminación la zona baja se vio más contaminada que la zona alta, en especial la microcuenca *Pozos*. En contraste la microcuenca *Olarte* presentó la menor contaminación de la zona baja en la cuenca del Lago de Tota.

El modelo dinámico de cargas de contaminación mostró un notable rendimiento con solo unas escasas falencias para el caso de la microcuenca *Pozos*, exponiendo las mejores simulaciones en las microcuencas *Olarte* y *Hato Laguna*, y en la modelación de la carga de sólidos suspendidos totales.

Se consiguió diagnosticar que si no se realiza un cambio significativo en la contaminación por fósforo, se puede producir una colmatación de sedimentos del Lago de Tota, perdiendo así un gran recurso hídrico.

De acuerdo a las proyecciones realizadas, las cargas de demanda bioquímica de oxígeno y de sólidos suspendidos totales no representan amenaza de contaminación de la cuenca del Lago de Tota.

Existe amenaza inminente de contaminación por la carga de fósforo en la microcuenca *Pozos*. De igual manera la carga de coliformes totales reveló un aumento significativo en la zona alta de las microcuencas *Olarte* y *Hato Laguna*, esto genera un peligro para la salubridad del sector.

Se diagnosticó que la mayor actividad contaminante en la cuenca del Lago de Tota es la agricultura, proporcionando altos niveles de fósforo generados por el uso de fertilizantes.

Los datos recolectados de los análisis fisicoquímicos del agua tomados por la Corporación Autónoma de Boyacá poseían información faltante y en ocasiones anormal, así como cálculos poco confiables de índices de calidad del agua.

La información de caudales recolectada se encontró completa en cuanto a las mediciones en las desembocaduras de las diferentes microcuencas, sin embargo los caudales para las zonas altas solo fueron medidos para el año 2013.

Las falencias originadas en las simulaciones de la calibración y validación del modelo dinámico de cargas de contaminación son ocasionadas por cambios abruptos de los datos

observados, esto pudo ser por datos erróneos de los análisis fisicoquímicos o por factores externos de aumento a contaminación (vertimientos de desechos).

9. RECOMENDACIONES

Solución a la Contaminación

De acuerdo al índice de contaminación trófico hay un nivel de eutrofización preocupante en la cuenca del Lago de Tota. Para reducir estos niveles de fósforo es necesario estudiar a fondo el proceso de cultivo, ya que el uso de fertilizantes aumenta drásticamente el contenido de fósforo en el agua.

La materia orgánica es un tema a tratar debido a sus altos niveles en las desembocaduras de las microcuencas, y aún más en la quebrada *Mugre* la cual presenta los niveles más altos de contaminación por materia orgánica. La mitigación de esta amenaza es implementando controles sobre posibles vertimientos de aguas residuales y desechos en las corrientes superficiales.

En cuanto a los resultados de las proyecciones del modelo dinámico de cargas de contaminación, hay que prestar especial atención a la carga de fósforo en la microcuenca *Pozos*, ya que partiendo del hecho de que la cuenca del Lago de Tota está en un nivel general de eutrofización, esta situación podría empeorar gravemente. Por ello es necesario realizar visitas de campo y generar restricciones al uso de fertilizantes para el cultivo en esta zona.

Para el control del aumento de carga de coliformes totales, los cuales se originan por presencia de materia orgánica, habría que implementar un nuevo estudio enfocado al aumento de la contaminación en las zonas altas de las microcuencas *Hato Laguna* y

Olarte, buscando cuales son las causas específicas de los aumentos excesivos de sustancias contaminantes en estas zonas.

Recomendaciones en la Modelación

Para tener más datos en la simulación de las cargas de contaminación y así reducir la incertidumbre ocasionada por cambios abruptos de los datos obtenidos en este estudio, se recomienda realizar la modelación de cargas de contaminación incluyendo nuevos análisis fisicoquímicos del agua de la cuenca del Lago de Tota.

Se propone realizar visitas de campo para el reconocimiento de las causas de contaminaciones por materia orgánica en las microcuencas *Hato Laguna*, *Olarte* y en la quebrada *Mugre*.

Se requiere la realización de un estudio minucioso enfocado a la quebrada *Mugre*, en vista de que es la zona más contaminada de la cuenca del Lago de Tota, con el fin de conocer la principal razón de esto y así adoptar las medidas necesarias para la conservación de este importante recurso hídrico.

Para controlar y prevenir daños ambientales que no se puedan remediar en un futuro, se recomienda formalizar un seguimiento a la evolución de los niveles de cargas de contaminación.

La formulación de proyectos de educación para la comunidad donde se explique el uso adecuado de fertilizantes, puede ayudar a reducir los procesos de eutrofización del agua de la cuenca del Lago de Tota.

Se recomienda la elaboración de proyectos por parte de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomas de Aquino seccional Tunja enfocados en la disposición adecuada de aguas residuales domésticas de la comunidad de la cuenca del Lago de Tota.

10. GLOSARIO

Afluente: Corriente secundaria de agua superficial que desemboca en un río principal y no en un gran cuerpo de agua.

Aguas Abajo: Sección de un flujo de agua que se encuentra a partir de un punto de análisis determinado en la misma dirección del flujo.

Aguas Arriba: Sección de un flujo de agua que se encuentra a partir de un punto de análisis determinado contraria a la dirección del flujo.

Análisis de Flujo de Materiales: Representación de las entradas, salidas, componentes y procedimientos de un sistema determinado en un límite espacial y temporal.

Análisis Fisicoquímico: Estudio realizado a una muestra de agua para determinar las características organolépticas y niveles de pH, conductividad, oxígeno disuelto, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, aluminio y dureza total.

Calibración: Proceso por el cual se realiza un sin número de simulaciones de un modelo determinado, buscando la obtención de resultados lo suficientemente creíbles, basándose en bibliografía, estudios previos o datos previamente medidos.

Carga de contaminación: Cantidad de masa total de sustancias contaminantes transportadas por un cuerpo de agua en un determinado tiempo.

Caudal: Cantidad de agua que fluye por un medio establecido en un determinado periodo de tiempo.

Coeficiente de Correlación: Indica el grado de relación que comparten dos variables o series de datos, sus valores se encuentran entre 1 y -1, siendo 1 una correlación de datos perfecta, 0 no posee ninguna relación y -1 correlación perfecta pero con tendencia contraria.

Coeficiente R^2 : También llamado coeficiente de determinación, es usado para medir la bondad de ajuste de un modelo o regresión, teniendo como valor perfecto 1 y valor deficiente 0.

Coliformes Totales: Amplio conjunto de bacterias presentes en el medioambiente que indican de contaminación biológica.

Colmatación: Desarrollo de sedimentación de partículas sólidas en un cuerpo de agua, ocasionando la pérdida de capacidad del lago, laguna o represa.

Concentración: Relación del peso de una sustancia o elemento entre el volumen de líquido que lo contiene.

Contaminación: Riesgo generado por la presencia de sustancias físicas, químicas, o biológicas perjudiciales para el medioambiente.

Cuenca: En el campo de la hidrología, se define como la zona drenada por un único sistema de drenaje natural.

Datos Observados: Conjunto de valores medidos in situ o calculados de acuerdo a pruebas realizadas en un ambiente real.

Datos Simulados o Modelados: Conjunto de valores resultantes luego de un procesamiento de datos “modelación”, a partir de unas variables iniciales.

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno; cantidad de oxígeno necesario para suplir la necesidad de microorganismos en un periodo y tiempo determinados.

Desembocadura: Parte más baja de un río, donde descarga su volumen de agua en otra corriente o cuerpo de agua.

Escorrentía: Flujo superficial de agua sobre un terreno.

Eutrofización: Nivel de contaminación por exceso de nutrientes (nitratos y fósforo) en un ecosistema, produciendo una disminución de oxígeno por la descomposición de la materia orgánica.

Fósforo: Nutriente esencial para la vida, pero en cuerpos de aguas es un parámetro crítico de contaminación.

ICA: Índice de calidad del agua; se relacionan parámetros como oxígeno disuelto, para determinar el nivel de calidad del agua.

ICOMO: Índice que mide el nivel de contaminación por la presencia de materia orgánica, relacionando los parámetros de DBO, Coliformes Totales y Oxígeno Disuelto.

ICOSUS: Índice que mide el nivel de contaminación por la presencia de sólidos suspendidos.

ICOTRO: Índice de contaminación trófico, el cual mide el nivel de contaminación por la presencia de fósforo.

Lago: Cuerpo de agua comúnmente dulce con un tamaño considerablemente grande.

Materia Inorgánica: Sustancia que no tiene ningún tipo de vida.

Materia Orgánica: Sustancias compuesta por diferentes microorganismos.

Microcuenca: Pequeña cuenca que hace parte de una de mayor tamaño.

Microorganismos: Seres vivos de tamaño microscópico.

Modelación Dinámica: Uso de sistemas matemáticos que ayudan a realizar proyecciones de variables.

Modelación Estática: Uso de

Modelación: Conjugación de variables para representar un evento real.

Oxígeno Disuelto: Parámetro que mide la presencia de oxígeno en una muestra de agua.

Patógenos: Agente que puede llegar a producir enfermedades.

Pluviosidad: Cantidad de agua que recibe un área en un tiempo determinado.

Precipitación: Cantidad de agua que cae en una superficie.

Proyección: Posibles valores de una variable a futuro producto de una previa modelación o regresión de datos.

Serie Histórica: Conjunto de datos de una misma variable por un tiempo determinado.

Sistemas Dinámicos: Conjunto de ecuaciones diferenciales con parámetros variables en el tiempo que buscan simular los procesos que ocurren en un escenario específico.

SST: Proporción de sólidos suspendidos totales presentes en una muestra de agua.

Tendencia: Comportamiento de valores de una misma variable en tiempos diferentes.

Validación: Comprobación de la similitud entre los valores reales y los estimados.

Vertimientos: Agua residuales vertidas provenientes del uso industrial, comercial o doméstico.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORPOBOYACA. (2009). Reglamentación del uso del recurso hídrico en las microcuencas de los pozos, hatolaguna, olarte y tobal, afluentes del lago de tota y motores eléctricos y/o otros combustibles que deriven agua del Lago de Tota.

Economico, Ministerio De Desarrollo. (2000). *Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico RAS - 2000*. Bogotá D.C.

Ford, Andrew. (2009). *Modelling The Enviroment*.

Gerald Sehlke, Jake Jacobson. (2005). System Dynamics Modeling of Tranboundary Systems: The Bear Basin Model. *Ground Water*, 43, 722-730.

Ivan Luiz Zilli Bacic, David G. Rossiter, Christiaan Mathias Mannaerts. (2008). Applicability of a distributed watershed pollution model in a data-poor environment in Santa Catarina State, Brazil. *R. Bra. Ci. Solo*, 32, 1699-1712.

Javier A. Molina A., Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. (2013). Lago de Tota.

José L. J. Ledesma, Stephan J. Kohler, Martyn N. Futter. (2012). Long-term dynamics of dissolved organic carbon: Implications for drinking water supply. *Science of the Total Environment*, 432, 1-11.

Lucy O'Shea, Andrew Wade. (2009). Controlling nitrate pollution: An integrated approach. *Land Use Policy*, 26, 799-808.

M. B. McGechan, D. R. Lewis, A. J. A. Vinten. (2008). A river water pollution model for assessment of best management practices for livestock farming. *Biosystems Engineering*, 99, 292-303.

Mazatlan, Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de. Distribución de Agua en el Planeta, from <http://jumapam.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta/>

N. Keshta, A. Elshorbagy, S. Carey. (2009). A generic system dynamics model for simulating and evaluating the hydrological performance of reconstructed watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 865-881.

Nelson Josue Fernandez Parada, Fredy Solano Ortega. Índices de Calidad y de Contaminación del Agua *Índices de Calidad y de Contaminación del Agua*: Universidad de Pamplona.

O. Naughton, P. D. Hynds. (2013). Public awareness, behaviours and attitudes towards domestic wastewater treatment systems in the Republic of Ireland. *Journal of Hydrology*.

Tracy J. Baker, Scott N. Miller. (2013). Using the Soil And Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*, 486, 100-111.

Ven Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays. (1994). *Hidrología Aplicada*.

Yamen M. Hoque, Shivan Tripathi, Mohamed M. Hantush, Rao S. Govindaraju. (2012). Watershed reliability, resilience and vulnerability analysis under uncertainty using water quality data. *Journal of Environmental Management*, 109, 101-112.

Z. Y. Shen, L. Chen, Q. Liao, R. M. Liu, Q. Huang. (2013). A comprehensive study of the effect of GIS data on Hydrology and non-point source pollution modeling. *Agricultural Water Management*, 118, 93-102.

12. ANEXOS

El disco anexo incluye el material correspondiente a las hojas de cálculo usadas, y las modelaciones realizadas en el software STELLA™.