



SOCIEDAD Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

**Perspectivas desde la gestión del agua,
las inundaciones y el saneamiento sostenible**

COMPILADORES

Mario A. Pérez
Jorge Latorre M.
Carlos Ramírez
Norberto Urrutia
Viviana Valencia
Miguel Peña V.



Universidad
del Valle

Programa  editorial

Hay desconocimiento acerca de que los distintos componentes del ambiente son parte de diferentes ecosistemas vivos que actúan integradamente para cumplir determinadas funciones, que proveen una serie de servicios que sirven como soporte de la vida. Este olvido, junto a la dinámica económica, ha generado la alteración del funcionamiento natural de los ecosistemas, su degradación y la pérdida de un flujo importante de bienes y servicios ambientales que tienen relación con la calidad de vida de los seres humanos.

En esa perspectiva, el concepto de servicios ecosistémicos tiene el gran reto de contribuir a entender y a gestionar mejor las relaciones sociedad-naturaleza y a desarrollar soluciones tecnológicas más sostenibles e integrales. El propósito de este libro es aplicar el enfoque de servicios ecosistémicos a la gestión integral de las inundaciones y sequías y al manejo del saneamiento ambiental. Con esta publicación, la Universidad del Valle - Instituto CINARA pone a disposición del lector las investigaciones y desarrollos nacionales e internacionales más recientes en este campo.

Estos trabajos corresponden a las mejores ponencias presentadas en "AGUA 2011: Ecosistemas y sociedad. Visión, límites y aplicaciones de los servicios ecosistémicos en un mundo cambiante" (Noviembre 15 - 18 de 2011, Cali, Colombia), las cuales fueron evaluadas y seleccionadas por el Comité Científico del evento, que resultaron de dos de los seminarios desarrollados.



Programa  Editorial

SOCIEDAD Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Perspectivas desde la gestión del agua,
las inundaciones y el saneamiento sostenible



Colección Ciencias Naturales y Exactas

Sociedad y servicios ecosistémicos : perspectivas desde la gestión del agua, las inundaciones y el saneamiento sostenible / compiladores Mario Alejandro Pérez ... [et al.]. -- Cali : Programa Editorial Universidad del Valle, 2013.
428 p. ; 24 cm.
Incluye índice.
1. Riesgos naturales 2. Inundaciones - Prevención 3. Gestión del Agua 4. Saneamiento ambiental I. Pérez, Mario Alejandro, comp.
363.3493 cd 21 ed.
A1422642

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

Universidad del Valle

Programa Editorial

Título: *Sociedad y servicios ecosistémicos. Perspectivas desde la gestión del agua, las inundaciones y el saneamiento sostenible*
Compiladores: Mario Alejandro Pérez R., Jorge Latorre M., Carlos Ramírez, Norberto Urrutia, Viviana Valencia Z., Miguel Peña V.
ISBN: 978-958-765-068-6
Colección: Ciencias Naturales y Exactas

Primera edición

Rector de la Universidad del Valle: Iván Enrique Ramos Calderón
Vicerrectora de Investigaciones: Carolina Isaza de Lourido
Director del Instituto Cinara: Ines Restrepo Tarquino

© Universidad del Valle
© Mario Alejandro Pérez R., Jorge Latorre M., Carlos Ramírez, Norberto Urrutia, Viviana Valencia Z., Miguel Peña V.

Diseño de carátula, diagramación y corrección de estilo: G&G Editores - Cali.
Fotos de portada: *Agua escurriendo*, Gert Steenssens/ Esperanzaproxima.net; *Inundaciones* Héctor Javier Arango -estudiante de Maestría en Desarrollo Sustentable, Universidad del Valle-
Impreso en: Feriva S.A.

Universidad del Valle
Ciudad Universitaria, Meléndez
A.A. 025360
Cali, Colombia
Teléfono: (+57) (2) 321 2227 - Telefax: (+57) (2) 330 88 77
editorial@univalle.edu.co

Este libro ha sido parcialmente financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

Este libro, salvo las excepciones previstas por la Ley, no puede ser reproducido por ningún medio sin previa autorización escrita por la Universidad del Valle.
El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad del Valle, ni genera responsabilidad frente a terceros. Los autores son responsables del respeto a los derechos de autor y del material contenido en la publicación (fotografías, ilustraciones, tablas, etc.), razón por la cual la Universidad no puede asumir ninguna responsabilidad en caso de omisiones o errores.

Cali, Colombia - Agosto de 2013

A
de A
bia);
versi
Died
Valle
Jordi
del V
Luis
versi
Colo
(Univ
Ingla
luaga
- EIL

APLICACIÓN DE FACTORES DE ASIMILACIÓN PARA LA PRIORIZACIÓN DE LA INVERSIÓN EN SISTEMAS DE SANEAMIENTO HÍDRICO EN COLOMBIA

Andrés F. Rojas A.⁽¹⁾. Luis A. Camacho B.⁽²⁾

(1) Ingeniero Civil M.Eng. afrojasa@unal.edu.co

(2) Ingeniero Civil, MSc, PhD. lacamachob@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, Colombia.

RESUMEN

En este artículo se complementa y se extiende la metodología de modelación simplificada de la calidad del agua de la red hídrica nacional de Uniandes-Minamb (2002), para la priorización de la inversión en sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales en Colombia, para el periodo comprendido entre 2010-2020. Para esto, se utiliza una metodología multiobjetivo, que involucra criterios de infraestructura, administrativos y de salud pública, con el propósito de configurar una red de sistemas de tratamiento, que garantice su adecuado funcionamiento y se refleje en una significativa reducción en la vulnerabilidad de la oferta hídrica para potabilización en el país. Los resultados muestran la necesidad de enfocar los esfuerzos en ciertos municipios de las cuencas de los ríos Chinchiná, Otún, Lebrija, La Vieja y Zulia y continuar invirtiendo en algunos municipios de las cuencas reportados en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2006-2010. Adicionalmente, los análisis indican que la priorización municipal de saneamiento hídrico del país, debe estar complementada con estudios de detalle, con el objeto de tomar decisiones adecuadas.

PALABRAS CLAVE: Calidad del agua, modelo ADZ-QUASAR, priorización, saneamiento hídrico.

INTRODUCCIÓN

La implementación de los sistema(s) de tratamiento de aguas residuales municipales (STARM) en los diferentes municipios del país, ha sido concebida generalmente sin una adecuada planeación de las inversiones y sin la priorización del uso de los recursos. Se han implementado sistemas que no son de interés prioritario para el país, y que por ende no reducen la vulnerabilidad de la oferta hídrica para el abastecimiento.

Se han realizado estudios enfocados a mitigar esta falencia, como el de Uniandes-Minamb (2002), cuyo objetivo era el establecer las prioridades de inversión STARM, para un período de 10 años (2002-2012), determinando los municipios y/o cuencas, que requerían de forma prioritaria la construcción u optimización de estos sistemas.

Esta investigación en particular representa una complementación y extensión al estudio realizado por Uniandes-Minamb (2002). Específicamente se contribuye a la metodología original, involucrando el concepto de factor de asimilación de las corrientes, aportando resultados de investigaciones recientes relacionados con la estimación de tasas de reacción en modelos de calidad del agua de ríos de montaña, aplicando nuevas relaciones geomorfológicas e hidroclimatológicas, así como utilizando mejores herramientas cartográficas y teniendo en cuenta los avances en la construcción de infraestructura de STARM en la última década. Así mismo, se ha considerado relevante introducir nuevos modelos de calidad de agua, que involucran procesos de transporte de dispersión longitudinal que corrigen la suposición de flujo a pistón de los modelos considerados en el estudio precedente.

METODOLOGÍA

Para identificar los puntos o zonas críticas del país, que requieren de inversión prioritaria en STARM, se propone una metodología que evalúa la capacidad de asimilación de la carga contaminante de las corrientes. En particular se considera en detalle el indicador de Coliformes Totales (CT) pues se ha evidenciado claramente, en diferentes estudios, los graves conflictos uso-calidad por contaminación bacteriológica del agua utilizada para potabilización y riego agrícola que se presentan en varios tramos de la red hídrica nacional con el potencial efecto en la salud pública (Uniandes-Minamb, 2002; Rojas, 2011)

En este estudio se ha utilizado el modelo de calidad de agua ADZ-QUASAR (Lees *et al.*, 1998), el cual involucra los fenómenos de transporte del modelo ADZ (Young y Wallis, 1993) y los procesos de reacción del modelo de calidad del agua QUASAR (Whitehead *et al.*, 1997). Suponiendo condiciones de estado estable y un volumen de control igual al tramo de un río, es posible demostrar que la expresión para el determinante CT corresponde a:

$$C(t) = \frac{e^{-k_c \cdot \bar{t}} \cdot U_c (\bar{t} - \tau)}{1 + TR \cdot k_c} \quad (1)$$

Donde k_c corresponde a la tasa de decaimiento de CT; TR , t y τ son los parámetros de transporte de solutos correspondientes a los tiempos de residencia ADZ, tiempo de viaje y tiempo de primer arribo o retraso, respectivamente; U_c y $C(t)$ corresponden a las concentraciones de CT, a la entrada y salida del tramo.

La ecuación 1 puede relacionarse con el concepto de factores de asimilación por dilución, dispersión longitudinal y reacción, los cuales están asociados con los efectos físicos, químicos y biológicos que afectan la sustancia contaminante en la corriente receptora (Chapra, 1997). De acuerdo con Rojas (2011), el factor de asimilación para CT, se puede expresar como:

$$a_{CT} = Q \cdot F \quad (2)$$

Donde a_{CT} es el factor de asimilación del determinante CT; Q es el caudal del tramo de corriente; y F corresponde a un factor adimensional que depende de los parámetros que describen los fenómenos de advección y dispersión longitudinal y la reacción, degradación o decaimiento de la sustancia en la corriente, cuya expresión se denota como:

$$F = e^{k_{CT} \bar{t}} \left(\frac{1 + \bar{t} \cdot DF \cdot k_{CT}}{e^{\bar{t} \cdot DF \cdot k_{CT}}} \right) \quad (3)$$

Para la construcción de la red hídrica nacional y para la estimación de los parámetros de los factores de asimilación de CT, se emplea el DEM del producto de HydroSHEDS (Hydrological data and maps on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales; Lehner *et.al*, 2008) de 15 Arcsec, derivado de la STRM (Shuttle Radar Topography Mission), debido a su procesamiento a una condición hidrológicamente correcta.

Los caudales de las corrientes en la red hídrica se estiman mediante el balance hídrico de largo plazo, empleando los campos de precipitación y de evapotranspiración real construidos por Álvarez (2007) a partir de Kriging con deriva externa y del método de TURC, respectivamente. La selección de estos métodos está basada en los buenos ajustes obtenidos a partir de registros de caudal en diferentes estaciones del país.

Para la estimación de los parámetros de los factores de asimilación, se emplean relaciones hidroclimatológicas y geomorfológicas adecuadas para este propósito (Rojas 2011). La velocidad y profundidad media de las corrientes, se hallan a partir de las relaciones potenciales propuestas por Leopold y Maddock (1953), las cuales están en función del caudal medio multianual. La velocidad del soluto se halla a partir de la afectación de la velocidad del flujo por un coeficiente de retraso, correspondiente a 1.10 para ríos de montaña (González, 2008) y 2.00 para ríos de planicie. La tasa de reacción de CT se halla a partir del método propuesto por Chapra (1997), el cual está en función de los fenómenos de decaimiento natural, radiación y sedimentación.

Con respecto a la magnitud de las cargas contaminantes municipales, éstas se estiman con base en las cargas presuntivas, reportadas por el RAS-2000. Se consideran los factores de remoción reales de acuerdo al inventario de STARM reportado por la SSPD (2009).

Formulación de escenarios de priorización municipal

Para determinar los municipios que tienen mayor responsabilidad en la contaminación de las corrientes de la red hídrica nacional, se formulan y se evalúan los resultados de diferentes escenarios que podrían soportar la toma de decisiones adecuadas y efectivas, de tal manera que las inversiones en saneamiento hídrico se traduzcan en la máxima reducción de los impactos por contaminación hídrica por peso invertido o la máxima reducción de la vulnerabilidad por contaminación hídrica y por ende el mejoramiento de la calidad

de vida en las poblaciones y usuarios en las corrientes aguas abajo de los vertimientos. Se simularon cuatro escenarios, los cuales se exponen a continuación.

Escenario 1 o de referencia: corresponde a la modelación del determinante CT, para el caso hipotético en el que no se considera sistema de tratamiento alguno, en los diferentes municipios del país. Este escenario se constituye como base para la comparación de los escenarios restantes, permitiendo evaluar y comparar el impacto que genera la implementación de STARM, de acuerdo con los escenarios propuestos.

Escenario 2, Priorización por factores de dilución: Esta condición contempla que el caudal es el responsable de la capacidad de asimilación de las corrientes, descartando los procesos de transporte y decaimiento del soluto. De esta forma la carga máxima permisible corresponde a:

$$W_{perm} = a_{CT} \cdot c_{perm} = Q \cdot c_{perm} \quad (4)$$

Donde c_{perm} es la concentración máxima permisible de CT para potabilización (reportada por el Decreto 1594 de 1984); y W_{perm} es la carga máxima permisible.

Se establecen los sitios críticos o municipios que demandan de tratamiento prioritario comparando la carga vertida y la carga máxima permisible. Si la razón entre la carga vertida y la máxima permisible es mayor a uno (*i.e.* $W_{vert}/W_{perm} > 1.0$), se considera necesario priorizar la inversión en dicho municipio. Para determinar el orden de priorización, de los diferentes municipios, se organizan en orden descendente, de acuerdo con este criterio y se seleccionan los primeros 118, con el fin de realizar una comparación objetiva con el estudio de Minamb-Uniandes (2002), asignándoles un tratamiento secundario con desinfección (remoción de CT del 99%).

Escenario 3: Priorización por factores de asimilación y población vulnerable: Para este escenario se determina si los vertimientos aislados (cuando se descartan los demás vertimientos aguas arriba o aguas abajo del vertimiento de interés), son causantes de concentraciones superiores a la establecida para el uso de potabilización (Decreto 1594 de 1984), en las inmediaciones de los municipios localizados aguas abajo de los mismos.

Bajo esta suposición, la carga máxima permisible, se puede calcular mediante la siguiente expresión (Rojas, 2011)

$$W_{perm} = \left(\prod_{j=1}^{i-1} F_j \right) Q_i \cdot c_{perm} \quad (5)$$

La expresión dentro del paréntesis corresponde al producto de los factores F entre el punto de vertimiento y el punto de interés aguas abajo.

Para la priorización de este escenario, se evalúa la afectación de los municipios localizados aguas abajo del vertimiento, con base en la razón entre la carga

máxima vertida y la permisible (*i.e.* $W_{vert}/W_{perm}>1$). Se contabiliza adicionalmente el número de habitantes de los municipios afectados, **Población vulnerable** (PVULN), de acuerdo al criterio expuesto, los cuales son asignados al municipio responsable de la afectación. Por último, se ordenan los vertimientos de forma descendente conforme al número de habitantes afectados. Se asigna a los primeros 118 municipios un tratamiento secundario con desinfección (remoción de CT del 99%).

Escenario 4: Priorización municipal por análisis multiobjetivo. Para la priorización de los STARM en los municipios, se propone un análisis multiobjetivo, involucrando aspectos sociales, económicos y técnicos para una correcta priorización en la inversión en STARM. Se emplea la metodología propuesta por Díaz-Granados *et al.* (2002), seleccionando los siguientes criterios:

- **Población (POB):** se refiere al número de habitantes de las cabeceras municipales para el año 2020, de acuerdo a las proyecciones del DANE. Este criterio está asociado al estado económico de la población y al potencial de vertimientos que pueden arrojar al cuerpo receptor. Mayor prelación a mayor POB.
- **Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI):** permite relacionar el grado de pobreza de una población, basado en indicadores de habitabilidad, acceso a servicios básicos, acceso a la educación y la capacidad económica de la población. Mayor prelación a menor NBI.
- **Cobertura de acueducto (CAC):** es necesario que el municipio cuente con un nivel de cobertura adecuada, previo a la implementación de un STARM. Mayor prelación a mayor CAC.
- **Cobertura de alcantarillado (CAL):** al igual que el criterio anterior, es necesario que el municipio cuente con un nivel de cobertura adecuada de alcantarillado, para la asignación de recursos para un futuro STARM. Mayor prelación a mayor CAL.
- **Inventario de Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP):** su selección está basada en las mismas razones expuestas en CAC y CAL. Mayor prelación a mayor PTAP.
- **Desempeño Integral de los Municipios (DIM):** este índice evalúa la gestión pública de los municipios, para la toma de decisiones de política pública y la asignación de recursos con base en los resultados y la problemática local. Mayor prelación a mayor DIM.
- **Población vulnerable (PVULN):** este criterio calcula la población afectada, considerando que el vertimiento, en el municipio de interés, es el único responsable de la contaminación hídrica (escenario 3). Mayor prelación a mayor PVULN.

Priorización por cuenca

Se realiza una priorización de cuencas, empleando una metodología similar a la expuesta para la priorización municipal. Para este caso se emplean los criterios: NBI, CAC, CAL, DIM, PTAP y PVULN. Los cuatro primeros criterios, se estiman a partir del promedio ponderado con relación a la población de los municipios de las cuencas. En lo referente a la PTAP se estima la proporción de

este tipo de infraestructura dentro de las cuencas analizadas; y el criterio PVULN se halla a partir de la población afectada por causa de los vertimientos municipales.

Para una adecuada priorización, se seleccionaron cuencas de primer y segundo orden, de acuerdo a la zonificación reportada por el IDEAM, para un total de 93 cuencas analizadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realiza una evaluación y comparación de los escenarios planteados, de acuerdo a las magnitudes de las concentraciones de CT. El criterio de comparación hace referencia a los habitantes de los municipios afectados, cuya concentración de este determinante en la corriente aledaña, presente un valor superior al máximo establecido de acuerdo al Decreto 1594 de 1984. La selección de este criterio obedece al criterio de enfocar la reducción de la vulnerabilidad de la población de los municipios afectados que hace uso directo o indirecto de estas fuentes.

Con base en este criterio, se efectúa la comparación de las eficiencias de los escenarios planteados. Se toma como referencia el escenario 1 y se determina la reducción de la población afectada, tal como se muestra en la Figura 1. Se observa que el escenario 2, no refleja reducciones considerables, a pesar que su enfoque corresponde al de mitigar los impactos causados por los vertimientos en los sitios más críticos.

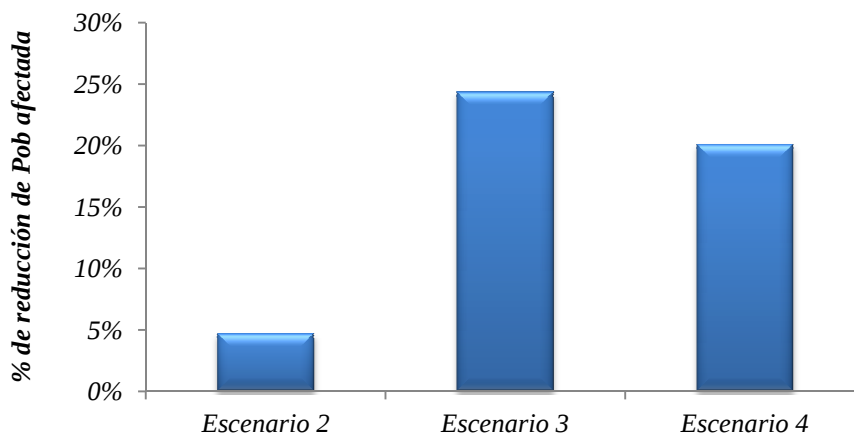


Figura 1. Porcentaje de reducción de la población afectada de acuerdo a los escenarios planteados

Así mismo de la Figura 1, se aprecia que los escenarios 3 y 4 presentan una reducción significativa en la población afectada. Resulta coherente que el escenario 3 presente una mayor reducción que el escenario 4, debido a que los criterios para el primero están basados en determinar los municipios con mayor responsabilidad en la contaminación y afectación poblacional. No obstante, la reducción que se registra en el escenario 4, se considera adecuada, garantizando además la inclusión de otros criterios que permitirían optimizar el funcionamiento de los sistemas de tratamiento, con mayor sostenibilidad en el tiempo por mayor capacidad operativa y gestión de los municipios así priorizados.

Por otra parte y con el propósito de localizar los municipios más críticos, de acuerdo a los escenarios propuestos, se clasifican los primeros 50 municipios de cada escenario, de acuerdo a la cuenca en la que se encuentran localizados (Figura 2).

De acuerdo a los resultados del escenario 2 se presenta una buena proporción de municipios ubicados en las cuencas del Bajo Magdalena y del río San Jorge, que se explica por una baja capacidad de dilución de las corrientes aledañas a los mismos. En lo referente al escenario 3, se observa un predominio de municipios priorizados en las cuencas de los ríos Bogotá, Porce y Chicamocha. Al igual que el escenario 3, los resultados del escenario 4 muestran que la cuenca del río Bogotá presenta el mayor número de municipios que requieren priorización en la implementación de STARM.

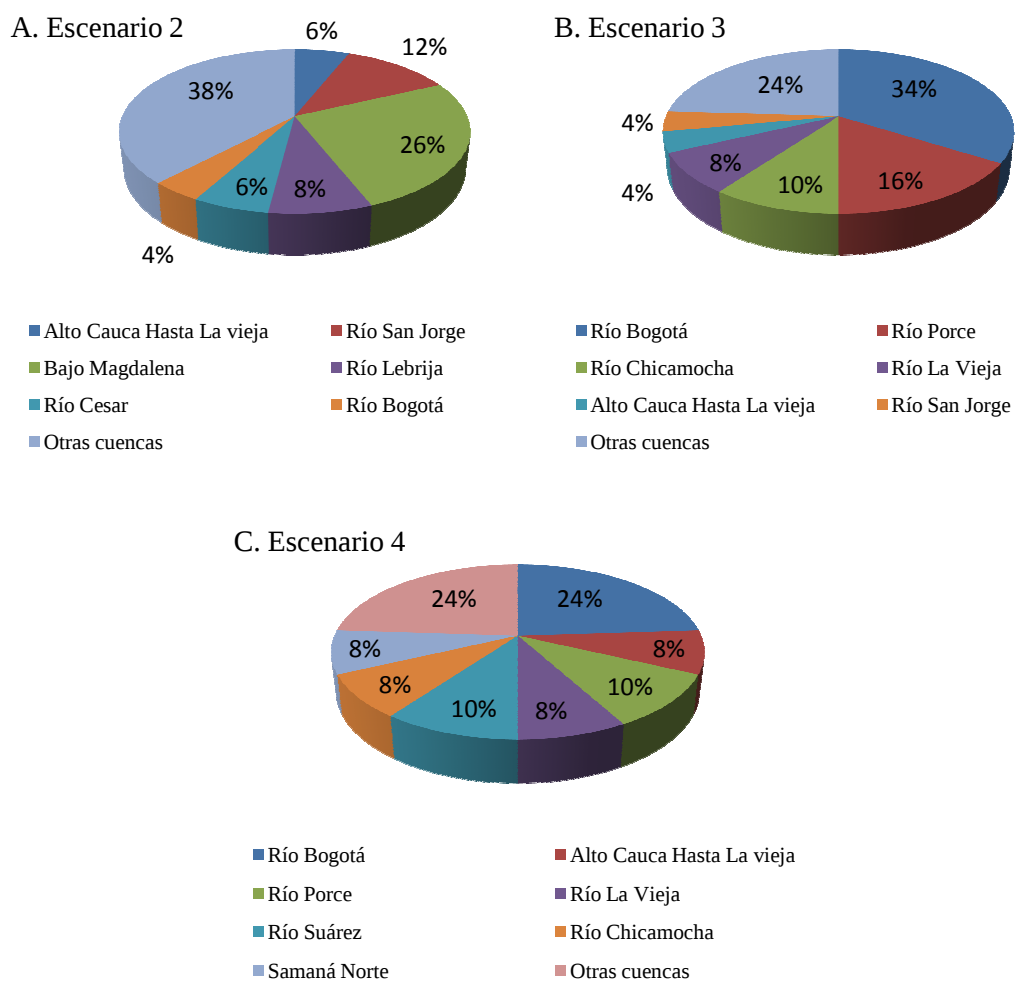


Figura 2. Clasificación por cuencas de los municipios priorizados para los escenarios 2, 3 y 4.

Con el propósito de estudiar la sensibilidad del escenario 4, se proponen diferentes combinaciones de ponderación para las variables propuestas. Las combinaciones plantean diferentes pesos relativos de las variables, que permiten evaluar la robustez de la metodología. Las magnitudes de los pesos relativos, se reportan en

la Tabla 1, siguiendo la aplicación de la metodología de Díaz-Granados et al. (2002). Así mismo, los resultados de los primeros diez municipios, para las diferentes combinaciones planteadas, se reportan en la Tabla 2.

Tabla 1. Combinaciones de pesos relativos correspondientes a las variables de los municipios

	<i>POB</i>	<i>NBI</i>	<i>CAC</i>	<i>CAL</i>	<i>PTAP</i>	<i>DIM</i>	<i>PVULN</i>
Combinación 1	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%
Combinación 2	20.00%	6.67%	6.67%	6.67%	20.00%	20.00%	20.00%
Combinación 3	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	0.00%
Combinación 4	0.00%	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%
Combinación 5	5.76%	18.12%	9.12%	10.30%	14.23%	22.61%	19.86%

Tabla 2. Listado de los primeros diez municipios de acuerdo a las combinaciones propuestas

	Combinación 1	Combinación 2	Combinación 3	Combinación 4	Combinación 5
1	<i>Medellín</i>	<i>Facatativá</i>	<i>Medellín</i>	<i>Medellín</i>	<i>Medellín</i>
2	<i>Facatativá</i>	<i>Medellín</i>	<i>Facatativá</i>	<i>Sopó</i>	<i>Sopó</i>
3	<i>Manizales</i>	<i>Sopó</i>	<i>Manizales</i>	<i>Facatativá</i>	<i>Facatativá</i>
4	<i>Sopó</i>	<i>Funza</i>	<i>Sopó</i>	<i>Manizales</i>	<i>Mosquera</i>
5	<i>Funza</i>	<i>Mosquera</i>	<i>Funza</i>	<i>Funza</i>	<i>Funza</i>
6	<i>Zipaquirá</i>	<i>Zipaquirá</i>	<i>Zipaquirá</i>	<i>Zipaquirá</i>	<i>Manizales</i>
7	<i>Mosquera</i>	<i>Manizales</i>	<i>Mosquera</i>	<i>Mosquera</i>	<i>Zipaquirá</i>
8	<i>Bogotá, D.C.</i>	<i>Sogamoso</i>	<i>Bogotá, D.C.</i>	<i>Bogotá, D.C.</i>	<i>Sogamoso</i>
9	<i>Tunja</i>	<i>Fusagasugá</i>	<i>Bucaramanga</i>	<i>Tunja</i>	<i>Bogotá, D.C.</i>
10	<i>Sogamoso</i>	<i>Bogotá, D.C.</i>	<i>Pasto</i>	<i>Sogamoso</i>	<i>Tunja</i>

El listado de municipios, para las diferentes combinaciones, evidencia una baja sensibilidad de los resultados, mostrando que un ligero cambio en la magnitud de los pesos relativos, no modifica de forma sustancial el orden de los municipios. Se aprecia que para las diferentes combinaciones, las poblaciones de Medellín, Zipaquirá, Funza, Bogotá D.C, Facatativá, Tunja, Mosquera, Sogamoso y Manizales se reportan para las diferentes combinaciones.

Al efectuar la comparación de los resultados de este estudio con el de Uniandes-Minamb (2002), se observa una baja correspondencia entre los mismos. No obstante, se evidencian coincidencias para las ciudades de Bogotá, Medellín, Manizales y Tunja. De igual forma, se destaca que la cuenca del río Chicamocha presenta el mayor número de correspondencias municipales, sobresaliendo los municipios de Sogamoso, Paipa y Duitama que a su vez están enmarcados dentro del PND 2006-2010.

Siendo coherentes con los planes de priorización precedentes, se seleccionan el mismo número de municipios a priorizar de acuerdo al PND 2006-2010 (118). De esta forma, los municipios seleccionados son resultado de la aplicación del análisis multiobjetivo (escenario 4), sin involucrar los que ya cuentan con los planes y las políticas gubernamentales establecidas para su priorización (PND 2006-2010).

En lo referente a los resultados de la priorización de cuencas, se realiza un análisis de sensibilidad similar al propuesto para la priorización municipal, cuyos

resultados se reportan en la Tabla 3. Se aprecia que la cuenca del río Bogotá encabeza la lista para todas las combinaciones propuestas. Así mismo, se destacan las cuencas del Alto Cauca hasta la confluencia del río La Vieja y la del río Porce. Adicionalmente, resulta un segundo grupo de cuencas que se ubican entre las diez primeras posiciones, en la mayoría de combinaciones, y corresponden a los ríos Lebrija, La Vieja, Chinchiná, Otún y Zulia.

Tabla 3. Listado de las primeras cinco cuencas de acuerdo a las combinaciones propuestas

	<i>Combinación 1</i>	<i>Combinación 2</i>	<i>Combinación 3</i>	<i>Combinación 4</i>	<i>Combinación 5</i>
1	<i>Río Bogotá</i>	<i>Río Bogotá</i>	<i>Río Bogotá</i>	<i>Río Bogotá</i>	<i>Río Bogotá</i>
2	<i>Alto Cauca Hasta Río La Vieja</i>	<i>Alto Cauca Hasta Río La Vieja</i>	<i>Alto Cauca Hasta Río La Vieja</i>	<i>Alto Cauca Hasta Río La Vieja</i>	<i>Río Porce</i>
3	<i>Río Porce</i>	<i>Río Porce</i>	<i>Bajo Magdalena</i>	<i>Bajo Magdalena</i>	<i>Río Chinchiná</i>
4	<i>Río Chinchiná</i>	<i>Río Chinchiná</i>	<i>Río Porce</i>	<i>Río Porce</i>	<i>Río Otún</i>
5	<i>Río Otún</i>	<i>Río Lebrija</i>	<i>Río Zulia</i>	<i>Río Lebrija</i>	<i>Río La Vieja</i>

Los resultados de priorización de cuencas, reflejan coherencia con los programas de saneamiento que reporta las bases del Plan Nacional de Desarrollo “Prosperidad para todos” (DNP, 2010), en los que se registran la priorización de las cuencas de los ríos Bogotá, Cauca, Medellín, Fonce, Chichiná, Chicamocha, Otún y Laguna de Fúquene. De acuerdo a los resultados de este análisis, se recomienda la adición de las cuencas de los ríos Lebrija y Zulia.

Al efectuar una comparación con los resultados de Uniandes-Minamb (2002), se concluye que a pesar de los diferentes criterios seleccionados, los dos estudios coinciden en priorizar las cuencas de los ríos Bogotá y Porce (Medellín).

Es necesario recalcar que no todos los municipios enmarcados dentro de la priorización de cuencas, requieren de la implementación de sistemas de tratamiento de agua residual. La metodología aquí propuesta, cuenta con un sinnúmero de limitaciones que podrían representar un alto nivel de incertidumbre. Por lo tanto la priorización por cuencas resulta útil para ubicar zonas que posiblemente requieran STARM. Posteriormente a esto se debe efectuar un estudio de detalle en la zona seleccionada, con el fin de involucrar la mayor cantidad de procesos y variables, y de esta manera garantizar una adecuada reducción de la contaminación hídrica de las corrientes.

CONCLUSIONES

La priorización considerando vertimientos aislados, en conjunto con los criterios de factores de asimilación y población vulnerable, revela una reducción considerable de la población afectada por vertimientos municipales. Esto es debido a que se consideran los municipios con mayor responsabilidad en la contaminación y afectación poblacional. Por el contrario para la priorización por dilución, no se obtienen resultados relevantes que reduzcan considerablemente la población afectada por los vertimientos municipales. Esto ocurre porque se identifican como los municipios más críticos, aquellos cuyos cuerpos receptores no cuentan con el caudal necesario para reducir las concentraciones de

vertimientos municipales a niveles apropiados pero no aquellos que producen el mayor impacto en la población localizada aguas abajo.

En cuanto a la priorización municipal, se evidencia que la mayoría de los municipios considerados, se encuentran localizados en las cuencas de los ríos Bogotá, Porce, Alto Cauca hasta La Vieja y Chicamocha, resultando concordantes con algunos municipios reportados por el Plan Nacional de Desarrollo (PND 2006-2010).

En lo que corresponde a la priorización por cuencas, se avalan las inversiones previstas para el saneamiento de las cuencas reportadas en el PND 2010-2014, sugiriendo la adición de las cuencas correspondientes a los ríos Lebrija, La Vieja y Zulia. No obstante, esta priorización debe complementarse con un estudio de detalle que permita justificar claramente los municipios a priorizar.

BIBLIOGRAFÍA

- (v) Álvarez, O. (2007). *Cuantificación de la incertidumbre en la estimación de campos hidrológicos. Aplicación al balance hídrico de largo plazo*. Medellín: UNAL [Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería-Recursos Hidráulicos].
- (iii) Chapra, S. (1997). *Surface Water Quality Modelling*. Mc Graw Hill.
- Díaz-Granados, M; Barrera, S; Ramos, J; Camacho, L; Rosales, R; Escalante, N; Torres, M. (2002). Metodología multicriterio para la priorización de inversión de aguas residuales municipales en Colombia. *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- (iv) DNP. (2010). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. Prosperidad para todos. Más trabajo, menos pobreza y más seguridad*. Bogotá D.C: Departamento Nacional de Planeación.
- (v) González, R. (2008). *Determinación del comportamiento de la fracción dispersiva en ríos característicos de montaña*. Bogotá D.C: UNAL [Tesis para optar el título de Magister en Ingeniería-Recursos Hidráulicos].
- Lees, M; Camacho, L; Whitehead, P. (1998). Extension of the QUASAR river water quality model to incorporate dead-zone mixing. *Hydrology & Earth System Science*, 2(2-3), 353-365.
- Lehner, B; Verdin, K; Jarvis, A. (2008). *HydroSHEDS Technical documentation. Version 1.1*.
- Leopold y Maddock. (1953). The hydraulic geometry of streams and some Physiographic implications. *United States Geological Survey Professional Paper* 252.
- (iv) RAS. (2000). *Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS*. Bogotá D.C: MinDesarrollo.
- (v) Rojas, A. (2011). *Aplicación de factores de asimilación para la priorización en la inversión de sistemas de saneamiento hídrico en Colombia*. Bogotá D.C: UNAL [Tesis para optar el título de Magister en Ingeniería-Recursos Hidráulicos].
- (iv) SSPD. (2009). *Sistemas de Alcantarillado en Colombia. Visión del servicio público*. Bogotá D.C: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.
- (iv) Uniandes-Minamb. (2002). *Aplicación de un modelo numérico para la priorización de la inversión en tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Bogotá D.C.
- Whitehead, P; Williams, R; Lewis, D. (1997). Quality simulation along river systems (QUASAR): model theory and development. *The science of total environment*, 447-456.
- Young, P y Wallis, S. (1993). Solute transport and dispersion in channels. *Channel Network Hydrology*. Jhon Wiley & Sons Ltd, 129-173.