

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR CARGAS DIFUSAS EN UN ÁREA DE ESTUDIO CON INFORMACIÓN ESCASA

Autoras: Laura Katherine Ortigoza Rojas; Luisa Fernanda Barrero Chimbi

Instituciones: Universidad de la Salle (Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria) y Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

Resumen

La evaluación y regulación del estado de los cuerpos hídricos en Colombia es limitada y poco aproximada a la realidad debido a la exclusión total de la contaminación por cargas difusas, las cuales son una fuente importante de contaminación en los recursos hídricos. Por tal motivo, este trabajo de investigación tiene por objeto establecer un modelo para la estimación de la contaminación por cargas difusas que se ajuste a las condiciones del país, como lo son la información escasa y de difícil acceso. Se realiza la selección del modelo por medio de una técnica que usa criterios múltiples mediante la construcción de un modelo jerárquico que permite encontrar la mejor alternativa entre once modelos (alternativas). Se obtiene el modelo PLOAD como el más apropiado para la estimación de la contaminación de cargas difusas de SST en la microcuenca El Valle en Villapinzón, Cundinamarca. Se generaron seis escenarios, los cuales se consideraron modelos agregados y semidistribuidos que evaluaron diferentes condiciones de precipitación, porcentaje de impermeabilidad y relación de precipitación que genera escorrentía. Se comprobó la existencia de cargas difusas para SST en la microcuenca para los distintos escenarios, en donde se obtuvieron mayores valores de carga para las simulaciones de tipo agregado. El porcentaje de error del cálculo de la carga difusa del modelo PLOAD fue menor al cinco por ciento.

Palabras clave: *Cargas difusas, modelo, PLOAD, Sólidos suspendidos totales (SST), Pre-validación.*

El desarrollo económico y social de una región está determinado en gran medida por la disponibilidad y calidad del recurso hídrico; dicho desarrollo involucra constantemente la modificación de las condiciones naturales de las cuencas¹ con la introducción de prácticas

¹ **Cuenca hidrográfica:** El Decreto 1640 del 2012 define cuenca hidrográfica como “área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar”. Es una porción de terreno delimitado geográficamente por divisorias de aguas, que corresponden a las cimas de las colinas o las montañas que rodean los terrenos y sus componentes coluviales-aluviales, ladera abajo (Núñez, 2001), siendo un sistema integrado por varias subcuencas o microcuencas.

industriales, agropecuarias y mineras, entre otras (Haupt, 2009), actividades que de no ser controladas y reguladas pueden llegar a generar el deterioro de la calidad del recurso hídrico. Por tal razón, el país adopta estrategias administrativas, como la gestión ambiental para la protección y preservación de los recursos naturales; reducción, restauración y mitigación de los impactos y efectos generados por actividades económicas y sociales sobre estos (Velásquez Rodríguez, 2011).

A pesar de la implementación de las estrategias administrativas, la evaluación y regulación de la calidad del recurso hídrico (la cual es llevada a cabo por medio de indicadores como el IACAL²) se ha visto limitada por el desconocimiento de los distintos tipos de contaminación que pueden llegar a generar afectaciones como lo son las cargas difusas (definidas como cargas contaminantes³ que son transportadas a un cuerpo de agua receptor proveniente de fuentes que no tienen un punto único de origen o una salida puntual específica) (Ideam, 2014). Estados Unidos calcula que aproximadamente el 50 % de la contaminación que se genera en una cuenca es proveniente de las fuentes difusas, donde la contaminación se atribuye en su mayoría a las actividades agrícolas con un 72 % de la contaminación total (Silva, 2003). La estimación de cargas difusas no se ha desarrollado adecuadamente en Colombia por su alta complejidad de identificación e insuficiencia de información sobre características fisicoquímicas e hidrodinámicas de las cuencas colombianas, siendo una evaluación poco aproximada a la realidad.

Entendiendo la magnitud que puede llegar a tener este tipo de contaminación en el país, entidades como la CAR buscan evaluar el efecto y el método de cálculo de las cargas difusas que más se adapten a las condiciones de las cuencas colombianas. Por tal motivo, este trabajo de investigación pretende establecer un modelo versátil, adaptable y de fácil aplicación para la estimación de la contaminación de cargas difusas por escorrentía⁴ en un área de estudio con información escasa, siendo una primera aproximación a este tipo de investigaciones.

En la figura 1 se muestra el área de estudio microcuenca El Valle en Villapinzón, Cundinamarca, la cual fue escogida por presentar estas características: 1. Estar dentro de la jurisdicción de la CAR. 2. Presentar actividades agropecuarias, dado que estas son una de las fuentes importantes de generación de la contaminación por cargas difusas. 3. Tener estaciones hidrometeorológicas (pluviométricas e limnimétricas) para el cálculo de las variables requeridas por el modelo PLOAD y para la realización de la calibración manual.

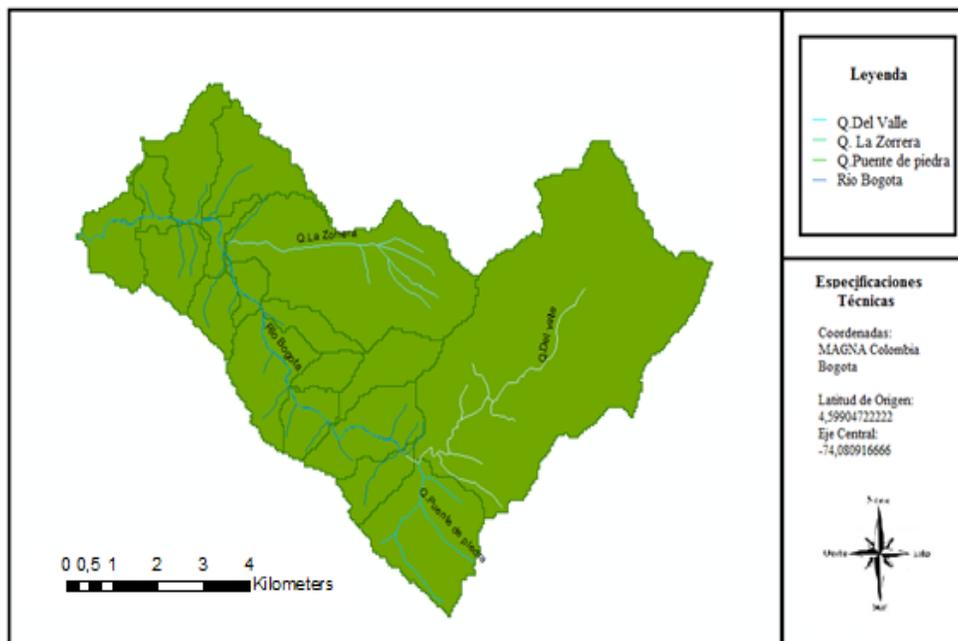
² **Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua (IACAL):** Es el índice que permite establecer la afectación potencial, la cual se refiere a la posibilidad de generar un grado de alteración debido a una presión ambiental. Tiene en cuenta cinco estimaciones: [1] La DBO₅, [2] La diferencia entre la DQO y la DBO₅, [3] Los sólidos suspendidos totales (SST), [4]. El Nitrógeno total (NT)), y [5] El fósforo total (PT), las cuales, junto con la oferta hídrica que es tomada durante un año, darán la razón existente entre la carga de contaminante de cada parámetro que es obtenida en una subzona hidrográfica en un periodo de tiempo. (Orjuela *et al.*, 2010).

³ **Carga contaminante:** Es el resultado de multiplicar el caudal promedio por la concentración de una sustancia, elemento o parámetro contaminante por el factor de conversión de unidades y por el tiempo diario de vertimiento del usuario. (Decreto 2667/2012).

⁴ **Escorrentía:** Es la cantidad de agua lluvia que excede la capacidad de infiltración del suelo. Si la lluvia caída supera esa capacidad, el exceso escurre hacia arroyos, quebradas, ríos, lagos y océanos (Núñez, 2001).

El área de estudio está localizada en el departamento de Cundinamarca en el sector nororiental del municipio de Villapinzón hace parte del área hidrográfica del Magdalena-Cauca, zona hidrográfica alto Magdalena y la subzona hidrográfica la cuenca del Río Alto Bogotá. Esta cuenta con temperatura media de 12 °C y humedad relativa del 86,6 %. El área total de la microcuenca es de 23,62 km² y su cauce principal tiene 10,2 km de longitud. La parte alta se encuentra sobre la cota⁵ 3.200 m s. n. m. y la parte baja en su desembocadura sobre la cota 2.800 m s. n. m., piso bioclimático paramuno, zona de transición entre el bosque andino y el páramo. El cauce principal es el río Bogotá, que inicia en la quebrada del Valle y cuenta como cauces principales tributarios las quebradas La Zorrera y Puente de Piedra.

Figura 1. Microcuenca El Valle de Río Alto Bogotá



Fuente: Elaboración propia, con base en Modelo Digital de Elevación.

La investigación es de tipo exploratorio, ya que busca identificar posibles modelos que permitan calcular cargas difusas con información escasa en función de las características propias del área de estudio, siendo una primera aproximación. Para el desarrollo del proyecto se establecieron cuatro fases.

En la primera fase de la metodología, denominada *preselección de alternativas*, se muestra una visión general de distintos modelos⁶, como SWAT, AGNPS, PLOAD, HSPF,

⁵ **Cota:** Distancia vertical que indica la altura de un punto sobre el nivel del mar. También llamada elevación. (Leyton, 2016).

⁶ **Modelo:** Es una representación formal de un sistema con cierto nivel de abstracción, siendo una herramienta que representa un aspecto de la realidad que nos ayuda a comprender este fenómeno, comportamiento o dinámica. (Romero, 2016)).

Answers, WEAP, PRMS, Mikeshe, los cuales han sido desarrollados y utilizados en estudios de distintos países, como Estados Unidos, Brasil y México, entre otros.

En la segunda fase, *análisis de alternativas*, se realiza la selección del modelo por el método AHP (proceso analítico jerárquico), el cual es una técnica que permite evaluar múltiples criterios entre diferentes alternativas. Para la investigación se evaluaron once modelos, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Modelos y criterios evaluados

MODELO	AGREGADO	DISTRIBUIDO	SEMI-DISTRIBUIDO	1D	2D	3D	GRATUITO	CON COSTO	ESCALA DIARIA	ESCALA ANUAL	SIMULA NUTRIENTES	SIMULA SST	POR EVENTO	CONTINUO
AGNPS		X		X			X		X		X	X	X	
AnnAGNPS		X		X			X		X		X	X		X
HSPF		X		X			X		X		X	X		X
WinHSPF			X	X			X		X		X	X	X	X
ANSWERS		X		X			X		X		X	X		X
SWAT			X		X		X		X		X	X		X
WEAP			X	X					X	X				X
MIKESHE		X		X	X	X		X			X	X		X
PLOAD	X		X	X			X			X	X	X	X	
PRMS		X		X			X		X				X	X

Fuente: Elaboración propia, 2016.

La evaluación se realizó mediante matrices; la generación de una estructura jerárquica dio como resultado que el modelo PLOAD (*software*) es el más apropiado para la estimación de cargas difusas por escorrentía según el objetivo.

PLOAD es un *software* basado en los SIG para el cálculo de las cargas contaminantes difusas de las diferentes áreas hidrológicas (cuencas, subcuena, microcuencas, etc.). Dichas

fuentes difusas se calculan con base en el promedio anual, para cualquier contaminante especificado en el modelo.

Para la investigación se seleccionaron como variable de evaluación los SST por ser un parámetro ampliamente usado en la evaluación de la calidad del agua como en el índice IACAL, que valora la afectación potencial del recurso hídrico. No llevar a cabo un control de SST puede generar efectos adversos en el medio ambiente, como el transporte de contaminantes de origen orgánico e inorgánico a los cuerpos de aguas cercanos por el arrastre de los SST. Anexo a esto, grandes concentraciones de SST disminuyen el paso de radiación solar en los cuerpos hídricos, generan la disminución de la fotosíntesis e impulsan el proceso de eutrofización en las fuentes de agua (Hernández, 2007).

La tercera fase, *generación y obtención de información faltante*, busca adquirir los datos de entrada requeridos por el modelo PLOAD con los que no se cuentan actualmente, como lo son la delimitación del área de estudio, usos de suelo en SIG y una serie de datos tabulares (relación de eventos de precipitación⁷ que producen escorrentía, coeficiente de escorrentía⁸, impermeabilidad del suelo⁹ y precipitación promedio anual).

Para la cuarta fase, *demonstración del modelo PLOAD*, se realiza

- a) Calibración manual: Se ajustan los parámetros de entrada, los cuales son requeridos por el modelo para garantizar que los datos introducidos coincidan con la realidad, obteniendo cambios en los datos del coeficiente de escorrentía y porcentaje de impermeabilidad¹⁰, siendo adaptados a las condiciones reales de la microcuenca.
- b) Implementación y simulación: La demostración se hizo mediante la implementación y simulación¹¹ del área de estudio en el modelo PLOAD, con el fin de estimar las cargas difusas, evaluar la influencia de los datos de entrada y la importancia de la calibración manual en los resultados obtenidos de dichas cargas. Por tanto, se definen seis escenarios en los cuales se consideran tres simulaciones

⁷ **Precipitación:** Es cualquier producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra. Ocurre cuando la atmósfera (que es una gran solución gaseosa) se satura con el vapor de agua, y el agua se condensa y cae de la solución (es decir, precipita). El aire se satura a través de dos procesos: por enfriamiento y añadiendo humedad. La precipitación que alcanza la superficie de la tierra puede producirse en muchas formas diferentes, como lluvia, lluvia congelada, llovizna, nieve, aguanieve y granzo (Pérez, s. f.).

⁸ **Coefficiente de escorrentía:** Representa la fracción de agua del total de lluvia precipitada que realmente genera escorrentía superficial una vez se ha saturado el suelo por completo. El valor de este coeficiente depende de las características concretas del terreno que determinan la infiltración del agua en el suelo. (Segerer & Villodas, 2006).

⁹ **Impermeabilidad del suelo:** La permeabilidad o impermeabilidad es la capacidad del suelo para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un suelo es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable (Sinha, 2016).

¹⁰ **Porcentaje de impermeabilidad:** Representa la porción/cantidad/valor de impermeabilidad del total del suelo (Sinha, 2016).

¹¹ **Simulación:** La simulación parte de un sistema en el cual representa una posible realidad y a través de cálculos o intercambio de valores en las variables logrará la toma de decisiones según el comportamiento que tenga el sistema en la simulación. Dando por ende que la simulación imita la realidad y la modelación crea un patrón de la realidad.

de manera agregada¹² y tres semidistribuidas¹³. Para el escenario agregado, el área de estudio considera toda la superficie de forma pareja teniendo un único valor para la precipitación. El semidistribuido segmenta el área total con base en el comportamiento de los ríos principales teniendo subáreas con variables propias de precipitación y carga contaminante por evento (EMC)¹⁴.

Con la evaluación de los dos tipos (agregados y semidistribuido) se buscó ver el efecto en los resultados de las cargas difusas por el cambio del porcentaje de impermeabilidad entre el valor recomendado por el manual de PLOAD (0 %) y el valor estimado en la calibración manual a partir del coeficiente de escorrentía (8,53 %) en los escenarios A-B y D-F. Luego se buscó ver el efecto del cambio de la relación de la precipitación que se convierte en escorrentía (entre el valor calibrado y el recomendado por el manual de PLOAD) para cada tipo de simulación (A-B-C agregado y D-E-F semidistribuido). Tabla 2.

Tabla 2. Escenarios de simulación

Condición	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E	Escenario F
Simulaciones de manera	Agregado	Agregado	Agregado	Semidistribuido	Semidistribuido	Semidistribuido
Relación de precipitación que se convierte en escorrentía	0,10	0,10	0,90	0,10	0,90	0,10
Precipitación promedio	866,14 mm	866,14 mm	866,14 mm	Según el área	Según el área	Según el área
Porcentaje de impermeabilidad	0	8,53	8,53	8,53	8,53	0

Nota: Elaboración propia, 2016.

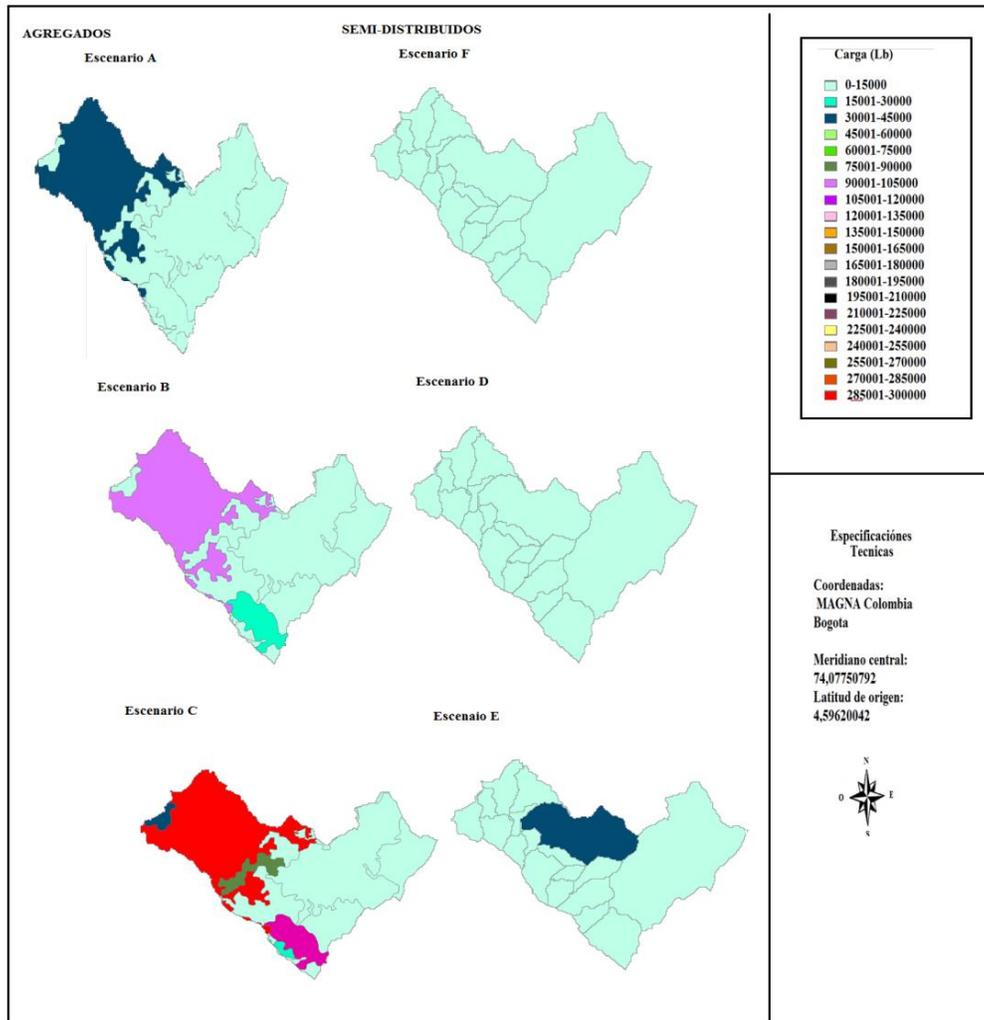
¹² **Modelo agregado:** Es aquel que realiza un balance de agua simplificado, empleando parámetros únicos que representan en promedio la variabilidad espacial y temporal de las características de una zona relativamente extensa. (Oñate, 2009).

¹³ **Modelo semidistribuido:** Estos modelos dividen la cuenca en pequeñas subáreas, considerando la variabilidad espacial de los datos y de los parámetros del modelo (Oñate, 2009).

¹⁴ **EMC:** Parámetro estadístico usado para representar una concentración ponderada de flujo de un parámetro de calidad del agua deseada durante un evento único de tormenta (Wanielista y Yousef, 1992).

Los resultados obtenidos de cargas difusas de SST para los seis escenarios comprueban la existencia de estas en la microcuenca, como se observa en la figura 2. Las cargas para los sistemas semidistribuidos no sobrepasan el valor de 45.000 libras (20.411,657 kg) y las cargas de los sistemas agregados llegan a tener un valor máximo en el escenario C de 300.000 libras (136.077,711 kg).

Figura 2. Escenario agregados vs. Semidistribuidos



Fuente: Elaboración propia, 2016.

En general, los escenarios semidistribuidos (D, E y F) presentan un valor de carga total de SST menor con respecto a las simulaciones agregadas (A, B y C). Esto se puede deber a que los sistemas semidistribuidos asumen para cada subárea un valor de superficie y

precipitación diferente, a diferencia de los sistemas agregados (escenarios A, B y C), que asumen una superficie según el tipo de uso del suelo y una precipitación uniforme de 866,21 mm/año para toda el área de estudio, dando un valor de cargas totales diferente para cada escenario, como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Cargas difusas para SST en la microcuenca para los diferentes escenarios

Escenario	A	B	C	D	E	F
Carga total (kg)	17.938,35	45.480,91	409.248,07	2.960,75	26.646,72	1.167,763

Nota: Elaboración propia, 2016.

Al generar los escenarios (A hasta F) se evidencia la existencia de cargas difusas por escorrentía de SST para cada uno de los casos. Esto demuestra que se debería realizar un control de la contaminación por cargas difusas ya que estas pueden ser transportadas por la escorrentía a los cauces principales, generando potencialmente una alteración del recurso hídrico. Así mismo, se evidenció la importancia de realizar la calibración manual (escenarios B y D) para tener valores cercanos a la realidad, como se muestra en la tabla 3. De no haberse realizado la calibración manual (para la investigación, los escenarios que utilizan los datos obtenidos en la calibración manual son B y D), la concentración de cargas difusas hubiese cambiado de manera significativa, como se obtuvo en los casos A, C, E y F (los escenarios que asumieron condiciones diferentes a los datos calibrados).

Se concluye que PLOAD es un modelo apropiado para la estimación de la contaminación por cargas difusas por escorrentía, ya que es un *software* que requiere pocos datos de entrada. La información necesaria puede llegar a ser generada y es de fácil aplicación en un área con información escasa.

Los resultados obtenidos con el modelo PLOAD demuestran la existencia de cargas contaminantes por fuentes difusas que son actualmente omitidas, generando un posible error en los métodos de evaluación, control y regulación de la calidad del recurso hídrico. Para lograr un mejor cumplimiento de las metas y objetivos de la gestión pública y ambiental como son la mitigación, preservación, conservación del recurso hídrico y mejorar la calidad de vida de las personas, se propone incorporar dichas cargas (obtenidas por PLOAD) a los indicadores de calidad del recurso hídrico y a los mecanismos de evaluación, lo cual permitiría realizar una estimación más detallada de la afectación potencial del recurso y la influencia de dichas cargas en un área de estudio. Así mismo, tener el conocimiento del comportamiento dinámico real de un área hidrológica permite que los planes de manejo y

ordenación de las cuencas (Pomca) posiblemente generen un mejor planeamiento del uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables, para conseguir un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de las cuencas.

Los escenarios agregados (A, B y C) presentan un valor de carga difusa de SST mayor en uso del suelo mosaico de pastos y cultivos respecto a los otros usos del suelo, lo que evidencia una posible influencia de dicha actividad económica en la contaminación de los cuerpos hídricos. Al ser Colombia un país con predominancia de actividades agropecuarias, es de gran importancia considerar la estimación de cargas difusas no únicamente de SST, sino de otro tipo de contaminantes, como lo son el nitrógeno y el fósforo, generados por dichas labores por el uso de fertilizantes y abonos, entre otros.

Para el caso de las áreas urbanas y suburbanas que presentan superficies permeables (poca capacidad de almacenamiento de agua), es posible que se genere un mayor arrastre de contaminantes por escorrentía, generando el transporte de contaminantes –como metales pesados, aceites, grasas, productos químicos tóxicos de los vehículos de motor, patógenos y nutrientes de desechos de mascotas–, los cuales pueden llegar a perjudicar la vida y desarrollo de la fauna y flora de un lugar, la calidad y uso de los cuerpos hídricos, las condiciones sanitarias de un espacio recreativo y afectar la calidad de vida de las personas que estén en contacto con estos.

A partir de este tipo de estudios se puede tener mayor claridad en los procesos de contaminación y establecer las estrategias que permitan generar mayor cumplimiento de los objetivos de evaluación y planeación del manejo de las cuencas.

Finalmente, en Colombia se debe continuar con el desarrollo de este tipo de investigaciones para mayor entendimiento de las distintas variables que afectan la calidad del recurso hídrico y del entorno que lo rodea.

Referencias bibliográficas

Arboleda, M. (2012). *Guía Teórica Modelación y Simulación*. Scribd. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/90055864/GUIA-TEORICA-MODELACION-Y-SIMULACION#scribd>.

Decreto 1640. *Diario Oficial* 48510. Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones., Bogotá, D. C, Colombia, 02 de agosto de 2012.

Decreto 2667. *Diario Oficial* 48651. Se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones. Bogotá, D. C, Colombia, 21 de diciembre de 2012.

- Edusolns (2011). *Sólidos suspendidos totales*. Whitman College. Disponible en: https://www.whitman.edu/chemistry/edusolns_software/deS%F3lidosTotales.pdf [Acceso 26 May 2016].
- Gálvez Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica: ¿Qué Es Cuenca Hidrológica? Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima, pp. 8-9.
- Haupt de Oliveira, J. (2009). *Metodologia para Avaliação do Potencial de Produção*. Pregrado. Politécnica da Universidade de São Pablo.
- Hernández, A. (2007). *Sólidos suspendidos totales en agua*. IDEAM. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c> Acceso 26 mayo 2016
- IDEAM (2014). Estudio Nacional del Agua. Bogotá, pp. 242-244.
- Leyton, E. (2016). Nivelación topográfica. Disponible en: <http://nivelacion-topografica.wikispaces.com/Nivelaci%C3%B3n+Topogr%C3%A1fica>. [Acceso 11 Jul 2016]
- Núñez, J. (2001). Manejo y conservación de suelos. Costa Rica: EUNED, p. 43.
- Oñate, F. (2009). *Modelamiento semidistribuido, con información escasa, de una cuenca hidrográfica para su planificación territorial*. Universidad de Alcalá.
- Orjuela, L., Saldarriaga, G., García, M. & Wilches, H. (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Bogota: IDEAM, p. Capítulo 6.
- Pérez, G. (s. f.). *Ciclo hidrológico precipitación*. Disponible en: <http://www.ciclohidrologico.com/precipitacin> [Acceso 11 Jul.2016]
- Romero, P. (2016). Análisis y Diseño Orientado a Objetos. Instituto Tecnológico de la Laguna, pp. 20-21
- Segerer, C. & Villodas, R. (2006). *Hidrología I*. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería Civil, pp. 14 a 16.
- Silva, A. (2003). *A utilização do modelo WinHSPF no estudo das cargas difusas de poluição da bacia do ribeirão da estiva*, sp (Maestria en Ingeniería). Universidade de São Pablo
- Sinha, S. (2016). *Impermeabilidad*. Glosario. Riego. org. Disponible en: <http://www.riego.org/glosario/impermeabilidad/> [Acceso 12 Jul. 2016].

Sinha, S. (2016). *Permeabilidad - ¿Qué es permeabilidad? - significado, definición, traducción y sinónimos para permeabilidad*. Disponible en: <http://www.boletinagrario.com/ap-6,permeabilidad,500.html> [Acceso 11 Jul. 2016].

Velásquez Rodríguez, O. (2011). *Manual de buenas prácticas ambientales*. 2ª ed. Bogotá D. C Colombia: Senado de la República de Colombia. Dirección General Administrativa, p. 6.

Wanielista, M. &Yousef, Y. (1992). *Storm water managment*. United States.